



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA  
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

FRANCISCO RODRIGUES DE LIMA NETO

**BIOCHAR DE MORINGA NO CULTIVO DE CAPIM-ELEFANTE NO SEMIÁRIDO  
POTIGUAR: MELHORIAS NA FERTILIDADE DO SOLO E SEQUESTRO DE  
CARBONO**

MOSSORÓ

2025

FRANCISCO RODRIGUES DE LIMA NETO

**BIOCHAR DE MORINGA NO CULTIVO DE CAPIM-ELEFANTE NO SEMIÁRIDO  
POTIGUAR: MELHORIAS NA FERTILIDADE DO SOLO E SEQUESTRO DE  
CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e Uso Agrícola de Resíduos e seus Impactos no Solo e Água

Orientador: Bruno Caio Chaves Fernandes, Prof. Dr.

Co-orientadores: Bárbara Samartini Queiroz Alves, Dra.; Marcelo Semeraro de Medeiros, Dr.

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Nb        Neto, Francisco Rodrigues de Lima.  
          Biochar De Moringa No Cultivo De Capim-  
          Elefante No Semiárido Potiguar: Melhorias Na  
          Fertilidade Do Solo E Sequestro De Carbono /  
          Francisco Rodrigues de Lima Neto. - 2025.  
          65 f. : il.

          Orientador: Bruno Caio Chaves Fernandes .  
          Coorientador: Marcelo Semeraro De Medeiros.  
          Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
          Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
          Manejo de Solo e Água, 2025.

          1. Pirólise de biomassa. 2. Ciência de solo. 3.  
          Gestão de resíduo. 4. Semiárido brasileiro. 5.  
          Sequestro de carbono. I. Chaves Fernandes , Bruno  
          Caio , orient. II. Medeiros, Marcelo Semeraro De,  
          co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FRANCISCO RODRIGUES DE LIMA NETO

**BIOCHAR DE MORINGA: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA  
MELHORAR A FERTILIDADE DO SOLO NO SEMIÁRIDO E POTENCIALIZAR A  
PRODUÇÃO DE CAPIM ELEFANTE PARA PRODUÇÃO DE BIOENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e Uso Agrícola de Resíduos e seus Impactos no Solo e Água

Defendida em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / 2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Bruno Caio Chaves Fernandes, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

---

Bárbara Samartini Queiroz Alves, Dra. (Shell)  
Coorientador

---

Marcelo Semeraro de Medeiros, Dr. (Shell)  
Coorientador

---

Frederico Ribeiro do Carmo, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

---

Adriano Erique de Oliveira Lima, Prof Dr. (IFCE)  
Membro Examinador

---

Rafael da Silva Teixeira, Prof Dr. (UFV)  
Membro Examinador

*À meu irmão, Francisco Jarrisson Fernandes Cavalcante  
(In Memoriam).*

Dedico este trabalho à minha avó Marina Fernandes, aos meus pais Evando Saraiva e Fátima Fernandes, à minha irmã Sheilla Fernandes e à minha sobrinha Isabela Fernandes, por todo amor, apoio e inspiração ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida, pela saúde e por todas as bênçãos concedidas ao longo desta caminhada.

Expresso minha sincera gratidão ao povo brasileiro, verdadeiro financiador da educação pública neste país, da qual sou beneficiário desde o ensino fundamental até o presente momento, no mestrado.

Aos meus familiares, sou profundamente grato pelo carinho, apoio incondicional e incentivo em todos os momentos.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), registro meu reconhecimento pela oportunidade de cursar o mestrado, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, pela formação de excelência oferecida.

Aos docentes e servidores técnico-administrativos da UFERSA, minha gratidão por todo o apoio e dedicação durante o curso, que contribuíram de forma significativa para minha trajetória acadêmica.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis-PRH-ANP, Gestão FINEP e Gestão FAPESP, pelo suporte financeiro ao projeto com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&IL da Resolução ANP nº 918/2023.

Agradeço de modo especial ao meu orientador, Prof. Dr. Bruno Caio Chaves Fernandes, pelo comprometimento, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos ao longo de toda a pesquisa. Sua orientação foi fundamental para a realização deste trabalho.

À Professora Dra. Eulene Francisco da Silva, sou grato pelos ensinamentos, incentivo constante e pelas contribuições decisivas no desenvolvimento do projeto.

Ao Professor Dr. Fernando Sousa, agradeço pelos ensinamentos na redação e estruturação do trabalho, sempre com disposição em contribuir para a melhoria da escrita científica.

Aos coorientadores Marcelo e Bárbara, deixo um agradecimento especial por todo o empenho, atenção e apoio técnico ao longo das diferentes etapas do projeto. Minha gratidão é imensurável. Que Deus os abençoe abundantemente.

À empresa Shell, agradeço pela disponibilidade dos profissionais que contribuíram tecnicamente para a realização desta pesquisa por meio da parceria institucional.

Aos membros da banca avaliadora, agradeço pela disponibilidade e pelas contribuições valiosas que enriqueceram esta pesquisa.

Aos colegas de curso Éder, Luiz, Lyandra, Juciane, Darliane, Cynthia e Larissa, meu sincero agradecimento pela parceria, amizade, troca de conhecimentos, apoio mútuo e por compartilharem comigo os desafios e alegrias desta jornada. A presença de vocês tornou o percurso mais leve e significativo.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste mestrado. Levo comigo um profundo sentimento de gratidão por cada gesto de apoio e colaboração recebido ao longo dessa trajetória

“Não há saber mais ou saber menos: há saberes diferentes.”

Paulo Freire

## RESUMO

Neste trabalho avaliou-se os efeitos da aplicação de biochar de moringa (*Moringa oleifera* Lam.), isoladamente ou em combinação com vermicomposto e adubação mineral, sobre atributos químicos do solo, estoques de carbono e desempenho produtivo e fisiológico do capim-elefante BRS Capiáçu (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivado em solo arenoso do semiárido brasileiro. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em colunas preenchidas com solo, avaliando-se dez tratamentos com diferentes proporções de biochar, vermicomposto e adubação química, em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. O biochar foi produzido a 350 °C, apresentou pH=9,42; %C = 66,6 e razão molar: H/C=0,6 e O/C=0,3. Foram realizadas análises físico-químicas do solo e avaliações morfológicas, fisiológicas e nutricionais das plantas. As variáveis avaliadas incluíram carbono total, carbono lábil e matéria orgânica particulada (MOP), macro e micronutrientes do solo e da planta, além de atributos como área foliar, clorofilas, lignina e celulose. Os principais resultados mostraram que a combinação de biochar com vermicomposto proporcionou aumento significativo nos teores de carbono orgânico total (até +76 %), carbono lábil e MOP, bem como elevação nos índices de manejo de carbono (IMCCL e IMCCOP). Os tratamentos com maior proporção de biochar, como 100 % biochar, 75 % biochar + 25 % vermicomposto e 50 % biochar + 50 % vermicomposto, apresentaram os melhores resultados em termos de fertilidade do solo, acúmulo de biomassa, teores de clorofilas, lignina, celulose e maior eficiência na absorção de nutrientes (N, K, Ca e Mg) pela planta. As análises multivariadas (PCA, correlação canônica e agrupamento) evidenciaram relações fortes entre o acúmulo de carbono no solo e o desempenho fisiológico e morfológico das plantas. O tratamento com 100 % de biochar foi o mais eficiente para o sequestro de carbono, enquanto os tratamentos com proporções equilibradas — como 33,4 % biochar + 33,3 % adubação química + 33,3 % vermicomposto e 50 % biochar + 25 % adubação química + 25 % vermicomposto — apresentaram os melhores resultados integrados em solo e planta. Este estudo comprova que a mistura de biochar de moringa com vermicomposto revitaliza solos do semiárido, elevando sua fertilidade e estoques de carbono. A estratégia se mostra uma alternativa sustentável, impulsionando a segurança alimentar e energética na região.

**Palavras-chave:** Pirólise de biomassa; *Pennisetum purpureum* Schum; ciência de solo; gestão de resíduo; semiárido brasileiro; sequestro de carbono.

## ABSTRACT

This study evaluated the effects of applying moringa biochar (*Moringa oleifera* Lam.), either alone or in combination with vermicompost and mineral fertilization, on soil chemical properties, carbon stocks, and the productive and physiological performance of elephant grass BRS Capi   ( *Pennisetum purpureum* Schum.) grown in sandy soil of the Brazilian semi-arid region. The experiment was conducted in a greenhouse, using soil-filled columns and assessing ten treatments with different proportions of biochar, vermicompost, and chemical fertilization, in a completely randomized design with four replicates. The biochar was produced at 350  C, with pH = 9.42; %C = 66.6; and molar ratios H/C = 0.6 and O/C = 0.3. Soil physicochemical analyses and plant morphological, physiological, and nutritional evaluations were performed. The variables assessed included total carbon, labile carbon, and particulate organic matter (POM), macro- and micronutrients in soil and plants, as well as attributes such as leaf area, chlorophyll content, lignin, and cellulose. The main results showed that the combination of biochar with vermicompost significantly increased total organic carbon (up to +76%), labile carbon, and POM, as well as raised carbon management indices (IMCCL and IMCCOP). Treatments with higher proportions of biochar, such as 100% biochar, 75% biochar + 25% vermicompost, and 50% biochar + 50% vermicompost, presented the best results in terms of soil fertility, biomass accumulation, chlorophyll, lignin, and cellulose contents, and greater efficiency in nutrient uptake (N, K, Ca, and Mg) by the plants. Multivariate analyses (PCA, canonical correlation, and clustering) highlighted strong relationships between soil carbon accumulation and the plants' physiological and morphological performance. The treatment with 100% biochar was the most efficient for carbon sequestration, while balanced proportions — such as 33.4% biochar + 33.3% chemical fertilization + 33.3% vermicompost and 50% biochar + 25% chemical fertilization + 25% vermicompost — showed the best integrated results in soil and plant. This study demonstrates that mixing moringa biochar with vermicompost revitalizes semi-arid soils, enhancing their fertility and carbon stocks. This strategy proves to be a sustainable alternative, fostering food and energy security in the region.

**Keywords:** Biomass pyrolysis; *Pennisetum purpureum* Schum; soil science; waste management; Brazilian semiarid region; carbon sequestration.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localização da área experimental (casa de vegetação Nonato, Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró, RN, Brasil) e etapas do estudo. À esquerda, esquema da produção de biochar a partir de biomassa de *Moringa oleifera* (quebra manual, trituração elétrica e carbonização). Ao centro, ilustração dos insumos utilizados (biochar e vermicomposto) e sua aplicação em tratamentos com *Pennisetum purpureum* BRS Capiáçu cultivado em colunas de solo. À direita, vista geral da casa de vegetação onde o experimento foi conduzido. ....34
- Figura 2. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) de biochar de galhos, cascas e parte de caule de *Moringa* (*Moringa oleifera* Lam.) produzido a 350°C.....40
- Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura do mix de galhos, casca e caule de *Moringa* (*Moringa oleifera* Lam.) in natura (A) e biochar produzido a 350°C (B) nas ampliações de 100x e 1000x. ....41
- Figura 4. Análise de correlação de Pearson das características morfológicas, fisiológicas e nutricionais do capim-elefante BRS Capiáçu, e atributos químicos e orgânicos do solo. Legenda: PSF=peso seco da folha, PSC=peso seco da caule, PSR=peso seco da raiz; CR=comprimento d e raiz e FOLIAR=área foliar, ACU=açúcar, CLORA=clorofila A, CLORB=clorofila B, CEL=celulose, LIG= Lignina, NP =nitrogênio planta, PP=Fosforo planta, KP=potássio na planta, CaP = cálcio na planta, MgP = magnésio na planta; P=fosforo, K=potássio, Ca=cálcio, Mn=manganês, Zn= Zinco, COT = carbono orgânico total, CL=carbono lábil e MOP .....42
- Figura 5. Análise de componentes principais das características morfológicas, fisiológicas e nutricionais de capim-elefante BRS Capiáçu, e atributos químicos e orgânicos do solo em função de tratamentos com adubação orgânica (biochar e vermicomposto) e mineral em diferentes proporções. A. eixos componentes principais PC 1 e 2; B. eixos PC 3 e 4. Pontos em azuis destaca-se os tratamentos. ....43
- Figura 6. Dendograma hierárquico de cluster obtido usando o método de ligação completa para os tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). Legenda: T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto. ....46
- Figura 7. Produtividade da massa fresca e seca capim-elefante BRS Capiáçu submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação

química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto. ....48

Figura 8. Variáveis morfológica de capim-elefante BRS Capiáçu submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). Peso fresco (A) e seco de folha (B) (PFF e PSF), peso fresco caule (C) e peso seco caule (D) (PFC e PSC), peso fresco raiz (E) e peso seco raiz (F) (PFR e PSR), comprimento radicular (G) (CR), área foliar (H) (AF), altura planta (I) (AP) e diâmetro caule (J) (DC). T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto. ....49

Figura 9. Variáveis fisiológicas de capim-elefante BRS Capiáçu submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). Açúcares (A), clorofila a (B), clorofila b (C), clorofila total (D), celulose (E), hemicelulose (F), lignina (G). T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto. ....50

Figura 10. Variação do carbono orgânico total ( $\Delta C$ ) e frações lábeis em porcentagem, em relação a testemunha (T1= sem adução) e tratamento 100% de adubação mineral (T2) de um solo arenoso no semiárido submetido a adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto) sob diferentes proporções. Trat = tratamento. T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto. ....56

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Atributos químicos de um Plintossolo Argilúvico antes do início das sucessões de cultura, no distrito de Algoinha, município de Mossoró-RN, Brasil.....                                                                                       | 33 |
| Tabela 2. Tratamentos utilizados no experimento baseados na proporção dos tipos de adubos; adubação química, biochar de moringa a 350°C e adubo orgânico (vermicomposto). ....                                                                          | 35 |
| Tabela 3. Análise elementar e imediata do biochar de Moringa (Moringa oleifera Lam.) produzidos a 350°C. ....                                                                                                                                           | 38 |
| Tabela 4. Análises de correlação canônica com um nível de significância de $p \leq 0,05$ pelo teste de qui-quadrado entre os atributos orgânicos do solo e características morfológicas, fisiológicas e nutricionais do capim-elefante BRS Capiáu. .... | 45 |
| Tabela 5. Teores de macronutrientes na folha de capim-elefante BRS Capiáu submetidos a adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto) sob diferentes proporções. ....                                                                            | 51 |
| Tabela 6. Fertilidade de um solo arenoso no semiárido submetido a adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto) sob diferentes proporções. ....                                                                                                 | 53 |
| Tabela 7. Carbono orgânico total, lábil e particulado e índices de manejo de carbono em solo arenoso submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). ....                                  | 54 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**AF** – Área foliar

**AFOLIAR** – Área foliar (variável usada em análise estatística)

**ALT** – Altura da planta

**AM** – Adubação mineral

**CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

**CA** – Cálcio

**CaP** – Cálcio na planta

**CEL** – Celulose

**CL** – Carbono lábil

**CLORA** – Clorofila A

**CLORB** – Clorofila B

**CNPq** – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

**COP** – Carbono orgânico particulado

**COT** – Carbono orgânico total

**CR** – Comprimento de raiz

**Cu** – Cobre

**DAP** – Dias após o plantio

**DS** – Densidade do solo

**FDA** – Fibra em detergente ácido

**FDN** – Fibra em detergente neutro

**Fe** – Ferro

**GE** – Gestão do Conhecimento

**GI** – Gestão da Informação

**H+Al** – Acidez potencial

**IBI** – International Biochar Initiative

**IES** – Instituição de Ensino Superior

**IL** – Índice de labilidade

**IMCCL** – Índice de manejo de carbono com base na fração lábil

**IMCCOP** – Índice de manejo de carbono com base na fração particulada

**K** – Potássio

**K+** – Potássio trocável no solo

**KP** – Potássio na planta

**L** – Labilidade do carbono

**LDPE** – Low Density Polyethylene (Polietileno de baixa densidade)

**LIG** – Lignina

**MEV** – Microscopia eletrônica de varredura

**Mg** – Magnésio

**MgP** – Magnésio na planta

**Mn** – Manganês

**MOS** – Matéria orgânica do solo

**MOAM** – Matéria orgânica associada a minerais

**MSF** – Massa seca da folha

**MSC** – Massa seca do caule

**MSR** – Massa seca da raiz

**Na<sup>+</sup>** – Sódio

**NBR** – Norma Brasileira

**NP** – Nitrogênio na planta

**NT** – Nitrogênio total

**ODS** – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

**P** – Fósforo no solo

**PC1, PC2, etc.** – Componentes principais 1, 2, etc. (Análise multivariada)

**PCA** – Análise de Componentes Principais

**PP** – Fósforo na planta

**PSC** – Peso seco do caule

**PSF** – Peso seco da folha

**PSR** – Peso seco da raiz

**R** – Coeficiente de correlação

**SBGC** – Sociedade Brasileira de Gestão do Conhecimento

**SSA** – Área superficial específica

**T1 a T10** – Tratamentos experimentais

**TFSA** – Terra fina seca ao ar

**UI** – Unidade de Informação

**UV** – Ultravioleta

**Zn** – Zinco

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                                                         |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| RESUMO .....                                                                                                                                                                                            | 9                                    |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                                                                          | 10                                   |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                                                                                                                                  | 11                                   |
| LISTA DE TABELAS .....                                                                                                                                                                                  | 13                                   |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....                                                                                                                                                                    | 14                                   |
| SUMÁRIO.....                                                                                                                                                                                            | 16                                   |
| INTRODUÇÃO GERAL .....                                                                                                                                                                                  | 18                                   |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                                                                                                                       | 23                                   |
| RESUMO .....                                                                                                                                                                                            | 28                                   |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                                                                          | 29                                   |
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                                                                      | 30                                   |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                                                                                              | 31                                   |
| 2.1 Produção e caracterização do biochar de Moringa .....                                                                                                                                               | 31                                   |
| 2.2 Vermicomposto e caracterização do solo utilizado no experimento .....                                                                                                                               | 32                                   |
| 2.3 Implantação e condução do experimento.....                                                                                                                                                          | 33                                   |
| 2.4 Análises realizadas no solo e na planta.....                                                                                                                                                        | 35                                   |
| 2.5 Análises Estatísticas.....                                                                                                                                                                          | 37                                   |
| 3. RESULTADOS .....                                                                                                                                                                                     | 38                                   |
| 3.1 Características químicas, estruturais e micromorfológicas do Biochar de Moringa .....                                                                                                               | 38                                   |
| 3.2 Relações entre tratamentos com uso de biochar, adubação química e vermicomposto isolados ou combinados, e características morfológica, fisiológica e nutricional da planta e atributos do solo..... | 41                                   |
| <i>Correlação de Pearson</i> .....                                                                                                                                                                      | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| <i>Análises de componentes principais</i> .....                                                                                                                                                         | 43                                   |
| <i>Análise de correlação canônica</i> .....                                                                                                                                                             | 44                                   |
| <i>Análise de agrupamentos</i> .....                                                                                                                                                                    | 46                                   |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3 Análises univariadas da planta, do solo e desempenho das frações orgânicas e índices de manejo em função dos tratamentos ..... | 48 |
| 4. DISCUSSÃO .....                                                                                                                 | 56 |
| 5. CONCLUSÃO.....                                                                                                                  | 59 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                                                  | 61 |

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

## 17 INTRODUÇÃO GERAL

18 As regiões áridas e semiáridas do mundo estão distribuídas em todas as zonas climáticas,  
19 exceto na zona fria, abrangendo mais de 100 países e regiões, o que representam juntas 41 %  
20 da área terrestre e podem aumentar em até 38 % com o aumento da temperatura global (Jain *et al.*, 2024; Tariq *et al.*, 2024). No Brasil, a região semiárida representa 12 % do território  
21 brasileiro, e é constantemente desafiada pela baixa disponibilidade de água (precipitação anual  
22  $\leq 800$  mm) com chuvas de alta intensidade e curta duração durante os meses mais chuvosos,  
23 ventos fortes e alta evapotranspiração (Borges *et al.*, 2020). Estas condições climáticas  
24 extremas limitam a produção de biomassa vegetal, a cobertura do solo e as entradas de carbono  
25 (C) de biomassa vegetal ao solo, resultando em solos com elevado déficit de C (De Souza *et al.*, 2020).

28 Além disso, os solos em regiões áridas e semiáridas são frequentemente desprotegidos,  
29 pouco agregados e de textura arenosa, levando a um estado de fertilidade inerentemente baixo  
30 (da Silva *et al.*, 2023; Hag Husein *et al.*, 2021). Um dos fatores mais importantes que limitam  
31 a fertilidade do solo e a produção agrícola nestas áreas são os baixos teores de matéria orgânica  
32 do solo (MOS). Contudo, os compostos orgânicos em solos secos é biologicamente e  
33 quimicamente menos estável por apresentar rápida decomposição devido a combinação de  
34 fatores químicos e biológicos. Assim, converter resíduos orgânicos em biochar e posteriormente  
35 adicioná-lo ao solo apresenta-se como uma estratégia inovadora para aumentar o carbono  
36 orgânico do solo – COS (Azzi *et al.*, 2024; Bolan *et al.*, 2024).

37 O biochar é reconhecido pelo IPCC (2022) como uma estratégia vital para alcançar a  
38 neutralidade de carbono, devido à sua capacidade de remover e armazenar carbono  
39 duradouramente no solo. Além do sequestro de carbono, ele melhora a fertilidade do solo e  
40 reduz emissões de gases de efeito estufa na agricultura. Essa tecnologia é considerada essencial  
41 para compensar emissões residuais e ampliar os esforços de mitigação climática. Por esses  
42 motivos, o biochar consolida-se como uma solução promissora e de baixo risco para um futuro  
43 sustentável (Lehman *et al.*, 2010; Woolf *et al.*, 2021).

44 O biochar é um material carbonáceo sólido produzido por meio da pirólise de biomassa  
45 vegetal, em ambiente com baixa concentração ou ausência de oxigênio, resultando em um  
46 produto rico em carbono estável e funcional (Santos *et al.*, 2025; Senadheera *et al.*, 2025;  
47 Varkolu *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025). Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)  
48 da Organização das Nações Unidas têm estimulado a adoção de biomateriais inovadores com

foco na mitigação de impactos ambientais e climáticos, sequestro de carbono, aumento da fertilidade do solo e melhoria da produtividade agrícola.

Nesse contexto, o biochar se destaca como ferramenta estratégica, contribuindo diretamente para os ODS ambientais (13, 15 e 16), ao capturar carbono, melhorar a qualidade do solo e controlar a poluição hídrica. No eixo social, sua produção fortalece o desenvolvimento rural, combate à pobreza (ODS 1), eleva a segurança alimentar (ODS 2) e gera emprego (ODS 8). Em termos de governança, o uso do biochar requer práticas produtivas responsáveis (ODS 12), integração a políticas sustentáveis e fortalecimento de parcerias globais para viabilizar pesquisa, comercialização e créditos de carbono (ODS 17) (Senadheera *et al.*, 2025; Shoudho *et al.*, 2024).

O biochar se insere de forma estratégica na economia circular ao promover a redução, reutilização e reciclagem de resíduos orgânicos, agregando valor a materiais antes descartados (Chen *et al.*, 2024; Olugbenga *et al.*, 2024). Ao transformar resíduos em energia ou insumos agrícolas, por meio de tecnologias acessíveis e matérias-primas abundantes, o biochar viabiliza práticas sustentáveis de baixo custo, com alto potencial de aplicação em larga escala (Baaloudj *et al.*, 2025; Bano *et al.*, 2025). Além de seus benefícios ambientais e sociais, destaca-se também na economia, pois o mercado global de biochar tem apresentado forte expansão, com projeções de crescimento de US\$ 1,85 bilhão em 2021, para mais de US\$ 6,3 bilhões até 2031, impulsionado pela demanda por soluções renováveis e sustentáveis (Transparency Market Research, 2021; Zbair *et al.*, 2024).

O biochar, com seus múltiplos usos e gestão de resíduos eficiente e de baixo custo, rompe com o modelo linear de “extrair-produzir-descartar”, ao reintegrar resíduos orgânicos aos sistemas agrícolas. Essa abordagem fortalece a economia circular, contribui para metas globais de emissão líquida zero e promove o desenvolvimento sustentável em escala global (Singh; Goyal; Sinha, 2025).

Neste contexto, a temperatura é um fator importante na produção do biochar, pois biochar produzido a baixas temperaturas ( $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) preserva melhor o carbono e nutrientes essenciais como N, K e S, que tendem a se volatilizar em pirólise com temperaturas mais elevadas (Liu *et al.*, 2016; Muema *et al.*, 2024). Propriedades como alta capacidade de sorção, área superficial específica (SSA) elevada, conteúdos variados de nutrientes minerais (P, K, Ca, Mg), capacidade de troca catiônica (CTC), capacidade de troca aniônica (CTA) e pH são fatores cruciais que tornam o biochar uma escolha apropriada para diferentes tipos de solo, contribuindo para a estabilização do solo (Khan *et al.*, 2024; Lehmann; Joseph, 2015). Destaca-se ainda sua eficácia na melhoria da fertilidade, adsorção de metais pesados, disponibilização

de micronutrientes como  $\text{Cu}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  e modulação de atributos edáficos críticos, como o pH e o teor de COS (Khan *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2016; Waheed *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025).

Estudos recentes demonstram que o biochar também atua como mitigador dos efeitos da seca e impulsionador da produtividade agrícola ao melhorar a capacidade de retenção de água (CRA) dos solos, devido à sua estrutura porosa (Nicholas *et al.*, 2023; Shyam *et al.*, 2025; Videgain-Marco *et al.*, 2020). Essa capacidade hídrica, aliada ao impacto positivo na modificação de propriedades físicas e químicas do solo, justifica sua aplicação como corretivo (Videgain-Marco *et al.*, 2020). Além disso, o biochar contribui para o aumento da porosidade, retenção de umidade e estímulo à microbiota edáfica, elevando a produtividade e reduzindo a necessidade de insumos químicos (Liu *et al.*, 2021). Adicionalmente, seu uso tem se mostrado promissor na reabilitação de áreas degradadas, pela adsorção de contaminantes e recuperação da fertilidade (Zhang *et al.*, 2023), além de reduzir a densidade do solo, aumentar a aeração e favorecer o desenvolvimento radicular, o que se traduz em maior eficiência na absorção de nutrientes e maior rendimento agrícola (Cornelissen *et al.*, 2013; Idbella *et al.*, 2024; Schmidt *et al.*, 2014; Schulz; Dunst; Glaser, 2013; Suliman *et al.*, 2016).

A escolha do substrato para formação do biochar é extremamente importante, neste contexto, uma das opções é o uso da moringa (*Moringa oleifera* Lam), uma planta amplamente disponível no semiárido brasileiro, originária da Índia e da África. Como características dessa planta tem-se a resistência a longos períodos de seca, crescimento rápido e vigoroso e, também, tolerância à solos com pH entre 4,5 e 8, além de ter baixo custo de produção e capacidade de adaptação a solos degradados (Dhakad *et al.*, 2019; Gourai *et al.*, 2023). Por ter elevada produção de biomassa e alto teor de nutrientes nos tecidos, especialmente K, Ca, Mg, seu substrato quando pirolisado, mantém os nutrientes concentrados na estrutura do biochar, o que pode agregar valor agronômico à cultura (Soares *et al.*, 2019).

O biochar por ser um aditivo com muitas propriedades benéficas, conforme supracitado, pode ser eficaz mesmo em baixas concentrações (Ngo *et al.*, 2022), no entanto, há uma lacuna na literatura, especialmente na mistura do biochar de moringa com compostos biologicamente mais ativos e lábil, como o vermicomposto. Na literatura a mistura de biochar oriundo de diversas fontes e vermicompostos tem sido promissora. Resultados apresentados por (Castellini *et al.*, 2025) verificaram melhoria nas propriedades físicas do solo como redução da densidade e, aumento na permeabilidade e agregação em solos franco-arenosos. Outros estudos trazem benefícios nas propriedades químicas, bioquímicas e biológicas do solo melhorando também as características agronômicas de diversas culturas (Antileo-Mellado *et al.*, 2024, 2024; Carril *et al.*, 2024; Hasan *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024). Em gramíneas forrageiras, Hegab (2024)

demonstrou efeito positivo de biochar e vermicomposto aumentando a produtividade, conteúdo nutricional e eficiência de recuperação das plantas de *Panicum sp.*. Assim, o uso da combinação de biochar com vermicomposto apresenta um grande potencial e melhoria do solo com possibilidade no aumento da produção em diversas culturas, como na produção de culturas que têm potencial bioenergético.

As gramíneas perenes, como o capim-elefante, apresentam alto potencial para produção de bioenergia devido ao seu elevado rendimento de biomassa e à composição robusta de suas paredes celulares, ricas em lignina e celulose. Esses compostos, que conferem resistência estrutural à planta mesmo em condições de baixa umidade, são fundamentais para a pirólise, resultando em um biochar de alta qualidade com grande potencial de aplicação energética (Chandrasekaran *et al.*, 2013; Kou *et al.*, 2017; Poolakkalody; Thattantavide; Manisseri, 2023).

Entre as espécies de gramíneas tropicais, o capim elefante BRS Capiáçu (*Pennisetum purpureum* Schum) tem um potencial significativo como matéria-prima renovável para biocombustíveis em áreas tropicais e subtropicais porque é uma planta energética de rápido crescimento com uma elevada eficiência fotossintética, o que resulta numa capacidade significativa de acumulação de matéria seca, que muitas vezes excede 40 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em áreas tropicais (Oliveira *et al.*, 2022). Essa planta apresenta uma composição ideal para conversão termoquímica, com teores de celulose (32% a 45%), hemicelulose (20% a 32%) e lignina (17% a 32%), além de um baixo teor de cinzas (1% a 9%). Esses componentes, quando submetidos a processos como a pirólise, são decompostos gerando produtos energéticos como hidrocarbonetos (bio-óleo) e metano (syngas), o que a consolida como uma fonte potencial de bioenergia (Ahmad; Gabbar, 2024).

No Brasil, o capim elefante é uma cultura domesticada; entretanto, para atingir uma alta taxa de crescimento em ambientes não nativos, ainda são utilizadas quantidades consideráveis de nutrientes, sendo essencial a obtenção de uma avaliação adequada que promova seu desenvolvimento satisfatório (Danquah; Roberts; Appiah, 2018; Oliveira *et al.*, 2022). Sparrevik *et al* (2014) relataram os efeitos ambientais positivos do sequestro de carbono e os benefícios econômicos decorrentes do aumento da produção agrícola. Biederman *et al* (2014) relataram um aumento no rendimento das culturas de 45 a 250 %, quando o biochar é utilizado em planos de nutrição mineral em gramíneas.

Portanto, o uso do biochar de moringa pode ser potencializado na mistura com vermicomposto na produção do capim elefante, configurando uma estratégia promissora para semiárido, motivando esse estudo. Além disso, buscou-se compreender os efeitos dessa mistura

|

150 ou biochar isolado na melhoria das características químicas do solo, carbono orgânico total e  
151 frações lábeis, bem como características fisiológicas, agronômicas e produtivas do capim  
152 elefante BRS Capiacu (*Pennisetum purpureum* Schum), espécie de interesse para a produção  
153 de bioenergia.

## REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. S.; GABBAR, H. A. Exploring bioenergy potential and thermal behavior of Elephant grass cultivated with treated microalgae wastewater for advanced pyrolytic products. **Chemical Engineering Science**, v. 288, p. 119842, 2024.
- ANTILEO-MELLADO, S.; MUÑOZ, C.; SANCHEZ-HERNANDEZ, J. C.; GINEBRA, M.; SANDOVAL, M. Effect of Biochar on Vermicompost Production: Chemical, Biochemical, and Biological Properties. **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 615, 2024.
- AZZI, E. S.; LI, H.; CEDERLUND, H.; KARLTUN, E.; SUNDBERG, C. Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data. **Geoderma**, v. 441, p. 116761, 2024.
- BAALOU DJ, O.; CHIRON, S.; ZIZZAMIA, A. R.; TROTTA, V.; BUONO, D. D.; PUGLIA, D.; RALLINI, M.; BRIENZA, M. Efficient biochar regeneration for a circular economy: Removing emerging contaminants for sustainable water treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 705, p. 135730, 2025.
- BANO, A.; AZIZ, M. K.; PRASAD, B.; RAVI, R.; SHAH, M. P.; LINS, P. V. D. S.; MEILI, L.; PRASAD, K. S. The multifaceted power of biochar: A review on its role in pollution control, sustainable agriculture, and circular economy. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, v. 7, p. 286–304, 2025.
- BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202–214, 2013.
- BOLAN, S.; SHARMA, S.; MUKHERJEE, S.; KUMAR, M.; RAO, Ch. S.; NATARAJ, K. C.; SINGH, G.; VINU, A.; BHOWMIK, A.; SHARMA, H.; EL-NAGGAR, A.; CHANG, S. X.; HOU, D.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; SIDDIQUE, K. H. M.; ABBOTT, L. K.; KIRKHAM, M. B.; BOLAN, N. Biochar modulating soil biological health: A review. **Science of The Total Environment**, v. 914, p. 169585, 2024.
- BORGES, C. K.; DOS SANTOS, C. A. C.; CARNEIRO, R. G.; DA SILVA, L. L.; DE OLIVEIRA, G.; MARIANO, D.; SILVA, M. T.; DA SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G.; PEREZ-MARIN, A. M.; DE S. MEDEIROS, S. Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 8, p. 524, 2020.
- CARRIL, P.; BECAGLI, M.; CELLETTI, S.; FEDELI, R.; LOPPI, S.; CARDELLI, R. Biofertilization with Liquid Vermicompost-Activated Biochar Enhances Microbial Activity and Soil Properties. **Soil Systems**, v. 8, n. 2, p. 54, 2024.
- CASTELLINI, M.; BONDÌ, C.; LEOGRANDE, R.; GIGLIO, L.; VITTI, C.; MASTRANGELO, M.; BAGARELLO, V. Evaluating the Effects of Compost, Vermicompost, and Biochar on Physical Quality of Sandy-Loam Soils. **Applied Sciences**, v. 15, n. 6, p. 3392, 2025.

- 191 CHANDRASEKARAN, S. R.; HOPKE, P. K.; HURLBUT, A.; NEWTOWN, M.  
192 Characterization of Emissions from Grass Pellet Combustion. **Energy & Fuels**, v. 27, n. 9, p.  
193 5298–5306, 2013.
- 194 CHEN, B.; ZENG, H.; YANG, F.; YANG, Y.; QIAO, Z.; ZHAO, X.; WANG, L.; WU, F.  
195 Functional biochar as sustainable precursors to boost the anaerobic digestion of waste activated  
196 sludge from a circular economy perspective: a review. **Biochar**, v. 6, n. 1, p. 60, 2024.
- 197 CORNELISSEN, G.; MARTINSEN, V.; SHITUMBANUMA, V.; ALLING, V.;  
198 BREEDVELD, G.; RUTHERFORD, D.; SPARREVIK, M.; HALE, S.; OBIA, A.; MULDER,  
199 J. Biochar Effect on Maize Yield and Soil Characteristics in Five Conservation Farming Sites  
200 in Zambia. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 256–274, 2013.
- 201 DA SILVA, B. F.; DOS SANTOS RODRIGUES, R. Z.; HEISKANEN, J.; ABERA, T. A.;  
202 GASPARETTO, S. C.; BIASE, A. G.; BALLESTER, M. V. R.; DE MOURA, Y. M.; DE  
203 STEFANO PIEDADE, S. M.; DE OLIVEIRA SILVA, A. K. Evaluating the temporal patterns  
204 of land use and precipitation under desertification in the semi-arid region of Brazil. **Ecological**  
205 **Informatics**, v. 77, p. 102192, 2023.
- 206 DANQUAH, J. A.; ROBERTS, C. O.; APPIAH, M. Elephant Grass (*Pennisetum purpureum*):  
207 A Potential Source of Biomass for Power Generation in Ghana. **Current Journal of Applied**  
208 **Science and Technology**, v. 30, n. 6, p. 1–12, 2018.
- 209 DE SOUZA MEDEIROS, A.; MALTA FERREIRA MAIA, S.; DOS SANTOS, T. C.; DE  
210 ARAÚJO GOMES, T. C. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use  
211 change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 287,  
212 p. 106690, 2020.
- 213 DHAKAD, A. K.; IKRAM, M.; SHARMA, S.; KHAN, S.; PANDEY, V. V.; SINGH, A.  
214 Biological, nutritional, and therapeutic significance of *Moringa oleifera* Lam. **Phytotherapy**  
215 **Research**, v. 33, n. 11, p. 2870–2903, 2019.
- 216 GOURAI, M.; NAYAK, A. K.; NIAL, P. S.; SATPATHY, B.; BHUYAN, R.; SINGH, S. K.;  
217 SUBUDHI, U. Thermal plasma processing of *Moringa oleifera* biochars: adsorbents for  
218 fluoride removal from water. **RSC advances**, v. 13, n. 7, p. 4340–4350, 2023.
- 219 HAG HUSEIN, H.; LUCKE, B.; BÄUMLER, R.; SAHWAN, W. A Contribution to Soil  
220 Fertility Assessment for Arid and Semi-Arid Lands. **Soil Systems**, v. 5, n. 3, p. 42, 2021.
- 221 HASAN, A. K.; ISLAM, S. S.; JAHAN, M.; KHEYA, S. A.; UDDIN, Md. R.; ISLAM, Md.  
222 S.; KHOMPHEET, T. Synergistic Effects of Vermicompost and Biochar Amendments on Soil  
223 Fertility and Wheat Productivity in Bangladesh Floodplain Soils. **Scientifica**, v. 2024, n. 1, p.  
224 6624984, 2024.
- 225 HEGAB, R. Impact of Integrating between Mineral Nitrogen, Vermicompost and Biochar on  
226 Nitrogen-Use Efficiency and Productivity of Panicum Plants Grown on Sandy Soil. **Egyptian**  
227 **Journal of Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 0–0, 2024.

- IDBELLA, M.; BARONTI, S.; GIAGNONI, L.; RENELLA, G.; BECAGLI, M.; CARDELLI, R.; MAIENZA, A.; VACCARI, F. P.; BONANOMI, G. Long-term effects of biochar on soil chemistry, biochemistry, and microbiota: Results from a 10-year field vineyard experiment. **Applied Soil Ecology**, v. 195, p. 105217, 2024.
- JAIN, S.; SRIVASTAVA, A.; KHADKE, L.; CHATTERJEE, U.; ELBELTAGI, A. Global-scale water security and desertification management amidst climate change. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 49, p. 58720–58744, 2024.
- KHAN, Z.; ZHANG, K.; KHAN, M. N.; ZHU, K.; HU, L. Effects of biochar persistence on soil physiochemical properties, enzymatic activities, nutrient utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation. **European Journal of Agronomy**, v. 154, p. 127096, 2024.
- KOU, L.; SONG, Y.; ZHANG, X.; TAN, T. Comparison of four types of energy grasses as lignocellulosic feedstock for the production of bio-ethanol. **Bioresource Technology**, v. 241, p. 424–429, 2017.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (org.). Biochar for environmental management: an introduction. *In: Biochar for Environmental Management*. 0. ed. : Routledge, 2015. p. 33–46. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781134489534/chapters/10.4324/9780203762264-8>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- LI, J.; LIU, S.; XU, Y.; XU, C.; DENG, B.; CAO, H.; YUAN, Q. Optimizing biochar addition strategies in combined processes: Comprehensive assessment of earthworm growth, lignocellulose degradation and vermicompost quality. **Bioresource Technology**, v. 406, p. 131031, 2024.
- LIU, B.; LI, Hongliang; LI, Hongbo; ZHANG, A.; RENGEL, Z. Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 1, p. 257–268, 2021.
- LIU, P.; WANG, Q.; YAN, D.; FANG, W.; MAO, L.; WANG, D.; LI, Y.; OUYANG, C.; GUO, M.; CAO, A. Effects of Biochar Amendment on Chloropicrin Adsorption and Degradation in Soil. **Energies**, v. 9, n. 11, p. 869, 2016.
- MUEMA, F. M.; RICHARDSON, Y.; KEITA, A.; SAWADOGO, M. An interdisciplinary overview on biochar production engineering and its agronomic applications. **Biomass and Bioenergy**, v. 190, p. 107416, 2024.
- NGO, T.; SHAHSAVARI, E.; SHAH, K.; SURAPANENI, A.; BALL, A. S. Improving bioenergy production in anaerobic digestion systems utilising chicken manure via pyrolysed biochar additives: A review. **Fuel**, v. 316, p. 123374, 2022.
- NICHOLAS, H. L.; DEVINE, A.; ROBERTSON, I.; MABBETT, I. The Effect of Faecal Sludge Biochar on the Growth and Yield of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivar Micro-Tom. **Agronomy**, v. 13, n. 5, p. 1233, 2023.

- OLIVEIRA, L. E. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; SILVA, G. G. C.; BEZERRA, M. G. S.; MORAIS, É. G.; BEZERRA, G. F. R.; DANINO, G. S.; OLIVEIRA, E. M. M.; SÁ, F. V. S. Nitrogen and phosphorus fertilizer application to Elephant grass (*Cenchrus purpureus* syn. *Pennisetum purpureum*) cultivar ‘Cameroon’ in an arenosol in Rio Grande do Norte, Brazil. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 10, n. 3, p. 280–287, 2022.
- OLUGBENGA, O. S.; ADELEYE, P. G.; OLADIPUPO, S. B.; ADELEYE, A. T.; JOHN, K. I. Biomass-derived biochar in wastewater treatment-a circular economy approach. **Waste Management Bulletin**, v. 1, n. 4, p. 1–14, 2024.
- POOLAKKALODY, N. J.; THATTANTAVIDE, A.; MANISSERI, C. Evaluating the biofuel potential of perennial grass, *Pennisetum polystachion* based on aqueous 1-ethyl, 3-methylimidazolium acetate ([EMIM][Ac]) pretreatment. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 17, p. 15845–15859, 2023.
- SANTOS, D. C. B. D.; EVARISTO, R. B. W.; DUTRA, R. C.; SUAREZ, P. A. Z.; SILVEIRA, E. A.; GHESTI, G. F. Advancing Biochar Applications: A Review of Production Processes, Analytical Methods, Decision Criteria, and Pathways for Scalability and Certification. **Sustainability**, v. 17, n. 6, p. 2685, 2025.
- SCHMIDT, H.-P.; KAMMANN, C.; NIGGLI, C.; EVANGELOU, M. W. H.; MACKIE, K. A.; ABIVEN, S. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 191, p. 117–123, 2014.
- SCHULZ, H.; DUNST, G.; GLASER, B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 4, p. 817–827, 2013.
- SENADHEERA, S. S.; WITHANA, P. A.; YOU, S.; TSANG, D. C. W.; HWANG, S. Y.; OK, Y. S. Sustainable biochar: Market development and commercialization to achieve ESG goals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 217, p. 115744, 2025.
- SHOUDHO, K. N.; KHAN, T. H.; ARA, U. R.; KHAN, M. R.; SHAWON, Z. B. Z.; HOQUE, M. E. Biochar in global carbon cycle: Towards sustainable development goals. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 8, p. 100409, 2024.
- SHYAM, S.; AHMED, S.; JOSHI, S. J.; SARMA, H. Biochar as a Soil amendment: implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. **Discover Soil**, v. 2, n. 1, p. 18, 2025.
- SINGH, R.; GOYAL, A.; SINHA, S. Global insights into biochar: Production, sustainable applications, and market dynamics. **Biomass and Bioenergy**, v. 194, p. 107663, 2025.
- SOARES, T. F. S. N.; LIMA, I. D. S.; ALMEIDA, A. Q. D.; GONZAGA, M. I. D. S.; FIALHO, C. A.; GOMES, I. L. R.; MASSARANDUBA, W. D. M. Substrates Formulated with Biochar for Seedling Production of *Moringa oleifera* Lam. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 4, p. 515, 2019.

- SPARREVIK, M.; LINDHJEM, H.; ANDRIA, V.; FET, A. M.; CORNELISSEN, G. Environmental and Socioeconomic Impacts of Utilizing Waste for Biochar in Rural Areas in Indonesia—A Systems Perspective. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 9, p. 4664–4671, 2014.
- SULIMAN, W.; HARSH, J. B.; ABU-LAIL, N. I.; FORTUNA, A.-M.; DALLMEYER, I.; GARCIA-PEREZ, M. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. **Biomass and Bioenergy**, v. 84, p. 37–48, 2016.
- TARIQ, A.; SARDANS, J.; ZENG, F.; GRACIANO, C.; HUGHES, A. C.; FARRÉ-ARMENGOL, G.; PEÑUELAS, J. Impact of aridity rise and arid lands expansion on carbon-storing capacity, biodiversity loss, and ecosystem services. **Global Change Biology**, v. 30, n. 4, p. e17292, 2024.
- TRANSPARENCY MARKET RESEARCH. **Biochar Market to Surpass Valuation of US\$ 6.3 Bn By 2031; Associated Environmental Benefits to Fuel Market Growth, Notes Study by TMR**. PR Newswire: [s. n.], [s. d.].
- VARKOLU, M.; GUNDEKARI, S.; OMVESH; PALLA, V. C. S.; KUMAR, P.; BHATTACHARJEE, S.; VINODKUMAR, T. Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. **Catalysts**, v. 15, n. 3, p. 243, 2025.
- VIDEGAIN-MARCO, M.; MARCO-MONTORI, P.; MARTÍ-DALMAU, C.; JAIZME-VEGA, M. D. C.; MANYÀ-CERVELLÓ, J. J.; GARCÍA-RAMOS, F. J. Effects of Biochar Application in a Sorghum Crop under Greenhouse Conditions: Growth Parameters and Physicochemical Fertility. **Agronomy**, v. 10, n. 1, p. 104, 2020.
- WAHEED, A.; XU, H.; QIAO, X.; AILI, A.; YIREMAIKEBAYI, Y.; HAITAO, D.; MUHAMMAD, M. Biochar in sustainable agriculture and Climate Mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. **Biomass and Bioenergy**, v. 193, p. 107531, 2025.
- ZBAIR, M.; LIMOUSY, L.; DRANÉ, M.; RICHARD, C.; JUGE, M.; AEMIG, Q.; TRABLY, E.; ESCUDIÉ, R.; PEYRELASSE, C.; BENNICI, S. Integration of Digestate-Derived Biochar into the Anaerobic Digestion Process through Circular Economic and Environmental Approaches—A Review. **Materials**, v. 17, n. 14, p. 3527, 2024.
- ZHANG, C.; ZHAO, X.; LIANG, A.; LI, Y.; SONG, Q.; LI, X.; LI, D.; HOU, N. Insight into the soil aggregate-mediated restoration mechanism of degraded black soil via biochar addition: Emphasizing the driving role of core microbial communities and nutrient cycling. **Environmental Research**, v. 228, p. 115895, 2023.
- ZHU, Z.; ZHANG, Y.; TAO, W.; ZHANG, X.; XU, Z.; XU, C. The Biological Effects of Biochar on Soil's Physical and Chemical Characteristics: A Review. **Sustainability**, v. 17, n. 5, p. 2214, 2025.

**PRODUÇÃO DE BIOCHAR DE MORINGA E ASSOCIAÇÃO COM  
VERMICOMPOSTO: ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA FERTILIDADE DO  
SOLO, SEQUESTRO DE CARBONO E PRODUÇÃO DE CAPIM ELEFANTE PARA  
BIOENERGIA NO SEMIÁRIDO**

**RESUMO**

O estudo avaliou os efeitos da aplicação de biochar de *Moringa oleifera* Lam., isoladamente e em combinação com vermicomposto, sobre atributos químicos do solo, estoque de carbono e desempenho fisiológico e produtivo do capim-elefante BRS Capiacu (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivado em solo arenoso no semiárido brasileiro. O biochar foi produzido a 350 °C a partir de galhos, cascas e caules de moringa e apresentou características favoráveis, como elevado teor de carbono (66,6%), pH alcalino (9,42), baixa condutividade elétrica, estrutura porosa, além de índices atrelados à estabilidade: H/C = 0,6 e O/C = 0,3, enquadrando-se nos padrões de qualidade definidos pelo IBI/WBC (H/C < 0,7; O/C < 0,4). Foram testados dez tratamentos com diferentes proporções de adubação química, biochar e vermicomposto, em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Os resultados revelaram que a aplicação combinada de biochar e vermicomposto promoveu melhoria significativa nos atributos químicos do solo, especialmente no aumento do pH, teores de cálcio, magnésio, potássio, fósforo e carbono orgânico total, além das frações lábeis. Também foram observados ganhos relevantes no crescimento do capim-elefante e na produtividade, com destaques para produtividade da massa de matéria seca, com ganho de 30,8 % quando comparado com a adubação química convencional, área foliar, comprimento de raízes e teores de lignina e celulose, reforçando seu potencial bioenergético. A associação biochar-vermicomposto revelou-se uma alternativa eficiente e sustentável para a melhoria da fertilidade do solo e incremento da produção de biomassa, contribuindo com práticas agrícolas resilientes ao clima e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

**Palavras-chaves:** Agricultura sustentável, Manejo do carbono no solo, Propriedades físico-químicas do solo, Recuperação de solos degradados, Sequestro de carbono.

**PRODUCTION OF MORINGA BIOCHAR AND ITS ASSOCIATION WITH  
VERMICOMPOST: A SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR SOIL FERTILITY,  
CARBON SEQUESTRATION, AND ELEPHANT GRASS PRODUCTION FOR  
BIOENERGY IN THE SEMI-ARID REGION**

**ABSTRACT**

The study evaluated the effects of applying *Moringa oleifera* Lam. biochar, alone and in combination with vermicompost, on soil chemical properties, carbon stocks, and the physiological and productive performance of elephant grass BRS Capiáçu (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivated in sandy soil in the Brazilian semi-arid region. The biochar was produced at 350 °C from moringa branches, bark, and stems, and presented favorable characteristics such as high carbon content (66.6%), alkaline pH (9.42), low electrical conductivity, porous structure, and stability indices: H/C = 0.6 and O/C = 0.3, fitting the quality standards defined by IBI/WBC (H/C < 0.7; O/C < 0.4). Ten treatments with different proportions of chemical fertilization, biochar, and vermicompost were tested in a completely randomized design with four replications. The results showed that the combined application of biochar and vermicompost significantly improved soil chemical attributes, particularly increasing pH, calcium, magnesium, potassium, phosphorus, and total organic carbon, as well as labile fractions. Relevant gains were also observed in elephant grass growth and productivity, with emphasis on dry matter yield, which increased by 30.8% compared to conventional chemical fertilization, along with higher leaf area, root length, and lignin and cellulose contents, reinforcing its bioenergy potential. The biochar–vermicompost association proved to be an efficient and sustainable alternative for improving soil fertility and increasing biomass production, contributing to climate-resilient agricultural practices and the Sustainable Development Goals.

**Keywords:** Sustainable agriculture, Soil carbon management, Soil physicochemical properties, Degraded soil recovery, Carbon sequestration.

## 1. INTRODUÇÃO

No semiárido brasileiro, os solos arenosos impõem desafios agronômicos ainda mais críticos, intensificando as restrições ao uso agrícola. Sua textura grossa, baixa coesão entre partículas e ausência de estrutura agregada resultam em drenagem excessiva, incapacidade de reter água e nutrientes, e alta susceptibilidade à erosão eólica e hídrica. Essas características, somadas à irregularidade pluviométrica e a manejos inadequados, aceleram a degradação e comprometem severamente a produtividade e a sustentabilidade dos ecossistemas locais (Teixeira et al., 2017). Diante desse cenário, a adoção de práticas inovadoras e sustentáveis torna-se imperativa para reverter a desertificação e assegurar a segurança alimentar e energética regional.

O biochar, um material carbonáceo poroso produzido pela pirólise de biomassa residual em condições de baixo oxigênio, apresenta propriedades excepcionais para melhorar a qualidade dos solos do semiárido. Este material não apenas sequestra carbono de forma estável no solo - com estudos documentando aumentos de 20-40% nos teores de carbono orgânico -, mas também melhora significativamente a retenção de água em solos arenosos, com incrementos de 15-25% na capacidade de armazenamento hídrico. Sua aplicação demonstra aumentos de produtividade agrícola que variam de 10-30%, dependendo da cultura e das condições edafoclimáticas (Amalina et al., 2022; Bolan et al., 2024; Li et al., 2020; Tan et al., 2015). Estas propriedades, combinadas com sua capacidade de remediar solos degradados e mitigar emissões de gases de efeito estufa, posicionam o biochar como uma tecnologia multifuncional essencial para a agricultura sustentável em regiões semiáridas (Azzi et al., 2024; Bolan et al., 2024; Gao et al., 2024; Liu et al., 2024; Mei; Zhuang; Wang, 2025). Contudo, é fundamental ressaltar que as propriedades físico-químicas do biochar varia conforme a matéria-prima empregada e condições de pirólise como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência. Estudos recentes revelaram que o biochar produzido a baixas temperaturas (< 400 °C) preserva melhor o carbono e nutrientes essenciais como N, K e S, os quais tendem a volatilizar em pirólise mais intensa (Liu et al., 2016; Muema et al., 2024), portanto, a seleção adequada do substrato torna-se fator crucial para a qualidade do biochar.

A moringa (*Moringa oleifera* Lam.) destaca-se como uma alternativa promissora de substrato para biochar no semiárido brasileiro. Por ser uma espécie de crescimento rápido e vigoroso, resistente à seca e adaptável a solos degradados e ácidos, a moringa oferece alta produção de biomassa e acúmulo de nutrientes como Ca, K e Mg, que quando pirolisados, concentram ainda mais esses nutrientes na matriz do seu biochar, potencializando seu valor

agronômico e sua aplicabilidade em sistemas agrícolas sustentáveis (Da Rosa *et al.*, 2019; Gourai *et al.*, 2023; Soares *et al.*, 2019).

Na substituição de sistemas convencionais para sistemas agrícolas mais sustentáveis, a fertilização com vermicompostos tem sido utilizado com êxito no semiárido brasileiro. A ação eficaz na saúde e fertilidade do solo, facilidade de armazenamento, manuseio e aplicação no solo, tem incentivado o uso agrícola de vermicompostos pelos produtores rurais (Da Silva *et al.*, 2023; De Lavôr *et al.*, 2024). No entanto, há uma lacuna na literatura, acerca da mistura do biochar de moringa e o vermicomposto e seu o efeito no solo e na produção vegetal, sobretudo para as gramíneas forrageiras no semiárido brasileiro.

Por sua vez, o capim-elefante BRS Capiáu (*Pennisetum purpureum* Schum.) destaca-se entre as gramíneas forrageiras tropicais pelo elevado potencial como biomassa para bioenergia e etanol de primeira geração. Com rápido crescimento, alta eficiência fotossintética e acúmulo de até 40 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de matéria seca (Flores *et al.*, 2012), sua composição rica em celulose, hemicelulose e lignina o torna ideal para produção de biocombustíveis (Ahmad; Gabbar, 2024). No Brasil, embora domesticado, seu cultivo demanda suprimento nutricional adequado (Américo Glória *et al.*, 2020; Danquah; Roberts; Appiah, 2018).

Adicionalmente, o uso de biochar tem demonstrado efeitos positivos no sequestro de carbono e no aumento da produtividade agrícola (Sparrevik *et al.*, 2014), com ganhos de 45 % a 250 % em produtividade das culturas gramíneas quando associado à adubação mineral (Biederman; Harpole, 2013), porém nenhum registro no semiárido brasileiro, quando esse é associado ao vermicomposto. Assim, este estudo objetiva avaliar os efeitos do biochar isolado ou combinado ao vermicomposto e adubação química sobre atributos químicos do solo, carbono orgânico total e frações, fisiologia e produção do capim-elefante BRS Capiáu em solo arenoso na região semiárida.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Produção e caracterização do biochar de Moringa

O biochar foi produzido utilizando como matéria-prima resíduos de galhos, cascas e parte do caule, proveniente da poda da moringa (*Moringa oleifera* Lam.), coletadas em área pertencente ao Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA (5°12'11.0" S e 37°19'25.3" W. Após a coleta, com auxílio de um pincel, impurezas superficiais foram removidas e na sequência submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas.

O material seco em estufa foi fragmentado em pedaços menores com auxílio de um martelo e, em seguida submetido a trituração mecânica (tritador modelo SL-31, SOLAB) obtendo um material com granulometria média de 3 cm, o qual foi inserido em uma mufla (modelo Q318M, QUIMIS) para a condução da pirólise. O processo ocorreu sob atmosfera com baixa disponibilidade de oxigênio, com taxa de aquecimento de 1,7 °C por minuto até atingir a temperatura final de 350 °C, a qual foi mantida por um período de 1 hora. Após resfriamento natural, o biochar foi moído (moinho tipo Willey) e peneirado em malha de 2 mm (10 mesh). O rendimento do carvão vegetal foi determinado com base na diferença entre a massa de matéria seca inicial da biomassa e a massa de matéria seca de biochar produzido, conforme metodologia descrita no manual técnico da Puro earth (2022).

Na caracterização do biochar, foram realizados as seguintes análises: i) determinação do pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 M, conforme a metodologia descrita pela norma IBI (2015); ii) condutividade elétrica em água; iii) cinzas totais pelo método BGK, descrito por FCQAO (1994) e o ASTM D3174-11 (2012); iv) análise elementar via analisador CHNS/O 2400 Series II Perkin-Elmer, sendo o O obtido através:  $O = 100 - (C + H + N + \text{cinzas})$  e v) análise qualitativa de grupos funcionais presentes na estrutura do biochar por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) (modelo Carry 630, Agilent).

Além disso, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) (VEGA 3 LMU, Tescan) foi utilizada com o intuito de analisar as alterações na morfologia superficial da biomassa, comparando-se sua estrutura antes e após o processo de pirólise, realizado a uma temperatura de 350 °C. Essa avaliação teve como foco identificar mudanças na porosidade do material, evidenciando os efeitos do processo térmico sobre a estrutura do biochar. Para a análise, as amostras foram fixadas em suportes metálicos com fita condutiva de carbono (PELCO Tabs™, Ted Pella, Inc., Redding, CA, EUA) e recobertas com uma fina camada de ouro, de aproximadamente 9 nm de espessura, por meio de um pulverizador Q150R ES (Quorum Technologies Ltd., Laughton, East Sussex, Inglaterra).

## 2.2 Vermicomposto e solo utilizado no experimento

Com objetivo de simular a realidade dos agricultores da região semiárida, optou-se por vermicompostos (humus de minhoca) provenientes de pequenos agricultores rurais, no qual utilizaram resíduos vegetais e animais (folhas de diversas plantas + esterco bovino) submetidos a vermicompostagem por matrizes de minhoca vermelha da Califórnia (*Eisenia foetida*). Após a digestão níttrica em forno micro-ondas (MARST™ CEM Corporation) do vermicomposto foram obtidos os seguintes teores elementares: P: 0,29±0,06; K: 3,2±0,8; Ca: 5,42±0,6; Mg:

0,74±0,09 em g kg<sup>-1</sup> e Cu: 1,10±0,04; Fe: 143,3±24,3; Mn: 29,6±2,4 e Zn: 9,8±2,5 em mg kg<sup>-1</sup> de acordo com a metodologia de Silva (2009). Além disso, foi analisado o pH<sub>água</sub> = 7,0; nitrogênio total (NT): 16,0±2,7 dag kg<sup>-1</sup> e carbono orgânico total (COT): 56,0±8,2 dag kg<sup>-1</sup>, de acordo com as metodologias de Silva (2009) e Yeomans e Bremner (1988), respectivamente.

A coleta de solo para a instalação do experimento foi realizada no Campus leste da UFRSA no município de Mossoró-RN. O solo foi classificado segundo Sistema Brasileiro de classificação do solo como Plintossolo Argilúvico Eutrófico arênico a moderado, atividade da fração argila baixa (Burt, 2014; Santos et al., 2018; WRB, 2015). As características químicas e físicas do solo encontram-se na Tabela 1.

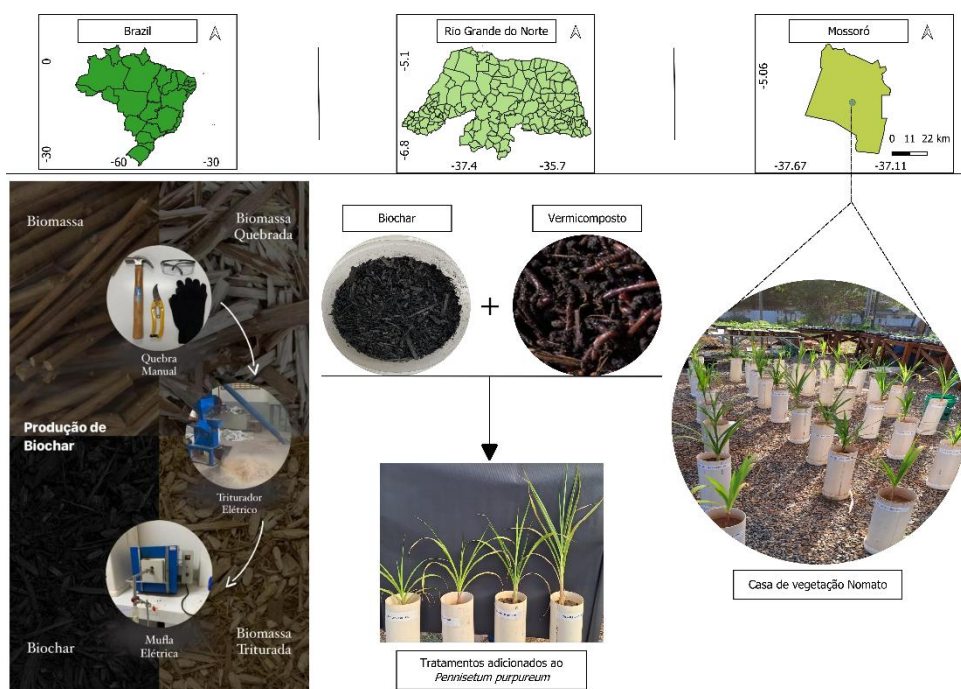
**Tabela 1.** Atributos químicos de um Plintossolo Argilúvico antes do início do cultivo de capim-elefante distrito de Algoíinha, município de Mossoró-RN, Brasil

| Camada | NT                                 | pH       | CE                               | MOS                  | P                                 | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup>             | Ca <sup>+2</sup> | Mg <sup>+2</sup>                              | H+Al                      |
|--------|------------------------------------|----------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|
|        | g kg <sup>-1</sup>                 |          | dSm <sup>-1</sup>                | dag kg <sup>-1</sup> | mg dm <sup>-3</sup>               |                |                             |                  | -----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- |                           |
| 0-20cm | 0,12±0,02*                         | 6,6±0,12 | 13,3±0,9                         | 0,2±0,03             | 7,3±0,33                          | 0,12±0,01      | 0,0                         | 1,10±0,05        | 0,57±0,03                                     | 0,67±0,14                 |
|        | Areia grossa<br>g kg <sup>-1</sup> |          | Areia fina<br>g kg <sup>-1</sup> |                      | Areia total<br>g kg <sup>-1</sup> |                | Silte<br>g kg <sup>-1</sup> |                  | Argila<br>g kg <sup>-1</sup>                  | DS<br>kg dm <sup>-3</sup> |
| 0-20cm | 552                                |          | 317                              |                      | 869                               |                | 53                          |                  | 78                                            | 1,6                       |

\*Os valores representam médias ± erro padrão de quatro replicações independentes (n = 4). NT = nitrogênio (método de Kjeldahl). pH = potencial de hidrogênio (água), CE = condutividade elétrica (água). MOS = matéria orgânica do solo (Yeomans e Bremner, 1988). P, Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> = fósforo, sódio e potássio extraídos usando Mehlich 1 (colorimetria e fotometria de chama, respectivamente). Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> = cálcio e magnésio extraídos com 1 M KCl pH 7,0 (absorção atômica); (H+Al) = acidez potencial extraída usando 0,5 M CaOAc pH 7,0 (titulação). DS = densidade do solo Textura (método da pipeta). DS Todas as análises foram de acordo com Teixeira et al. (2017).

### 2.3 Implantação e condução do experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação da UFRSA em Mossoró no estado do Rio Grande do Norte, Brasil (Figura 1). A região apresenta clima classificado como semiárido quente, segundo Köppen (BSH), caracterizado por temperatura média anual de 27 °C, umidade relativa do ar em torno de 68,9 % e precipitação média anual de 794 mm, concentrada entre os meses de fevereiro a maio, com distribuição pluviométrica bastante irregular (Alvares *et al.*, 2013).



**Figura 1.** Localização da área experimental (casa de vegetação Nonato, Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró, RN, Brasil) e etapas do estudo. À esquerda, esquema da produção de biochar a partir de biomassa de Moringa oleifera (quebra manual, trituração elétrica e carbonização). Ao centro, ilustração dos insumos utilizados (biochar e vermicomposto) e sua aplicação em tratamentos com *Pennisetum purpureum* BRS Capiacu cultivado em colunas de solo. À direita, vista geral da casa de vegetação onde o experimento foi conduzido.

O experimento foi conduzido em colunas de PVC com 50 cm de altura e 150 mm de diâmetro interno. Cada coluna foi preenchida com 8 kg de solo passado em peneira de 2,0 mm, resultando em uma densidade de  $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ . Antes da instalação dos tratamentos, adicionou-se 1,22 g de gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) por coluna para suprir a demanda de cálcio da cultura. As doses de biochar e vermicomposto foram calculadas com base no teor de carbono orgânico de cada insumo, com o objetivo de elevar o teor de carbono orgânico do solo de aproximadamente X% para Y%. Para o tratamento de 100% da dose, utilizou-se 47,5 g de biochar e 54 g de vermicomposto por coluna. Essas massas equivalem a  $26,4 \text{ t ha}^{-1}$  e  $30,6 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente, convertidas com base na área da seção transversal da coluna ( $0,0177 \text{ m}^2$ ).

A adubação química na dose de 100 % variou de acordo com os elementos: N: 4 g de uréia; P: 10 g superfosfato simples; K: 1,56 g cloreto de potássio; Mg: 1 g sulfato de magnésio, recomendados de acordo com a necessidade do capim elefante de acordo com (Cantarutti *et al.*, 1999). O nitrogênio foi parcelado em cinco vezes e o potássio 2 vezes ao longo do ciclo da cultura. Para preenchimento da coluna adicionou-se 20 com solo homogeneizado com as

adubações químicas, posteriormente, o restante dos 25 cm da coluna preenchidas com solo homogeneizado com adubação orgânicas. e o biochar. Os primeiros 5 cm da coluna não foram preenchidos com solo, para facilitar a irrigação manual. Os tratamentos foram baseados nas proporções de adubação para cada tratamento, sendo descritos na Tabela 2. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições.

**Tabela 2.** Tratamentos utilizados no experimento baseados na proporção de fertilizantes minerais, biochar de moringa a 350°C e adubo orgânico (vermicomposto)

| Tratamentos | Adubação mineral | Biochar                          | Vermicomposto |
|-------------|------------------|----------------------------------|---------------|
|             |                  | %                                |               |
| T1          | 0                | 0                                | 0             |
| T2          | 100              | 0                                | 0             |
| T3          | 75               | 25 (6,6 ton/ha <sup>-1</sup> )   | 0             |
| T4          | 25               | 50 (13,2 ton/ha <sup>-1</sup> )  | 25            |
| T5          | 33               | 25 (6,6 ton/ha <sup>-1</sup> )   | 33            |
| T6          | 25               | 50 (13,2 ton/ha <sup>-1</sup> )  | 25            |
| T7          | 25               | 25 (6,6 ton/ha <sup>-1</sup> )   | 50            |
| T8          | 0                | 100 (26,4 ton/ha <sup>-1</sup> ) | 0             |
| T9          | 0                | 50 (13,2 ton/ha <sup>-1</sup> )  | 50            |
| T10         | 0                | 75 (19,8, ton/ha <sup>-1</sup> ) | 25            |

T=tratamentos, ton ha<sup>-1</sup>= toneladas por hectare.

O plantio dos colmos de capim elefante BRS Capiáçu (*Pennisetum purpureum* Schum) foi realizado com a inserção de dois colmos, nos primeiros 5 cm da coluna, e ocorreu em 03 de setembro de 2024. A irrigação foi realizada manualmente a cada 3 dias, com a aplicação de 100 mL de água por coluna. Com o desenvolvimento vegetativo (60 dias), a dosagem da irrigação passou para 150 mL por coluna a cada 2 dias, permanecendo esse volume até o final do ciclo experimental (117 dias).

#### 2.4 Análises de solo e planta

Após 117 dias do plantio (DAP), procedeu-se a colheita da planta inteira e análises dos primeiros 20 cm do solo. Para análises químicas, as amostras de solo foram secas, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm (Terra fina seca ao ar-TFSA). Para análises de carbono orgânico total e carbono lábil, subamostras de TFSA foram trituradas e passadas em peneira de 0,210 mm (60 mesh). As características químicas do solo analisados foram: pH em água; condutividade elétrica (CE) no extrato saturado com água; Cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>) trocáveis foram extraídos com extrator cloreto de potássio e quantificados por absorção atômica; Fósforo (P), sódio (Na<sup>+</sup>), potássio (K<sup>+</sup>) e micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) extraídos

com extrator Mehlich<sup>-1</sup>, e quantificados por colorimetria para P, Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> por fotometria de chama, e micronutrientes por absorção atômica. Todas as análises realizadas de acordo com (Teixeira et al., 2017).

O COT foi determinado pelo método de oxidação por via úmida, com aquecimento externo em dicromato de potássio em meio ácido, e titulação com sulfato ferroso amoniacal (Yeomans; Bremner, 1988). O carbono lábil (CL) oxidado por permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub> - 0,033 mol L<sup>-1</sup>) foi determinado em 1,0 g das amostras de solo, que após agitação com 25 mL da solução KMnO<sub>4</sub>, foram centrifugadas e, realizadas as dosagens no sobrenadante. A quantificação foi realizada em espectrofotômetro usando o comprimento de onda de 565 nm, de acordo com a metodologia de Shang e Tiessen (1997). Para obtenção do carbono na matéria orgânica particulado (COP) (>53 µm) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) (<53 µm), foi utilizado o método de extração com hexametáfosfato de sódio e o peneiramento úmido (Cambardella; Elliott, 1992; Gao *et al.*, 2024). De acordo com as modificações no COT e CL da testemunha em relação aos demais tratamentos, foram calculados a labilidade do carbono (L), índice de labilidade do carbono (IL), índice de reserva de carbono (CPI) e o índice de manejo de carbono (IMCCL) (Blair et al., 1995). De forma análoga também foi calculado o índice de manejo de carbono (IMCCOP) baseado no carbono lábil utilizando as equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente:

$$Labilidade (L) = \frac{CL}{(COS - CL)} \quad (1)$$

$$\text{Índice de labilidade do carbono (IL)} = \frac{L_{tratamento}}{L_{testemunha}} \quad (2)$$

$$\text{Índice do compartimento de carbono (ICC)} = \frac{COS_{tratamento}}{COS_{testemunha}} \quad (3)$$

$$\text{Índice do manejo de carbono (IMC)} = ICC \times IL \times 100 \quad (4)$$

Além disso, foram realizadas coletas do capim-elefante BRS Capiacu para a avaliação do desempenho morfofisiológico. As plantas foram separadas em folhas, caules e raízes, e pesada em balança analítica para determinar a massa fresca foliar (MFF; g), do caule (MFC; g) e da raiz (MFR; g). A área foliar (AF) foi mensurada utilizando-se um medidor eletrônico de área foliar modelo LI-3100 (LI-COR Biosciences), com os resultados expressos em centímetros

quadrados (cm<sup>2</sup>). Para o comprimento das raízes (cm) utilizou-se a trena. Posteriormente, esses materiais foram colocados em estufa de circulação de ar a 65 °C por três dias e pesadas, obtendo-se massa de matéria seca da folha (MSF; g), caule (MSC; g) e raiz (MSR; g). A produtividade de capim-elefante foi calculada para a massa fresca e a massa seca, considerando toda a biomassa aérea produzida (folhas e caules) em cada tratamento. Os valores obtidos foram primeiramente determinados com base na área da coluna (0,0176 m<sup>2</sup>) e, em seguida, convertidos para toneladas por hectare (ton ha<sup>-1</sup>).

Para análise química das folhas das plantas, amostra de cada tratamento e repetição, foram triturados em moinho tipo Willey, passadas em peneira de 2 mm e submetidos a digestão nítrica em forno micro-ondas, para determinar os teores de Na, K, P, Ca e Mg de acordo com metodologia da Da Silva (2009). Os teores de clorofila foram extraídos pela maceração de 0,5 g de folhas em pilão adicionando a solução de acetona (80 %). A absorção dos extratos nos comprimentos de onda de 470 nm, 645 nm e 663 nm foi medida com espectrofotômetro, de acordo com o método descrito por Wellburn (1994), sendo os resultados de clorofila a e clorofila b expressos em mg g<sup>-1</sup> de massa de matéria fresca. A quantificação dos açúcares totais (AT) foi realizada conforme o método modificado de Dubois et al (1956), baseado na desidratação térmica dos monossacarídeos em meio ácido.

Os teores de celulose, hemicelulose e lignina foram determinados segundo o método gravimétrico de Van Soest et al (1991), que permite a separação sequencial das frações fibrosas por solubilidade diferencial em detergentes neutro e ácido. A fibra em detergente neutro (FDN) representa a fração insolúvel em detergente neutro, enquanto a fibra em detergente ácido (FDA) corresponde aos componentes não solúveis em meio ácido. A lignina em detergente ácido (LDA) foi obtida como o resíduo final após extração da FDA. A celulose foi calculada pela diferença entre FDA e LDA, e a hemicelulose, pela subtração entre FDN e FDA. A variação nos teores de carbono ( $\Delta C$ ) expresso em percentagem foi calculado usando a equação:  $\Delta C = (C_{\text{trat}(2-10)} - C_{\text{trat1}}) / C_{\text{trat1}} \times 100$ . Valores positivos e negativos indicam ganhos ou perda de C, respectivamente. Os dados foram expressos em média  $\pm$  erro padrão da média.

## 2.5 Análises Estatísticas

Para detecção de relações entre as variáveis, os dados foram submetidos a estatística multivariada, aplicando-se correlação de Pearson a Análise de Componentes Principais (PCA) e análise de correlação canônica. Nas análises dos subconjuntos homogêneos visando a similaridades e dissimilaridades entre os tratamentos utilizou-se a Análise de Agrupamento Hierárquico (Hierarchical Cluster Analysis – HCA). E por fim, realizada a ANOVA e com

detecção de diferenças significativas, aplicou-se o teste de Skott Knott a 5 % de probabilidade. A análises multivariadas (PCA, CCA e correlação) utilizaram o software R, e a ANOVA e Skott Knott o software SAEG (Ribeiro Júnior; Melo, 2008).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Características químicas, estruturais e micromorfológicas do Biochar de Moringa

A análise elementar do biochar de Moringa revelou alto conteúdo de carbono total (66,6 %), valor considerado elevado para biochars produzidos a temperaturas moderadas (350 °C), o que indica eficiência na pirólise e potencial de recalcitrância do material no solo. Os conteúdos de nitrogênio (0,69 %) e enxofre (0,54 %) é relevante, considerando que biochars geralmente apresentam baixa concentração desses elementos (Tabela 3). Esse teor de N, derivado de tecidos lignocelulósicos da moringa, pode contribuir para o aporte gradual de nitrogênio ao solo, atuando como fonte de liberação lenta. Vale salientar que esses resultados estão dentro do esperado para biochars produzidos a 350°C.

**Tabela 3.** Análise elementar e imediata do biochar de Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) produzidos a 350°C

| C            | H           | N            | S             | O            | H/C                 | O/C | (O+N)/C | H/C <sub>Org</sub> | pH          | CE           | Cinzas      | Rend         |
|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|---------------------|-----|---------|--------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| %            |             |              |               |              |                     |     |         |                    |             |              |             |              |
|              |             |              |               |              | μS cm <sup>-1</sup> |     |         |                    |             |              |             |              |
|              |             |              |               |              | %                   |     |         |                    |             |              |             |              |
| 66,6±<br>2,3 | 3,7±<br>0,5 | 0,69±<br>0,1 | 0,54±<br>0,05 | 27,1±<br>3,1 | 0,66                | 0,3 | 0,31    | 0,72               | 9,4±<br>0,1 | 438±<br>31,2 | 1,3±<br>0,2 | 39,8±<br>3,5 |

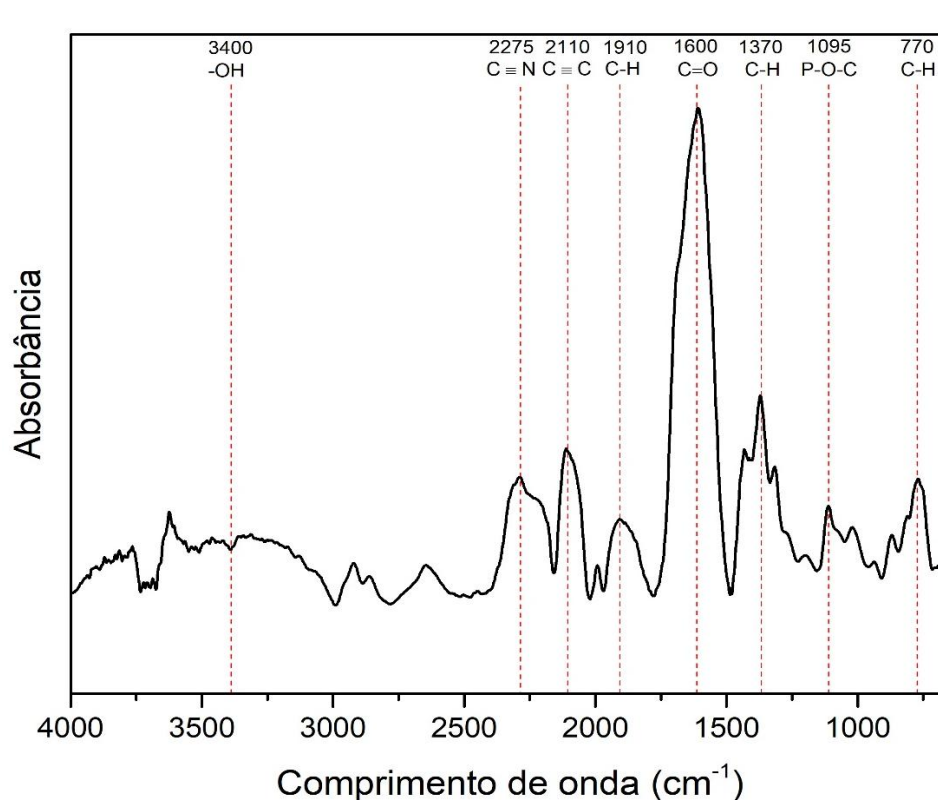
Os valores representam médias ± erro padrão de quatro replicações independentes (n = 4). C=Carbono elementar, H=hidrogênio elementar, N=nitrogênio elementar, S=enxofre elementar, O=oxigênio elementar, H/C=índice de aromaticidade, O/C=índice de hidrofilicidade, (O+N)/C=índice de polaridade, H/C<sub>Org</sub>= Relação hidrogênio carbono orgânico, pH=potencial de hidrogênio, CE=condutividade, Rend=Rendimento.

O índice H/C de 0,662 reflete um grau intermediário de aromaticidade e, estrutura parcialmente condensada, característica típica de pirólise entre 300 e 400 °C. A razão H/C<sub>Org</sub>, calculada em 0,72, reforça esse comportamento intermediário, indicando uma estrutura orgânica, com presença de cadeias alifáticas e grupos funcionais que conferem maior reatividade superficial ao material. O índice O/C de 0,305 indica uma moderada hidrofilicidade, o que favorece retenção de água e adsorção de nutrientes. O índice de polaridade ((O+N) /C = 0,314) reforça essa interpretação, sinalizando presença de grupos funcionais oxigenados, que potencializam a troca catiônica e o estímulo à atividade microbiana edáfica.

O biochar apresentou pH alcalino (9,42), típico de materiais carbonizados lenhosos e condutividade elétrica baixa (438 μS cm<sup>-1</sup>) indica presença pouco sais solúveis, porém em

níveis adequados para uso agrícola, sem risco imediato de salinização. O teor de cinzas (1,3 %) é considerado baixo, sugerindo preservação da matriz orgânica e ausência de resíduos minerais excessivos. Por fim, o rendimento de pirólise de 39,8 % indica uma eficiência produtiva elevada para biomassa vegetal, tornando este biochar viável economicamente para aplicação em larga escala. Resultados coerentes que podem ser observados nos trabalhos de Lataf et al. (2022) e Safarian, (2023).

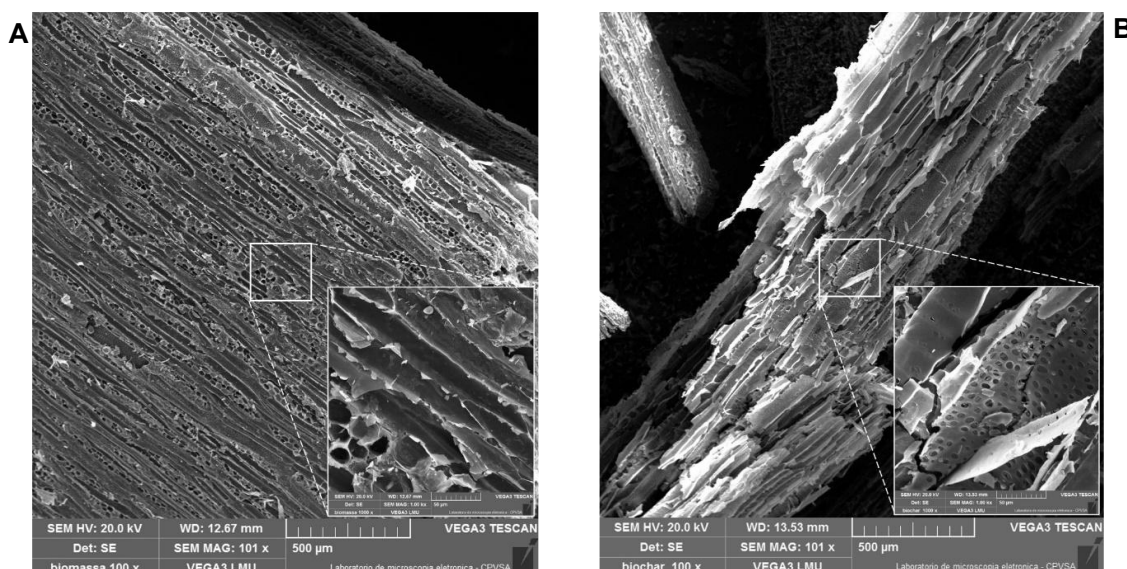
O espectro de FTIR do biochar de moringa produzido a 350 °C (Figura 2) revelou a presença de diversas bandas características associadas a grupos funcionais orgânicos residuais, como também grupamentos aromáticos. Observou-se uma banda larga em torno de 3400 cm<sup>-1</sup>, atribuída à vibração de estiramento da ligação O–H de hidroxilas, possivelmente oriundas de fenóis ou álcoois. Picos em 2275 cm<sup>-1</sup> e 2110 cm<sup>-1</sup> indicam possíveis ligações C≡C ou C≡N, relacionadas a compostos insaturados ou nitrilas. Uma banda de menor intensidade em 1910 cm, referente as ligações C-H de compostos aromáticos. A banda intensa observada em 1600 cm<sup>-1</sup>, pode ser associada ao estiramento C=O de grupos carboxílicos dos compostos lignocelulósicos remanescentes, enquanto o sinal em 1370 cm<sup>-1</sup> pode estar relacionado a deformações C–H de grupos metila. A presença de uma banda em 1095 cm<sup>-1</sup> é atribuída à interação de fosfato, oxigênio e carbono, primeiro na vibração do estiramento P–O–C. Já a banda em 770 cm<sup>-1</sup> pode indicar a presença de ligações fora do plano de anéis aromáticos.



**Figura 2.** Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) de biochar de galhos, cascas e parte de caule de Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) produzido a 350°C.

Com base nas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresentadas na Figura 3, foram analisadas as características micromorfológicas da biomassa de moringa in natura (A) e do biochar produzido a 350 °C (B) nas ampliações de 100x e 1000x.

Na primeira imagem (Figura 3A), observa-se uma estrutura morfolologicamente organizada, típica de tecidos vegetais lenhosos. É possível identificar a presença de canais e poros naturais, os quais correspondem às estruturas condutoras de seiva, responsáveis pelo transporte de água e nutrientes.

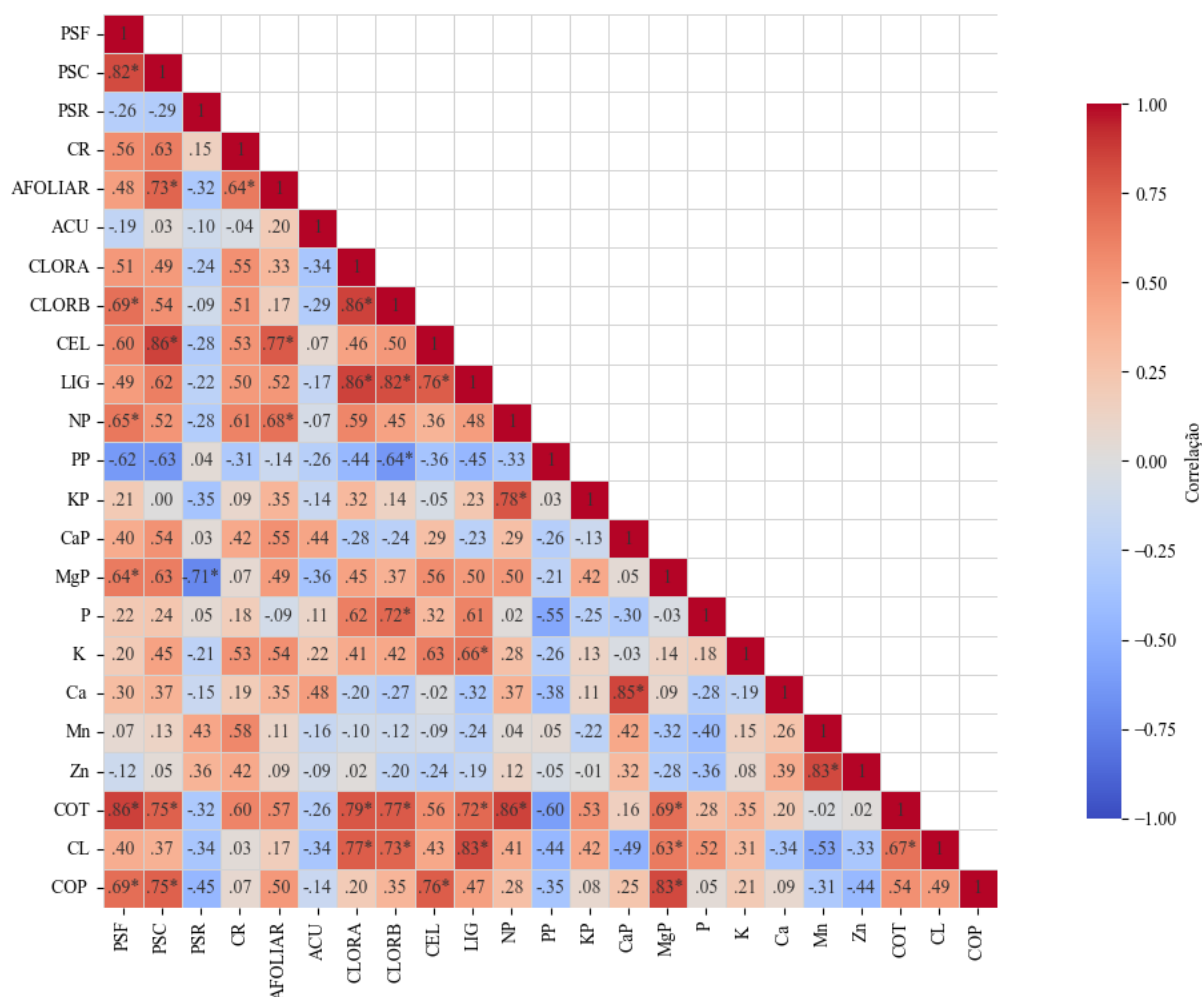


**Figura 3.** Microscopia eletrônica de varredura do mix de galhos, casca e caule de Moringa (Moringa oleifera Lam.) in natura (A) e biochar produzido a 350°C (B) nas ampliações de 100x e 1000x.

Os poros observados são uniformemente distribuídos e seguem um padrão alinhado, o que evidencia a integridade da estrutura celular vegetal antes do processo de pirólise. Na segunda imagem (Figura 3B), após o processo de pirólise, é possível observar modificações morfológicas significativas em relação à biomassa original. A estrutura carbonizada apresenta maior desorganização superficial, com evidências claras de colapsos celulares, fissuras e fragmentações resultantes da decomposição térmica dos constituintes orgânicos durante a pirólise.

**3.2** Relações entre tratamentos com uso de biochar, adubação química e vermicomposto isolados ou combinados, e características morfológica, fisiológica e nutricional da planta e atributos do solo

Por ter multicolinearidade em partes dos dados, houve uma redução de 36 para 23 variáveis na análise de correção de Pearson e dos componentes principais (PCA). Com base na matriz de correlação de Pearson fornecida, destaca-se um conjunto de correlações fortes ( $r > 0,70$ ) entre atributos morfológicos, fisiológicos, nutricionais e químicos, revelando sinergias relevantes no sistema solo-planta sob diferentes manejos em solo arenoso (Figura 4). Tais associações são indicativas de processos biogeoquímicos interdependentes, impulsionados pelo uso de bioinsumos como biochar e vermicomposto.



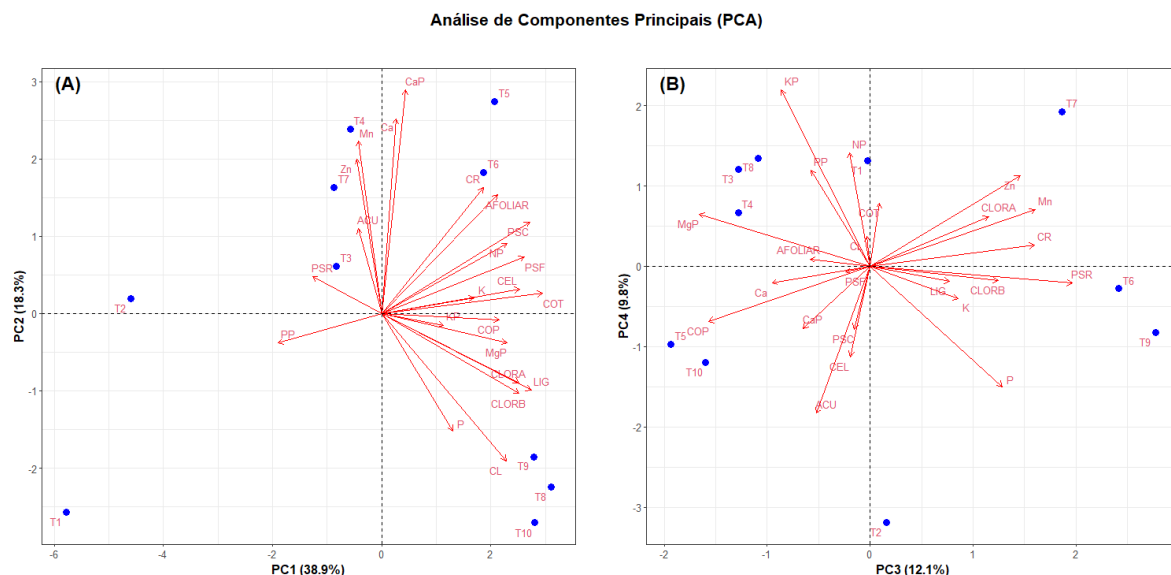
**Figura 4.** Análise de correlação de Pearson das características morfológicas, fisiológicas e nutricionais do capim-elefante BRS Capiacu, e atributos químicos e orgânicos do solo. Legenda: PSF=peso seco da folha, PSC=peso seco da caule, PSR=peso seco da raiz; CR=comprimento d e raiz e FOLIAR=área foliar, ACU=açúcar, CLORA=clorofila A, CLORB=clorofila B, CEL=celulose, LIG= Lignina, NP =nitrogênio planta, PP=Fosforo planta, KP=potássio na planta, CaP = cálcio na planta, MgP = magnésio na planta; P=fosforo, K=potássio, Ca=cálcio, Mn=manganês, Zn= Zinco, COT = carbono orgânico total, CL=carbono lábil e MOP

Entre os principais resultados, a variável PSC (peso seco do caule) apresentou alta correlação positiva com PSF (Peso seco folha) ( $r = 0,82$ ), Area foliar (AFOLIAR,  $r = 0,73$ ); celulose (CEL,  $r=0,86$ ) evidenciando a contribuição da biomassa como indicadora da performance produtiva da planta. Já a celulose (CEL) mostrou forte correlação com área foliar (AFOLIAR,  $r = 0,77$ ), lignina (LIG,  $r = 0,76$ ) e COP (carbono orgânico particulado) ( $r = 0,76$ ). No caso da lignina, correlacionou-se com carbono orgânico total (COT,  $r = 0,72$ ) e carbono lábil (CL,  $r=0,83$ ) e clorofilas indicando que o acúmulo de parede celular vegetal está associado ao aumento da matéria orgânica no solo.

Entre os atributos químicos, o carbono orgânico total (COT) teve forte associação com PSC ( $r = 0,75$ ), PSF ( $r = 0,86\%$ ), clorofilas (CLORA e CLORB  $r = 0,79$  e  $0,77$ , respectivamente), nitrogênio na planta (NP,  $r = 0,86$ ), e carbono lábil (CL,  $r = 0,67$ ) demonstrando que o enriquecimento do solo com carbono está fortemente ligado à fisiologia vegetal e à deposição de resíduos lignocelulósicos. A CLORA e CLORB também se associou ao CL ( $r = 0,77$  e  $0,73$ , respectivamente), reforçando que o metabolismo foliar ativo contribui para a ciclagem de carbono no sistema edáfico. Por fim, fósforo no solo (P) correlacionou com clorofilas A e B ( $r = 0,62$  e  $0,72$ ) sugerindo interações sinérgicas esse nutriente e a fotossíntese.

### *Análises de componentes principais*

A análise dos componentes principais (PCA) revelou que os dois primeiros eixos (PC1 e PC2) explicam conjuntamente 57,2 % da variância total (PC1 = 38,9 %; PC2 = 18,3 %), enquanto PC3 e PC4, considerados componentes complementares, respondem por mais 21,9 % (PC3 = 12,1 %; PC4 = 9,8 %) (Figura 5 A e B). Esses resultados destacam que os quatro eixos capturam 79,1 % da variância, fornecendo um bom poder explicativo para diferenciar os efeitos dos diferentes tratamentos sobre os atributos do solo e do capim-elefante BRS Capiáçu.



**Figura 5.** Análise de componentes principais das características morfológicas, fisiológicas e nutricionais de capim-elefante BRS Capiáçu, e atributos químicos e orgânicos do solo em função de tratamentos com adubação orgânica (biochar e vermicomposto) e mineral em diferentes proporções. A. eixos componentes principais PC 1 e 2; B. eixos PC 3 e 4. Pontos em azuis destaca-se os tratamentos.

No biplot de PC1 x PC2 a adubação mineral (AM) isolada (T2) concentrou-se no quadrante esquerdo, distante das principais variáveis, refletindo menor impacto sobre os atributos funcionais do sistema. Já a testemunha (T1) apresentou-se isolada no extremo oposto da PCA, o que evidencia seu fraco desempenho em relação ao desenvolvimento vegetal e acúmulo de carbono. Os tratamentos T5 (proporções balanceadas entre biochar, vermicomposto e fertilizante químico) foram fortemente associados a atributos de crescimento aéreo, como área foliar (FOLIAR), CR (comprimento de raiz), PSC e PSF (peso seco de caule e folha), fisiologicamente a celulose (CEL) e com nutrientes como Ca e P planta e COT (carbono orgânico total).

No extremo inferior direito, os tratamentos T9, T10 e T8, todos com proporções elevadas de biochar, associaram-se fortemente às frações orgânicas CL (carbono lábil), COP (carbono orgânico particulado), lignina (LIG) e pigmentos fotossintéticos (CLORA, CLORB), sugerindo maior contribuição à estabilidade do carbono e à funcionalidade fotossintética. O T3 e T4 apresentaram comportamento intermediário, com correlação com Mn, Zn e açúcares, ou seja, fraca associação a atributos-chave de produtividade ou acúmulo de carbono. Complementarmente, por meio dos componentes PC3 e PC4 observou-se que o tratamento T7 posicionou-se no quadrante superior direito, com forte associação a PSR (peso seco de raiz), CR, Mn e Zn, demonstrando potencial para otimizar o sistema radicular e a absorção de micronutrientes. Já T6, com 50 % biochar, 25 % fertilizante e 25 % vermicomposto, mostrou associação positiva com PSR, clorofilas, e nutrientes como Ca e Mg, confirmando seu papel no equilíbrio entre nutrição, crescimento e qualidade do solo.

#### *Análise de correlação canônica*

Com base na análise de correlação canônica (Tabela 4), foi possível identificar associações significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre atributos orgânicos do solo e características morfológicas, fisiológicas e nutricionais do capim-elefante BRS Capiçu, revelando padrões complexos e integrados entre esse compartimento do solo e o desempenho da planta.

**Tabela 4.** Análises de correlação canônica com um nível de significância de  $p \leq 0,05$  pelo teste de qui-quadrado entre os atributos orgânicos do solo e características morfológicas, fisiológicas e nutricionais do capim-elefante BRS Capiçu.

| Classe          | Variáveis | Par<br>Canônico<br>1 | Classe          | Variáveis | Par<br>Canônico<br>1 | Classe              | Variáveis | Par<br>Canônico<br>1 |
|-----------------|-----------|----------------------|-----------------|-----------|----------------------|---------------------|-----------|----------------------|
| Carbono no Solo | COT       | 0,85                 | Carbono no Solo | COT       | 0,35                 | Carbono no Solo     | COT       | 0,97                 |
|                 | CL        | 0,42                 |                 | CL        | 0,66                 |                     | CL        | 0,81                 |
|                 | COP       | 0,82                 |                 | COP       | -0,32                |                     | COP       | 0,60                 |
| Morfologia      | PSF       | 0,95                 | Fisiologia      | ACU       | -0,26                | Nutriente na Planta | NP        | 0,81                 |
|                 | PSC       | 0,90                 |                 | CLORA     | 0,71                 |                     | PP        | 0,69                 |
|                 | PSR       | -0,38                |                 | CLORB     | 0,64                 |                     | KP        | 0,56                 |
|                 | CR        | 0,62                 |                 | CEL       | -0,16                |                     | CaP       | -0,04                |
|                 | AFOLIAR   | 0,69                 |                 | LIG       | 0,51                 |                     | MgP       | 0,68                 |
|                 | R         | 0,99*                |                 | R         | 0,99**               |                     | R         | 0,99**               |

Na primeira dimensão canônica, observou-se uma associação robusta entre o carbono orgânico total (COT) e a morfologia da planta, destacando-se os altos coeficientes para PSF (0,95) e PSC (0,90), além da área foliar (AFOLIAR = 0,69) e comprimento radicular (CR = 0,62). Esse padrão sugere que sistemas que acumulam maiores teores de COT, e COP (0,82) no solo favorecem significativamente a biomassa aérea e o desenvolvimento radicular do capim-elefante BRS Capiçu.

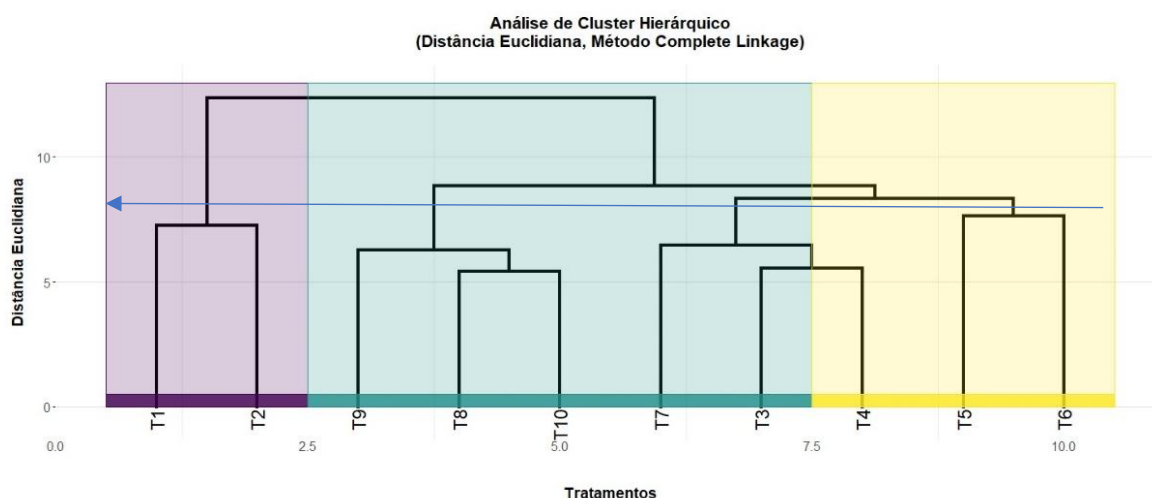
Nguyen e colaboradores (2021), avaliou o cultivo do capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) associado à aplicação de biochar. A aplicação de biochar derivado de casca de café elevou significativamente o rendimento biomássico do capim-elefante (aumento de até 82 %), além de melhorar atributos químicos do solo como pH, capacidade de troca catiônica e bases trocáveis. Isso sugere uma relação direta entre a qualidade do solo e o desenvolvimento da planta.

Assim como foi observado em nossas análises, outros trabalhos mostraram resultados semelhantes. Correlações positivas entre atributos de carbono orgânico do solo e parâmetros morfológicos, fisiológicos ou produtivos das plantas, especialmente biomassa aérea e desenvolvimento radicular. Aplicações de biochar no solo apresentaram efeitos positivos no desempenho das plantas, particularmente em solos soltos no contexto agrícola, como relado nos trabalhos de Liao et al. (2024). Zhu et al. (2023) demonstra como o biochar modifica a morfologia radicular visando melhorar o crescimento superior (parte aérea), revelando uma interdependência funcional entre raiz e biomassa aérea. E ainda, Heinemann et al. (2023), desenvolveu uma revisão que mostra que o aumento da biomassa radicular está diretamente associado ao incremento da entrada de carbono no solo e, por extensão, ao crescimento da parte aérea.

Na segunda dimensão, os atributos fisiológicos mostraram correlações moderadas com frações de carbono no solo. Destaque para CLORA (0,71) e CLORB (0,64), que indicam que a eficiência fotossintética da planta está parcialmente associada ao conteúdo de CL (0,66). Por fim, na terceira dimensão, a interação entre atributos químicos do solo e a nutrição mineral da planta foi expressiva, com destaque para COT (0,97), CL (0,81) e COP (0,60), altamente correlacionados com o teor de nitrogênio (NP = 0,81), fósforo (PP = 0,69), magnésio (MgP = 0,68), potássio (KP = 0,56) na planta. A raiz expressou forte relação ( $R = 0,99$ ), reforçando sua relevância como elo entre frações de carbono, morfologia e fisiologia vegetal.

### *Análise de agrupamentos*

Com base na análise de agrupamento hierárquico (dendrograma) (Figura 6), conduzida pelo método de ligação completa e distância euclidiana, revelou-se a formação de quatro clusters principais, os quais refletem padrões consistentes de similaridade entre os tratamentos quanto aos atributos morfológicos, fisiológicos, nutricionais e químicos do solo, em resposta às diferentes proporções de biochar, vermicomposto e adubação química.



**Figura 6.** Dendrograma hierárquico de cluster obtido usando o método de ligação completa para os tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). Legenda: T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

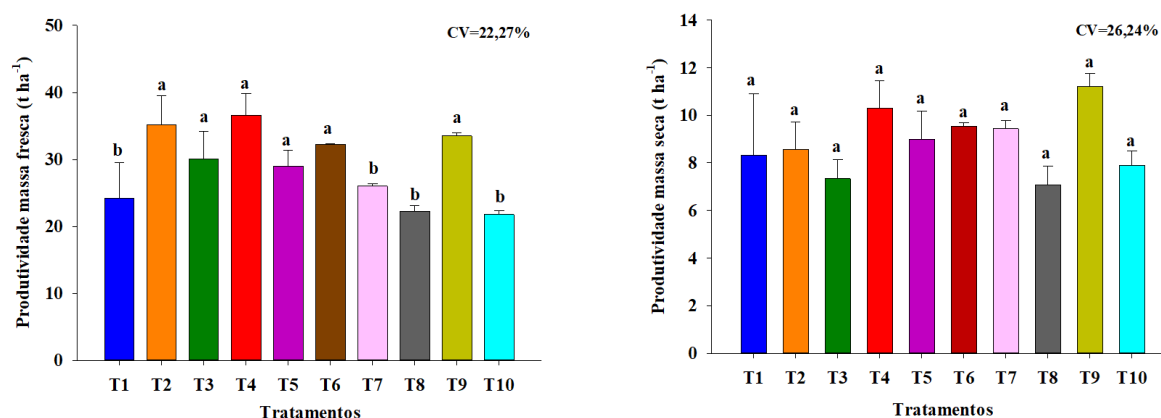
**Cluster 1.** Este grupo reuniu a testemunha (T1) e o tratamento com 100% de adubação química (T2), caracterizando-se por baixa adição de matéria orgânica. Ambos se destacam negativamente nos indicadores de qualidade do solo, como carbono orgânico total (COT), carbono lábil (CL) e carbono orgânico particulado (COP). Além disso, os desempenhos morfológicos e fisiológicos da planta foram inferiores. **Cluster 2.** Este grupo reuniu T8, T9 e T10, ou seja, tratamentos com maiores proporções de biochar e/ou vermicomposto, inclusive T8 tem 100% de biochar. Possivelmente este agrupamento deveu-se aos maiores teores de carbono orgânico (COT, CL, COP), refletindo em melhor estrutura e funcionalidade do solo, além de desempenho superior nas variáveis clorofilas A e B, celulose, lignina e absorção de nutrientes foliares (NP, KP, MgP). As plantas destes tratamentos também mostraram maior **acúmulo de biomassa aérea e radicular**, evidenciando os efeitos positivos da matéria orgânica na melhoria da fertilidade e saúde do solo em ambientes arenosos e semiáridos.

**Cluster 3.** Este grupo reuniu os tratamentos T7, T4 e T3, os quais apresentaram desempenho agrônômico e edáfico moderado, com níveis de carbono orgânico e produtividade superiores a T1 e T2, porém ainda aquém dos tratamentos com maior aporte de vermicomposto e biochar. **Cluster 4.** A formação de um cluster exclusivo entre os tratamentos T5 (33,4% biochar, 33,3 % adubação química, 33,3 % vermicomposto) e T6 (50 % biochar, 25 % adubação química, 25 % vermicomposto) evidencia uma sintonia funcional entre esses dois sistemas integrados, marcados por proporções balanceadas de insumos orgânicos e minerais. A semelhança observada entre esses tratamentos foi fortemente influenciada por variáveis relacionadas ao acúmulo de carbono no solo, eficiência fisiológica da planta e absorção de nutrientes.

Ambos os tratamentos apresentaram moderados teores de carbono orgânico total (COT), carbono lábil (CL) e carbono orgânico particulado (COP), o que indica melhoria na qualidade estrutural e funcional do solo. Essa condição promoveu maior disponibilidade e eficiência no uso de nutrientes, resultando em elevação dos teores de N, Mg, Mg e Zn na planta, conforme apontado pelas análises de correlação canônica e PCA. Além disso, as variáveis morfológicas como peso seco da folha (PSF), área foliar (AFOLIAR) e comprimento radicular (CR) também apresentaram valores elevados nesses tratamentos, o que sugere desempenho fisiológico superior, associado ao aumento dos teores de clorofila A e B (CLORA e CLORB), celulose (CEL) e lignina (LIG), indicando maior atividade fotossintética e síntese estrutural.

### 3.3 Análises univariadas da planta, do solo e desempenho das frações orgânicas e índices de manejo em função dos tratamentos

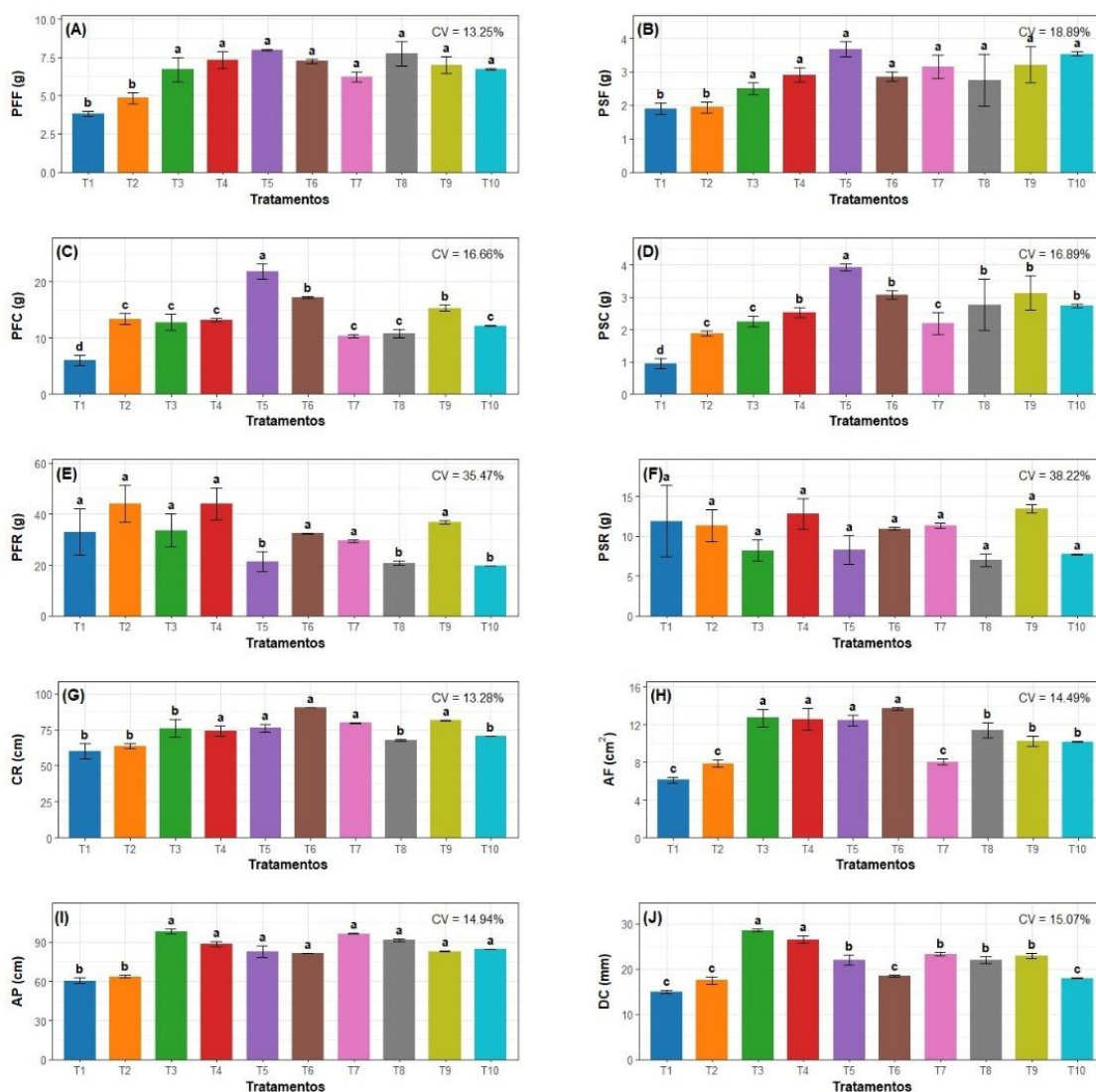
A aplicação do teste de Scott-Knott revelou distinções estatisticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre os tratamentos em relação aos atributos morfológicos do capim-elefante BRS Capiáçu. De forma geral, os tratamentos que combinaram biochar e vermicomposto apresentaram os melhores desempenhos morfológicos (T3 a T10), evidenciando o potencial sinérgico desses insumos na promoção do crescimento vegetal em solos arenosos do semiárido. Como fica evidenciado na Figura 7, a produtividade da massa fresca por tonelada por hectare, onde os tratamentos com associação de adubação química, biochar e vermicomposto (T3, T4, T5 e T6), e o somente com biochar e vermicomposto (T9) não apresentaram diferença estatística significativa com o tratamento com a adubação química, sendo o T4 e o T9 que tiveram maior produtividade. Em relação a produtividade da massa seca por tonelada por hectare apesar de não apresentar diferença estatística significativa, foi observado maiores valores médios nos tratamentos associados de adubação química, biochar e vermicomposto de T4 a T7, com ganho máximo de 20,1 % no T4, e no de biochar com vermicomposto (T9), esse com aumento de 30,8 %, quando comparado com a adubação química convencional (T2).



**Figura 7.** Produtividade da massa fresca e seca capim-elefante BRS Capiáçu submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

O aumento na produtividade nos tratamentos com biochar e vermicomposto também ficam evidentes quando observamos outros parâmetros avaliados, especialmente peso fresco e

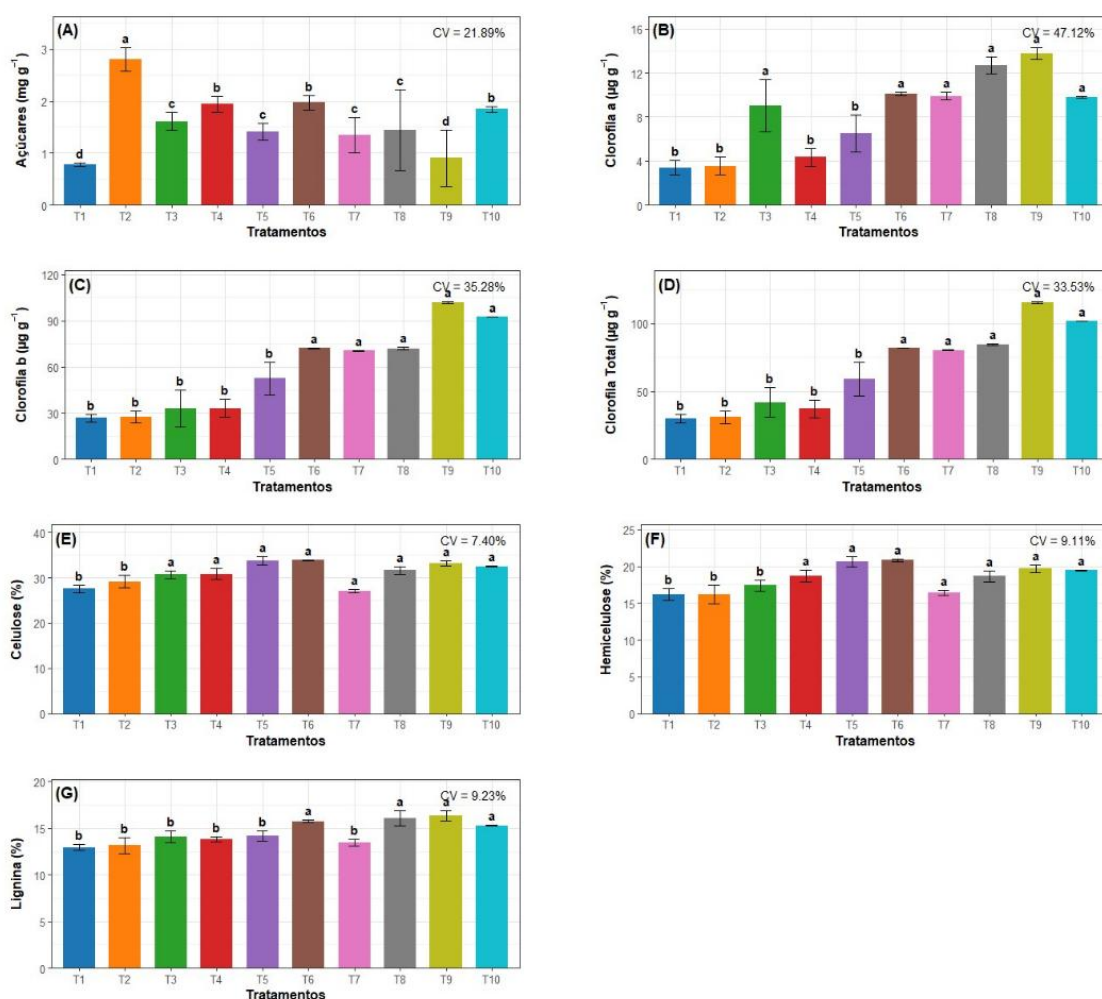
seco de folha (PFF e PSF) e, altura de planta (ALT). O T5 (mistura equilibrada de adubos químicos e orgânicos) se destacou no peso seco e fresco do caule, enquanto T4 (25 % biochar, 50% adubação química, 25 % vermicomposto) apresentou os maiores valores para área foliar (AFOLIAR = 12,57 cm<sup>2</sup>), sugerindo maior expansão vegetativa. Por outro lado, os tratamentos T1 (testemunha) e T2 (100% adubação química) agruparam-se entre os piores desempenhos morfológicos, com valores estatisticamente inferiores em quase todas as variáveis avaliadas, sendo classificados com as letras "B", "C" ou "D (Figura 8)



**Figura 8.** Variáveis morfológica de capim-elefante BRS Capiacu submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). Peso fresco (A) e seco de folha (B) (PFF e PSF), peso fresco caule (C) e peso seco caule (D) (PFC e PSC), peso fresco raiz (E) e peso seco raiz (F) (PFR e PSR), comprimento radicular (G) (CR), área foliar (H) (AF), altura planta (I) (AP) e diâmetro caule (J) (DC). T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25%

biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

Para os parâmetros fisiológicos do capim-elefante BRS Capiáçu (Figura 9) observou-se que os tratamentos com maiores proporções de biochar e vermicomposto (T6 a T10) destacaram-se quanto aos maiores conteúdos de clorofila A, B e total, celulose, hemicelulose e lignina, o que indica maior capacidade fotossintética, e elevados teores de compostos estruturais da parede celular. O T2 apresentou o maior teor de açúcares totais (2,81 mg g<sup>-1</sup>). Com exceção dos açúcares, os tratamentos T1 e T2, apresentaram menores quantidades de pigmentos fotossintéticos e componentes estruturais, refletindo também menor desempenho fisiológico.



**Figura 9.** Variáveis fisiológicas de capim-elefante BRS Capiáçu submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto). Açúcares (A), clorofila a (B), clorofila b (C), clorofila total (D), celulose (E), hemicelulose (F), lignina (G). T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75%

adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

Quanto aos teores foliares de macronutrientes, para nitrogênio, cálcio e potássio na planta os tratamentos que mais se destacaram foram T4 (25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto), T7 (25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto) e T8 (100% biochar) (Tabela 5). Esses tratamentos, todos com biochar e algum grau de vermicomposto, evidenciam a sinergia entre fontes orgânicas e minerais para a absorção de N, denotando a eficácia do biochar isolado na liberação e retenção de cátions. Para fósforo e magnésio não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos.

**Tabela 5.** Teores de macronutrientes na folha de capim-elefante BRS Capiacu submetidos a adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto) sob diferentes proporções.

| TRAT                           | NP            | PP           | KP           | CaP          | MgP          |
|--------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ----- g kg <sup>-1</sup> ----- |               |              |              |              |              |
| T1                             | 6,68 ± 0,36D  | 2,16 ± 0,73A | 3,64 ± 0,02B | 5,09 ± 0,37B | 2,93 ± 0,41A |
| T2                             | 6,48 ± 0,55D  | 1,15 ± 0,03A | 3,06 ± 0,16B | 6,24 ± 0,58A | 2,35 ± 0,71A |
| T3                             | 17,63 ± 0,87B | 2,00 ± 0,76A | 4,07 ± 0,26A | 6,24 ± 0,46A | 3,55 ± 0,25A |
| T4                             | 19,65 ± 0,19A | 1,35 ± 0,02A | 4,36 ± 0,13A | 6,78 ± 0,23A | 3,23 ± 0,30A |
| T5                             | 14,35 ± 0,53C | 1,11 ± 0,02A | 3,41 ± 0,12B | 7,01 ± 0,26A | 4,28 ± 0,35A |
| T6                             | 17,13 ± 0,14B | 1,36 ± 0,14A | 3,81 ± 0,14B | 6,21 ± 0,14A | 2,96 ± 0,14A |
| T7                             | 18,73 ± 0,34A | 1,02 ± 0,34A | 4,11 ± 0,34A | 6,18 ± 0,34A | 2,96 ± 0,34A |
| T8                             | 18,55 ± 0,78A | 1,07 ± 0,78A | 4,53 ± 0,78A | 6,36 ± 0,78A | 4,25 ± 0,78A |
| T9                             | 14,85 ± 0,54C | 1,01 ± 0,54A | 3,42 ± 0,54B | 5,71 ± 0,54B | 3,38 ± 0,54A |
| T10                            | 17,30 ± 0,06B | 1,09 ± 0,06A | 4,07 ± 0,06A | 5,73 ± 0,06B | 3,83 ± 0,06A |
| CV                             | 7,7           | 51,6         | 8,4          | 10,6         | 28,8         |

Média±erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não difere pelo teste Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), CV= coeficiente de variação. NP =nitrogênio planta, PP=fósforo planta, KP=potássio planta, CaP = cálcio planta, MgP = magnésio planta. Trat = tratamento. T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

Na análise da fertilidade do solo ao final do experimento (Tabela 6), não se detectou diferença entre pH e CE com médias de 7,4 e 0,17 dSm<sup>-1</sup>, respectivamente. Para os nutrientes não houve diferença entre os tratamentos para Na, Ca e Mg (6,5, 0,99 e 0,48 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente) e para Cu, Mn e Zn (0,11, 5,91 e 3,54 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente). Os tratamentos orgânicos (T5 a T10), especialmente aqueles com maiores proporções de biochar (T6, T8, T9, T10), também favoreceram os teores de micronutrientes como Cu, Fe, Mn e Zn, embora sem diferença estatística significativa na maioria dos casos, com exceção do Fe, onde esses tratamentos se destacaram com maiores teores.

Os tratamentos T9 (50% biochar + 50% vermicomposto) e T10 (75% biochar + 25% vermicomposto) apresentaram os maiores teores de fósforo disponível (46,94 e 45,56 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente), indicando que combinações entre fontes orgânicas, especialmente com maior proporção de biochar, favorecem a liberação e retenção deste nutriente, possivelmente devido à elevada área superficial e à capacidade de troca catiônica do biochar. Esse efeito também é observado no teor de potássio, com destaque para o T6 (50% biochar + 25% adubação química + 25% vermicomposto), que apresentou o maior valor (9,06 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), superando significativamente os demais.

987

988 **Tabela 6.** Fertilidade de um solo arenoso no semiárido submetido a adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto) sob diferentes  
 989 proporções

| TRAT | pH           | CE                | P                   | K                                             | Na           | Ca           | Mg           | Cu                             | Fe            | Mn           | Zn           |
|------|--------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------------|---------------|--------------|--------------|
|      |              | dSm <sup>-1</sup> | mg dm <sup>-3</sup> | -----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- |              |              |              | -----mg dm <sup>-3</sup> ----- |               |              |              |
| T1   | 7,27 ± 0,11A | 0,16 ± 0,02A      | 2,16 ± 0,51D        | 0,91 ± 0,04C                                  | 5,59 ± 0,54A | 0,82 ± 0,07A | 0,45 ± 0,12A | 0,14 ± 0,01A                   | 9,57 ± 0,72B  | 6,06 ± 0,24A | 2,92 ± 0,16A |
| T2   | 7,25 ± 0,13A | 0,14 ± 0,01A      | 29,85 ± 2,84B       | 1,86 ± 0,10C                                  | 6,99 ± 0,32A | 1,05 ± 0,12A | 0,55 ± 0,08A | 0,13 ± 0,00A                   | 8,85 ± 0,74B  | 5,36 ± 0,44A | 3,18 ± 0,34A |
| T3   | 7,45 ± 0,10A | 0,15 ± 0,02A      | 14,53 ± 0,56C       | 1,13 ± 0,04C                                  | 6,31 ± 0,28A | 1,02 ± 0,08A | 0,44 ± 0,02A | 0,12 ± 0,00A                   | 9,81 ± 0,99B  | 5,59 ± 0,47A | 3,15 ± 0,20A |
| T4   | 7,13 ± 0,29A | 0,21 ± 0,07A      | 3,48 ± 0,17D        | 1,63 ± 0,12C                                  | 7,12 ± 0,43A | 1,09 ± 0,04A | 0,38 ± 0,03A | 0,11 ± 0,00A                   | 11,88 ± 1,69B | 5,90 ± 0,41A | 3,47 ± 0,08A |
| T5   | 7,29 ± 0,13A | 0,20 ± 0,02A      | 6,31 ± 0,73D        | 2,65 ± 0,45C                                  | 7,10 ± 0,29A | 1,10 ± 0,05A | 0,48 ± 0,05A | 0,11 ± 0,00A                   | 14,64 ± 0,55A | 6,88 ± 0,56A | 3,57 ± 0,23A |
| T6   | 7,33 ± 0,14A | 0,15 ± 0,14A      | 19,15 ± 0,14C       | 9,06 ± 0,14A                                  | 6,48 ± 0,14A | 0,94 ± 0,14A | 5,44 ± 0,14A | 0,10 ± 0,14A                   | 16,21 ± 0,14A | 7,58 ± 0,14A | 4,23 ± 0,14A |
| T7   | 7,24 ± 0,34A | 0,16 ± 0,34A      | 17,41 ± 0,34C       | 1,10 ± 0,34C                                  | 6,34 ± 0,34A | 1,09 ± 0,34A | 0,46 ± 0,34A | 0,10 ± 0,34A                   | 16,66 ± 0,34A | 7,49 ± 0,34A | 4,98 ± 0,34A |
| T8   | 8,07 ± 0,78A | 0,17 ± 0,78A      | 22,09 ± 0,78C       | 4,94 ± 0,78B                                  | 6,12 ± 0,78A | 0,97 ± 0,78A | 0,58 ± 0,78A | 0,05 ± 0,78A                   | 15,69 ± 0,78A | 4,57 ± 0,78A | 3,37 ± 0,78A |
| T9   | 7,69 ± 0,54A | 0,17 ± 0,54A      | 46,94 ± 0,54A       | 2,38 ± 0,54C                                  | 6,47 ± 0,54A | 0,89 ± 0,54A | 0,55 ± 0,54A | 0,06 ± 0,54A                   | 15,75 ± 0,54A | 5,83 ± 0,54A | 3,17 ± 0,54A |
| T10  | 7,71 ± 0,06A | 0,17 ± 0,06A      | 45,56 ± 0,06A       | 3,49 ± 0,06B                                  | 6,40 ± 0,06A | 0,93 ± 0,06A | 0,43 ± 0,06A | 0,14 ± 0,06A                   | 15,06 ± 0,06A | 3,83 ± 0,06A | 0,36 ± 0,06A |
| CV   | 3,1          | 0,31              | 20,1                | 44,5                                          | 10,5         | 13,4         | 7,8          | 33,3                           | 14,0          | 35,3         | 25,5         |

990 Média±erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não difere pelo teste Scott-Knott (p<0,05), CV= coeficiente de variação. NP =nitrogênio planta, PP=fósforo  
 991 planta, KP=potássio planta, CaP = cálcio planta, MgP = magnésio planta. Trat = tratamento. T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar  
 992 e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50%  
 993 biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50%  
 994 vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

995

996

997

Os teores de carbono orgânico total (COT), carbono lábil (CL), carbono orgânico particulado (COP) e aos índices de manejo de carbono com base em CL (IMCCL) e COP (IMCCOP), revelaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos avaliados, indicando forte influência da combinação entre biochar, vermicomposto e adubação química sobre a dinâmica do carbono em solo arenoso sob cultivo de capim-elefante BRS Capiáçu no semiárido. Os maiores teores de COT foram observados nos tratamentos T5 e, T7 a T10, os quais incorporam distintas proporções de biochar com vermicomposto, demonstrando a eficiência dessa estratégia em aumentar os estoques de carbono no solo. No entanto, os maiores teores de carbono lábil foram observados nos tratamentos com maiores proporções de biochar T8 a T10 (2,45, 1,94 e 1,79 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Para o carbono orgânico particulado o T8 (100% de biochar) e T5 (mix equilibrado de adubos) se sobressaíram aos demais tratamentos (3,28 e 3,23 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente) (Tabela 7).

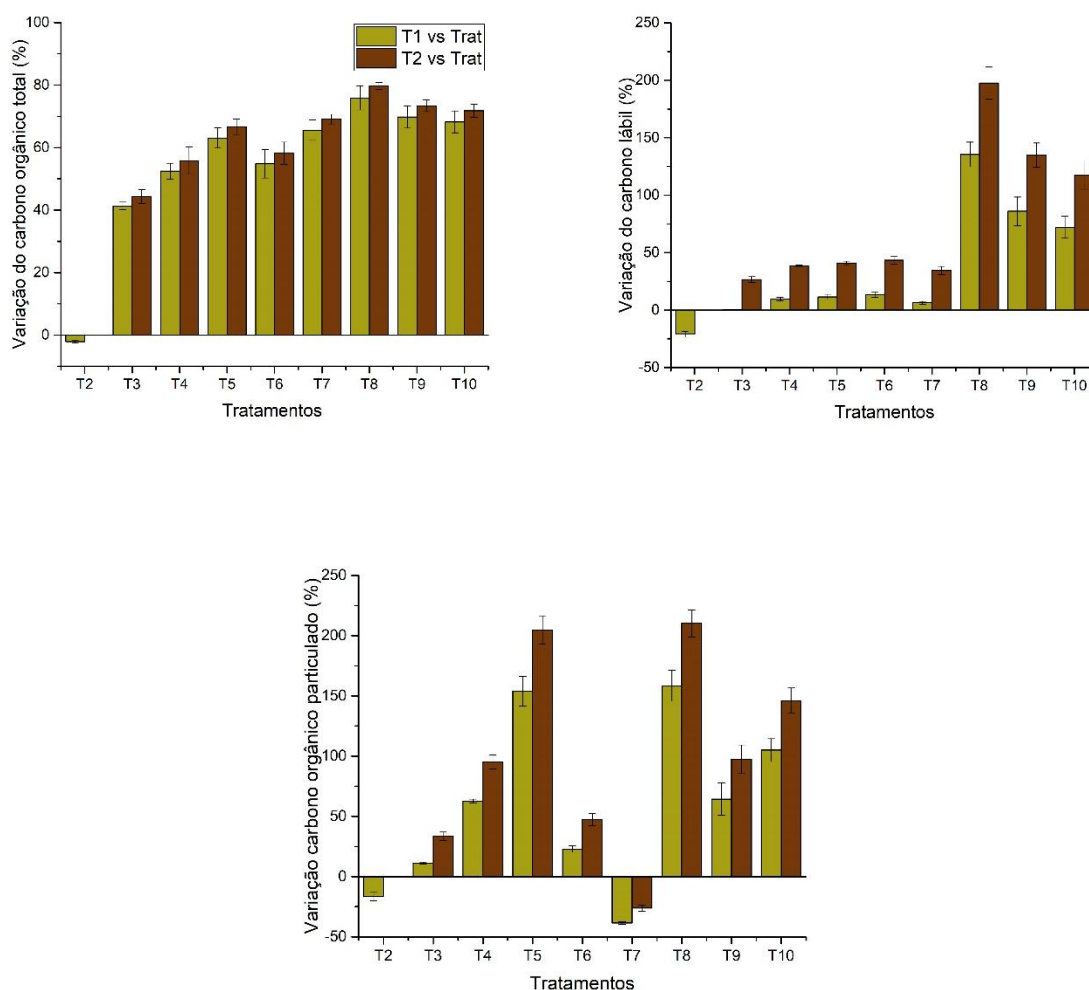
**Tabela 7.** Carbono orgânico total, lábil e particulado e índices de manejo de carbono em solo arenoso submetidos a tratamentos com diferentes proporções de adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto).

| TRAT | COT                           | CL           | COP          | IMCCL           | IMCCOP          |
|------|-------------------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
|      | -----g kg <sup>-1</sup> ----- |              |              | -               | -               |
| T1   | 28,45 ± 0,32D                 | 1,04 ± 0,14B | 1,27 ± 0,09C | 100,00 ± 0,00B  | 100,00 ± 0,00E  |
| T2   | 27,85 ± 0,13D                 | 0,82 ± 0,04C | 1,06 ± 0,10C | 82,15 ± 9,80B   | 82,04 ± 10,80E  |
| T3   | 40,20 ± 2,08C                 | 1,04 ± 0,03B | 1,41 ± 0,08C | 105,11 ± 15,30B | 166,18 ± 27,28D |
| T4   | 43,40 ± 1,95C                 | 1,14 ± 0,01B | 2,07 ± 0,13B | 114,96 ± 16,39B | 242,28 ± 9,17C  |
| T5   | 46,40 ± 0,58A                 | 1,16 ± 0,01B | 3,23 ± 0,08A | 117,21 ± 17,30B | 361,28 ± 38,84B |
| T6   | 44,05 ± 0,14B                 | 1,18 ± 0,14B | 1,56 ± 0,14C | 119,37 ± 0,14B  | 204,09 ± 10,14C |
| T7   | 47,10 ± 0,34A                 | 1,11 ± 0,34B | 0,78 ± 0,34D | 111,00 ± 0,34B  | 132,58 ± 10,34E |
| T8   | 50,05 ± 0,78A                 | 2,45 ± 0,78A | 3,28 ± 0,78A | 238,76 ± 0,78A  | 460,73 ± 10,78A |
| T9   | 48,30 ± 0,54A                 | 1,94 ± 0,54A | 2,09 ± 0,54B | 196,10 ± 0,54A  | 288,79 ± 10,54C |
| T10  | 47,85 ± 0,06A                 | 1,79 ± 0,06A | 2,60 ± 0,06B | 181,93 ± 0,06A  | 342,63 ± 0,06B  |
| CV   | 5,05                          | 11,54        | 18,67        | 26,76           | 31,61           |

Média±erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não difere pelo teste Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), CV= coeficiente de variação. COT =carbono orgânico total, CL = carbono, COP = carbono orgânico particulado, IMCCL= índice de manejo de carbono baseado no carbono lábil IMCCOP = índice de manejo de carbono baseado no carbono particulado. Trat = tratamento. T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química

e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

A análise dos índices de manejo de carbono com base no carbono lábil (IMCCL) e no carbono orgânico particulado (IMCCOP) revelaram diferenças significativas entre os tratamentos. No IMCCL, indicador integrado de COT e CL para avaliar a qualidade da matéria orgânica do solo, notou-se que todos os tratamentos que adicionaram adubação orgânica independente da proporção tiveram índices maiores que 100 (T3 a T10), com destaque para T8, T9 e T10 (239; 196 e 182, respectivamente). No entanto, ao focar matéria orgânica particulada na fração areia do solo, por meio do IMCCOP, houve ganho maior na adição somente de biochar (T8= 460) em relação aos demais tratamentos. Ao analisar a variação de carbono no solo, observe que a adubação mineral em relação a T1 (testemunha), perdeu -2,1%, -20,9% e -16,6 de COT, CL e COP (Tabela 4). No entanto, qualquer proporção de adubo orgânico promoveu aumento nos teores de C e suas frações lábeis, sendo maior com 100% de biochar (75,9%, 135,5% e 158,4% para COT, CL e COP) em relação a testemunha. Na análise em relação ao T2 (100% mineral) o ganho de T8 aumenta para 79,7%, 197,6% e 210,2% para COT, CL e COP) (Figura 10).



**Figura 10.** Variação do carbono orgânico total ( $\Delta C$ ) e frações lábeis em porcentagem, em relação a testemunha (T1= sem adubação) e tratamento 100% de adubação mineral (T2) de um solo arenoso no semiárido submetido a adubação química e orgânica (biochar e vermicomposto) sob diferentes proporções. Trat = tratamento. T1= testemunha (sem adubação); T2= 100% adubação química; T3 = 25% biochar e 75% adubação química; T4=25% biochar, 50% adubação química e 25% vermicomposto; T5=33,4% biochar, 33,3% adubação química e 33,3% vermicomposto; T6= 50% biochar, 25% adubação química e 25% vermicomposto; T7= 25% biochar, 25% adubação química e 50% vermicomposto; T8= 100% biochar; T9 = 50% biochar e 50% vermicomposto; T10=75% biochar e 25% vermicomposto.

1042

1043 

## 4 DISCUSSÃO

1044 O biochar de moringa (*Moringa oleifera*) por apresentar alto teor de carbono (66%),  
 1045 índices H/C e O/C indicando grau intermediário de aromaticidade e uma moderada  
 1046 hidrofilicidade, respectivamente, além de elevada superfície específica e porosidade,

possivelmente favoreceu interações com compostos orgânicos e minerais, retenção de água e adsorção de nutrientes, o que possivelmente aumentaram os teores de carbono em frações totais e lábeis, e a fertilidade do solo (Blanco-Canqui *et al.*, 2024; Bolan *et al.*, 2024; Xiao; Chen; Chen, 2016; Yadav *et al.*, 2023). O aumento substancial da porosidade, com formação de poros de diferentes formas e tamanhos, foram resultantes da liberação de voláteis e da degradação de compostos lignocelulósicos (Fernandes *et al.*, 2020). Esses novos poros, frequentemente interconectados, promovem a exposição de camadas internas da estrutura vegetal, conferindo ao biochar de moringa uma maior área superficial e potencial de retenção de água e nutrientes (Singh Yadav *et al.*, 2023; Yadav *et al.*, 2023).

A banda larga em  $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ , típica de grupos hidroxila (O–H) (Bagheri *et al.*, 2019; Ramavandi, 2014), indica a preservação parcial de compostos fenólicos e alcoólicos, conferindo ao biochar de moringa uma capacidade funcional importante para reações de complexação com cátions metálicos e interação com moléculas orgânicas no solo (Kizito *et al.*, 2015). A banda em  $1600\text{ cm}^{-1}$ , típica do estiramento de C=O em ácidos carboxílicos, aponta para a presença de estruturas lignocelulósicas parcialmente degradadas, importantes na sorção de íons e na estabilização da matéria orgânica no solo (Adel *et al.*, 2024; Chaves Fernandes *et al.*, 2020). Já o sinal em  $1370\text{ cm}^{-1}$ , relacionado a deformações C–H de grupos metila, reforça a ocorrência de cadeias alifáticas curtas, que mesmo após a pirólise, permanecem como resíduos termicamente estáveis.

A detecção de uma banda em  $1095\text{ cm}^{-1}$ , atribuída à ligação P–O–C, é especialmente relevante do ponto de vista agrônômico, pois evidencia a incorporação de fósforo em formas potencialmente biodisponíveis, além de indicar a presença de estruturas fosfocarbonadas que aumentam o valor nutricional do biochar (Bagheri *et al.*, 2019). Vários estudos usando um espectro de biochars mostraram a presença de picos de estiramento C–H alifáticos em  $\sim 3000$ – $\sim 2860\text{ cm}^{-1}$ , os picos de estiramento C–H aromáticos em  $\sim 3060\text{ cm}^{-1}$ , os picos de estiramento carbonílicos em  $\sim 1700\text{ cm}^{-1}$ , e os modos de anel aromático em  $\sim 1590$ – $\sim 1515\text{ cm}^{-1}$  (Adel *et al.*, 2024; Bolan *et al.*, 2024; Figueredo *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020). Esses resultados apontam que o biochar de moringa possui não apenas uma matriz aromática resiliente, mas também grupos funcionais ativos, o que o torna um material multifuncional, capaz de atuar como condicionador de solo, fonte de nutrientes e estabilizador de carbono em ambientes edáficos frágeis como solos arenosos na região semiárida.

A aplicação de biochar de moringa (*Moringa oleifera*), isolada e/ou em combinação com fontes mais lábeis de carbono (como vermicomposto) revelou efeitos expressivos sobre os teores de carbono orgânico total (COT) e suas frações (carbono lábil – CL, e carbono orgânico particulado – COP), evidenciando a relevância do manejo orgânico e da adubação integrada na sustentabilidade edáfica. Tratamentos com maior proporção de biochar (T8, T9 e T10) apresentaram os maiores valores de COT, CL e COP, sugerindo que o biochar atua como uma matriz estável que contribui para a recalcitrância e labilidade da matéria orgânica, além de oferecer proteção física contra a decomposição microbiana, conforme apontado por Zhang et al. (2022) e Keller et al. (2023). Associado a isso, por ter uma estrutura porosa e aromática pode adsorver COT e formar um complexo estável, fato que aumenta o sequestro de COT (Faye et al., 2021; Kuzyakov; Bogomolova; Glaser, 2014; Zhang et al., 2022). Além disso, o biochar conferiu qualidade da matéria orgânica do solo aumentando em até 239 e 461 o índice de manejo de carbono baseado no CL (IMCCL) e no COP (IMCCOP), respectivamente, quando aplicado 100% de biochar no solo.

Independente da proporção biochar ou misturas com vermicomposto ou adubação química, sua aplicação proporcionou aumentos no COT de 41% a 76%, quando comparado a testemunha, e 44% e 80% quando comparado com 100% de adubação química, sendo os maiores valores associados a 100% de biochar. Ganhos ainda maiores foram observados nos pools de carbono lábil e particulado, sendo estes os indicadores mais sensíveis para detectar mudanças precoces, tanto no acúmulo de matéria orgânica do solo, quanto na labilidade de C em resposta à aplicação de biochar (Amoakwah et al., 2021). Numa meta-análise com 417 artigos, Mulabagal et al. (2022) demonstraram que a aplicação de biochar aumentou o conteúdo de COT em média 39%, comparado as culturas de cobertura (6%) ou cultivo de conservação (5%). Zhang et al. (2022) demonstraram que as aplicações de biochar de 15 e 30 t hm<sup>-2</sup> aumentaram a fração média de carbono orgânico em 9,4–24,4% e 16,5–43,3%, respectivamente. Além disso, o biochar em combinação com vermicomposto aumentou os teores de fósforo e potássio disponíveis no solo. Pesquisas desenvolvidas por Gao et al. (2025), Blanco-Canqui et al. (2024) e (Thapa et al., 2024) também observaram aumento nos teores de fósforo no solo quando adicionaram biochar, possivelmente presença de grupamentos P–O–C que incorporam fósforo em formas mais potencialmente biodisponíveis. Além disso, o vermicomposto também é fertilizante orgânico rico em fósforo e potássio que pode ter potencializado o efeito do Biochar (De Lavôr et al., 2024).

Os tratamentos que incluíram biochar de moringa, isolado ou em combinação com adubação química e orgânica, de forma geral, também promoveram melhorias significativas no crescimento, fisiologia e nutrição do capim-elefante BRS Capiáçu, superando a testemunha e o tratamento com adubação química isolada. Nessas combinações, observou-se maiores produtividades (fresca e seca), altura de plantas, maiores teores foliares de N, K, Ca e Mg, além de elevação nos níveis de clorofila A, B e total, celulose e lignina, evidenciando um efeito sinérgico na eficiência fotossintética, no metabolismo vegetal e na composição lignocelulósica da planta. As análises multivariadas (PCA e cluster) reforçaram a superioridade dos tratamentos com biochar, agrupando-os nas regiões associadas aos maiores indicadores de produção e nutrição de plantas. Esses resultados demonstram que o biochar, ao aumentar a retenção de nutrientes, melhorar condições físico-químicas e orgânicas do solo, potencializa o desempenho do capim-elefante BRS Capiáçu. Estudos demonstram que o biochar de várias fontes, usadas em diferentes gramíneas, melhoram as condições edáficas do solo potencializando a produção e características agronômicas dessas culturas (Faloye *et al.*, 2024; Fentie *et al.*, 2025; Keller *et al.*, 2023; Nguyen *et al.*, 2021; Reyes-Cabrera *et al.*, 2019; Zubairu *et al.*, 2023).

Por fim, neste experimento, a análise de correlação canônica demonstrou que biochar isolado e/ou em combinações com vermicomposto, que acumulam maiores teores de COT e frações lábeis (CL, COP), favorecem significativamente a biomassa aérea e o desenvolvimento radicular do capim-elefante BRS Capiáçu, refletindo numa melhoria na estrutura e funcionalidade do sistema edáfico-vegetal. Além disso, o biochar aumentou a eficiência fotossintética da planta, síntese de compostos orgânicos estruturais e funcionais, como clorofilas e lignina, reforçando a relevância do elo entre frações de carbono, morfologia e fisiologia vegetal. Isto evidencia que os tratamentos que promovem a melhoria da qualidade orgânica do solo são também os que potencializam a nutrição e crescimento foliar e radicular. Assim, preenche-se a lacuna da pesquisa, indicando que o biochar seja isolado ou em combinações orgânicas favorecem não apenas o crescimento da planta, mas também promovem aumento na produtividade fresca e seca, resiliência edáfica e sustentabilidade agronômica, alinhando-se às diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

## 5 CONCLUSÃO

A aplicação de biochar de moringa, isolado ou em combinação com vermicomposto (T8, T9 e T10), proporcionou efeitos expressivos sobre os atributos edáficos do solo promovendo aumentos significativos nos teores de COT, frações lábeis, bem como nos índices de manejo de

1142 carbono (IMC) baseados no CL e COP, evidenciando sua função na proteção física da matéria  
1143 orgânica e na melhoria da estabilidade estrutural e fertilidade do solo.

1144 Do ponto de vista prático e ambiental, os achados destacam o potencial do biochar de  
1145 moringa como uma alternativa sustentável para promover o sequestro de carbono no solo,  
1146 melhorar a retenção de nutrientes e otimizar o desempenho agrônômico de espécies  
1147 bioenergéticas como o capim-elefante BRS Capiáçu. O uso de fontes orgânicas combinadas ou  
1148 isoladas, em especial com adição de materiais com elevada funcionalidade físico-química como  
1149 o biochar de moringa, representa uma estratégia eficaz para aumentar a resiliência dos sistemas  
1150 agrícolas em regiões semiáridas frente aos desafios da degradação edáfica e mudanças  
1151 climáticas. Além disso, as evidências multivariadas (CCA, PCA e correlação de Pearson)  
1152 demonstram a interdependência entre os compartimentos orgânicos do solo e os parâmetros  
1153 fisiológicos das plantas, reforçando a importância de abordagens integradas no manejo.

1154 Como perspectivas futuras, recomenda-se a investigação de longos ciclos de cultivo e  
1155 diferentes culturas em sucessão para validar a estabilidade dos ganhos observados, bem como  
1156 o estudo dos mecanismos de interação entre biochar, microbiota edáfica e raízes. A aplicação  
1157 do biochar de moringa, alinhada ao uso de insumos orgânicos e práticas conservacionistas, se  
1158 configura como uma prática estratégica para atender aos Objetivos do Desenvolvimento  
1159 Sustentável, notadamente os ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 13 (Ação  
1160 contra a mudança global do clima) e ODS 15 (Vida terrestre), além de atender os requisitos da  
1161 economia circular.

1162

1163

1164

1165

1166

1167

## 1168 REFERÊNCIAS

- 1169 ADEL, A. M.; MARTINEZ-SABANDO, J.; AL-SHEMY, M. T.; CERVENY, S. Effect of  
1170 Ferrocene on Physicochemical Properties of Biochar Extracted from Windmill Palm Tree  
1171 (*Trachycarpus Fortunei*). **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, n. 2, p. 1031–1051, 2024.
- 1172 AHMAD, M. S.; GABBAR, H. A. Exploring bioenergy potential and thermal behavior of  
1173 Elephant grass cultivated with treated microalgae wastewater for advanced pyrolytic products.  
1174 **Chemical Engineering Science**, v. 288, p. 119842, 2024.
- 1175 ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. de M.; SPAROVEK,  
1176 G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.  
1177 711–728, 2013.
- 1178 AMÉRICO GLÓRIA, P. R.; TONANI DE SIQUEIRA, F. L.; DE SIQUEIRA, G. B.;  
1179 RODRIGUES SANTOS, W. B.; BATISTA, I. N. Influência da adubação nitrogenada, idades  
1180 de corte da planta e pré-tratamentos da fibra sobre a produção de etanol de capim-elefante  
1181 cultivado em solos de cerrado. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 35, n. 1, p. 62–79, 2020.
- 1182 AMOAKWAH, E.; ARTHUR, E.; FRIMPONG, K. A.; ISLAM, K. R. Biochar Amendment  
1183 Influences Tropical Soil Carbon and Nitrogen Lability. **Journal of Soil Science and Plant**  
1184 **Nutrition**, v. 21, n. 4, p. 3567–3579, 2021.
- 1185 BAGHERI, A.; ABU-DANSO, E.; IQBAL, J.; BHATNAGAR, A. Modified biochar from  
1186 Moringa seed powder for the removal of diclofenac from aqueous solution. **Environmental**  
1187 **Science and Pollution Research International**, v. 27, p. 7318–7327, 2019.
- 1188 BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and  
1189 nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202–214, 2013.
- 1190 BLANCO-CANQUI, H.; CREECH, C. F.; EASTERLY, A. C.; DRIJBER, R. A.; JESKE, E. S.  
1191 Does biochar combined with cover crops improve health and productivity of sandy, sloping,  
1192 and semi-arid soils?. **Soil Science Society of America Journal**, v. 88, n. 4, p. 1340–1357, 2024.
- 1193 BOLAN, S.; SHARMA, S.; MUKHERJEE, S.; KUMAR, M.; RAO, Ch. S.; NATARAJ, K. C.;  
1194 SINGH, G.; VINU, A.; BHOWMIK, A.; SHARMA, H.; EL-NAGGAR, A.; CHANG, S. X.;  
1195 HOU, D.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; SIDDIQUE, K. H. M.; ABBOTT, L. K.; KIRKHAM,  
1196 M. B.; BOLAN, N. Biochar modulating soil biological health: A review. **Science of The Total**  
1197 **Environment**, v. 914, p. 169585, 2024.
- 1198 BURT, R. **Kellogg soil survey laboratory methods manual**. : United States Department of  
1199 Agriculture, Natural Resources Conservation ..., 2014.
- 1200 CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a  
1201 grassland cultivation sequence. **Soil science society of America journal**, v. 56, n. 3, p. 777–  
1202 783, 1992.
- 1203 CANTARUTTI, R. B.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, M. M.; RIBEIRO, A.; GUIMARÃES,  
1204 P.; ALVAREZ, V. **Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais:**  
1205 **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais-5ª Aproximação.** ,  
1206 1999.

- 1207 CHAVES FERNANDES, B. C.; FERREIRA MENDES, K.; DIAS JÚNIOR, A. F.; DA SILVA  
1208 CALDEIRA, V. P.; DA SILVA TEÓFILO, T. M.; SEVERO SILVA, T.; MENDONÇA, V.;  
1209 DE FREITAS SOUZA, M.; VALADÃO SILVA, D. Impact of Pyrolysis Temperature on the  
1210 Properties of Eucalyptus Wood-Derived Biochar. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 5841, 2020.
- 1211 DA ROSA, P. P.; DA SILVA, P. M.; CHESINI, R. G.; DE OLIVEIRA, A. P. T.; SEDREZ, P.  
1212 A.; FARIA, M. R.; LOPES, A. A.; ROLL, V. F. B.; FERREIRA, O. G. L. Características do  
1213 Capim Elefante *Pennisetum purpureum* (Schumach) e suas novas cultivares BRS Kurumi e  
1214 BRS Capiaçú. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 1/2, p. 70–84, 2019.
- 1215 DA SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2009a.
- 1216 DA SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2009b.
- 1217 DA SILVA, L. F.; DA SILVA, E. F.; MORAIS, F. M. S.; PORTELA, J. C.; DE OLIVEIRA,  
1218 F. H. T.; DE FREITAS, D. F.; DE ALMEIDA FERREIRA, E.; GURGEL, M. T.; PINHEIRO,  
1219 A. M.; LIMA, R. B.; VASCONCELOS, A. A.; ANTUNES, L. F. D. S. Potential of  
1220 vermicomposting with mixtures of animal manure and vegetable leaves in the development of  
1221 *Eisenia foetida*, microbial biomass, and enzymatic activity under semi-arid conditions. **Journal**  
1222 **of Environmental Management**, v. 330, p. 117169, 2023.
- 1223 DANQUAH, J. A.; ROBERTS, C. O.; APPIAH, M. Elephant Grass (*Pennisetum purpureum*):  
1224 A Potential Source of Biomass for Power Generation in Ghana. **Current Journal of Applied**  
1225 **Science and Technology**, v. 30, n. 6, p. 1–12, 2018.
- 1226 DE LAVÔR, W. K. B.; DA SILVA, E. F.; DE ALMEIDA FERREIRA, E.; GONDIM, J. E. F.;  
1227 PORTELA, J. C.; DE SOUSA ANTUNES, L. F.; DE ALMEIDA VASCONCELOS, A.; DE  
1228 FREITAS, D. F.; MENDONÇA, V.; FERNANDES, B. C. C. Vermicompost and millicompost  
1229 as a resource in sustainable agriculture in semiarid: decomposition, nutrient release, and  
1230 microstructure under the action of nitrogen and organic-mineral fertilizers. **Environmental**  
1231 **Science and Pollution Research**, v. 31, n. 23, p. 33924–33941, 2024.
- 1232 DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric  
1233 method for determination of sugars and related substances. **Analytical chemistry**, v. 28, n. 3,  
1234 p. 350–356, 1956.
- 1235 EARTH, P.; STANDARD, P. **Biochar Methodology**. : Edition, 2022.
- 1236 FALOYE, O. T.; AJAYI, A. E.; KAMCHOOM, V.; AKINTOLA, O. A.; OGUNTUNDE, P.  
1237 G. Evaluating impacts of biochar and inorganic fertilizer applications on soil quality and maize  
1238 yield using principal component analysis. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1761, 2024.
- 1239 FAYE, A.; STEWART, Z. P.; DIOME, K.; EDWARD, C.-T.; FALL, D.; GANYO, D. K. K.;  
1240 AKPLO, T. M.; PRASAD, P. V. Single application of biochar increases fertilizer efficiency, C  
1241 sequestration, and pH over the long-term in sandy soils of Senegal. **Sustainability**, v. 13, n. 21,  
1242 p. 11817, 2021.
- 1243 FENTIE, D.; MIHRETIE, F. A.; KOHIRA, Y.; LEGESSE, S. A.; LEWOYEHEU, M.;  
1244 WUTISIRIRATTANACHAI, T.; SATO, S. Optimizing Cropping Systems Using Biochar for  
1245 Wheat Production Across Contrasting Seasons in Ethiopian Highland Agroecology.  
1246 **Agronomy**, v. 15, n. 5, p. 1227, 2025.

- 1247 FIGUEREDO, N. A. de; COSTA, L. M. da; MELO, L. C. A.; SIEBENEICHLERD, E. A.;  
1248 TRONTO, J. Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of  
1249 nutrients and contaminants. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 3–403, 2017.
- 1250 FLORES, R. A.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J.; COLLIER, L. S.; BODDEY, R. M. Yield  
1251 and quality of elephant grass biomass produced in the cerrados region for bioenergy.  
1252 **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 831–839, 2012.
- 1253 GAO, S.; MEDINA, M.; GONZALEZ-OSPINA, L.; BURCE, Katrina; BURCE, Kristina;  
1254 MELBOURNE, A. Boosting soil health and crop nutrients with locally sourced biochar and  
1255 compost in Sacramento urban agriculture. **Frontiers in sustainable food systems**, v. 9, p.  
1256 1546426, 2025.
- 1257 GAO, G.; YAN, L.; TONG, K.; YU, H.; LU, M.; WANG, L.; NIU, Y. The potential and  
1258 prospects of modified biochar for comprehensive management of salt-affected soils and plants:  
1259 A critical review. **Science of The Total Environment**, v. 912, p. 169618, 2024.
- 1260 GOURAI, M.; NAYAK, A. K.; NIAL, P. S.; SATPATHY, B.; BHUYAN, R.; SINGH, S. K.;  
1261 SUBUDHI, U. Thermal plasma processing of Moringa oleifera biochars: adsorbents for  
1262 fluoride removal from water. **RSC advances**, v. 13, n. 7, p. 4340–4350, 2023.
- 1263 KELLER, L.; IDOWU, O. J.; ULERY, A.; OMER, M.; BREWER, C. E. Short-Term Biochar  
1264 Impacts on Crop Performance and Soil Quality in Arid Sandy Loam Soil. **Agriculture**, v. 13,  
1265 n. 4, p. 782, 2023.
- 1266 KIZITO, S.; WU, S.; KIRUI, W. K.; LEI, M.; LU, Q.; BAH, H.; DONG, R. Evaluation of slow  
1267 pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery  
1268 manure anaerobic digestate slurry. **Science of the Total Environment**, v. 505, p. 102–112,  
1269 2015.
- 1270 KUZYAKOV, Y.; BOGOMOLOVA, I.; GLASER, B. Biochar stability in soil: decomposition  
1271 during eight years and transformation as assessed by compound-specific <sup>14</sup>C analysis. **Soil**  
1272 **Biology and Biochemistry**, v. 70, p. 229–236, 2014.
- 1273 LIU, P.; WANG, Q.; YAN, D.; FANG, W.; MAO, L.; WANG, D.; LI, Y.; OUYANG, C.; GUO,  
1274 M.; CAO, A. Effects of Biochar Amendment on Chloropicrin Adsorption and Degradation in  
1275 Soil. **Energies**, v. 9, n. 11, p. 869, 2016.
- 1276 MUEMA, F. M.; RICHARDSON, Y.; KEITA, A.; SAWADOGO, M. An interdisciplinary  
1277 overview on biochar production engineering and its agronomic applications. **Biomass and**  
1278 **Bioenergy**, v. 190, p. 107416, 2024.
- 1279 MULABAGAL, V.; BAAH, D. A.; EGIEBOR, N. O.; SAJJADI, B.; CHEN, W.-Y.;  
1280 VITICOSKI, R. L.; HAYWORTH, J. S. Biochar from biomass: a strategy for carbon dioxide  
1281 sequestration, soil amendment, power generation, CO<sub>2</sub> utilization, and removal of  
1282 perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment. In: **Handbook of**  
1283 **climate change mitigation and adaptation**. : Springer, 2022. p. 1023–1085.
- 1284 NGUYEN, B. T.; LE, L. B.; PHAM, L. P.; NGUYEN, H. T.; TRAN, T. D.; VAN THAI, N.  
1285 The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass (*Pennisetum Purpureum*

- 1286 Schumach) and properties of acidic soils. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113224,  
1287 2021.
- 1288 RAMAVANDI, B. Treatment of water turbidity and bacteria by using a coagulant extracted  
1289 from *Plantago ovata*. **Water Resources and Industry**, v. 6, p. 36–50, 2014.
- 1290 REYES-CABRERA, J.; ERICKSON, J. E.; LEON, R. G.; SILVEIRA, M. L.;  
1291 SOLLENBERGER, L. E. Amending marginal sandy soils with biochar and lignocellulosic  
1292 fermentation residual sustains fertility in elephantgrass bioenergy cropping systems. **Nutrient**  
1293 **Cycling in Agroecosystems**, v. 115, n. 1, p. 69–83, 2019.
- 1294 RIBEIRO JÚNIOR, J. I.; MELO, A. de. Guia prático para utilização do SAEG. **Viçosa: UFV**,  
1295 2008.
- 1296 SANTOS, H. G. dos; JACCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos. **Sistema Brasileiro de**  
1297 **Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl.ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. Disponível em:  
1298 <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>.
- 1299 SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting  
1300 cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil**  
1301 **Science**, v. 162, n. 11, p. 795–807, 1997.
- 1302 SINGH YADAV, S. P.; BHANDARI, S.; BHATTA, D.; POUDEL, A.; BHATTARAI, S.;  
1303 YADAV, P.; GHIMIRE, N.; PAUDEL, Prava; PAUDEL, Pragma; SHRESTHA, J.; OLI, B.  
1304 Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. **Journal of Agriculture**  
1305 **and Food Research**, v. 11, p. 100498, 2023.
- 1306 SOARES, T. F. S. N.; LIMA, I. D. S.; ALMEIDA, A. Q. D.; GONZAGA, M. I. D. S.; FIALHO,  
1307 C. A.; GOMES, I. L. R.; MASSARANDUBA, W. D. M. Substrates Formulated with Biochar  
1308 for Seedling Production of *Moringa oleifera* Lam. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n.  
1309 4, p. 515, 2019.
- 1310 SPARREVIK, M.; LINDHJEM, H.; ANDRIA, V.; FET, A. M.; CORNELISSEN, G.  
1311 Environmental and Socioeconomic Impacts of Utilizing Waste for Biochar in Rural Areas in  
1312 Indonesia—A Systems Perspective. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 9, p.  
1313 4664–4671, 2014.
- 1314 TEIXEIRA, P.; DONAGEMMA, G.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. **Manual de métodos de**  
1315 **análise de solos**. 3 ediçãoed. : Embrapa, 2017.
- 1316 THAPA, R. B.; BUDHATHOKI, S.; SHILPAKAR, C.; PANDAY, D.; ALSUNUSE, B.;  
1317 TANG, S. X.; STAHL, P. D. Enhancing Corn Yield and Soil Quality in Irrigated Semiarid  
1318 Region with Coal Char and Biochar Amendments. **Soil Systems**, v. 8, n. 3, p. 82, 2024.
- 1319 VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Symposium: carbohydrate  
1320 methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. **Journal of dairy**  
1321 **science**, v. 74, n. 10, p. 3583–3597, 1991.
- 1322 WANG, L.; OK, Y. S.; TSANG, D. C.; ALESSI, D. S.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; MAŠEK,  
1323 O.; HOU, R.; O'CONNOR, D.; HOU, D. New trends in biochar pyrolysis and modification  
1324 strategies: feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil  
1325 amendment. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 3, p. 358–386, 2020.

- 1326 WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total  
1327 carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of**  
1328 **plant physiology**, v. 144, n. 3, p. 307–313, 1994.
- 1329 WRB, I.-W. World reference base for soil resources 2014. **Update**, v. 201, n. 5, 2015.
- 1330 XIAO, X.; CHEN, Z.; CHEN, B. H/C atomic ratio as a smart linkage between pyrolytic  
1331 temperatures, aromatic clusters and sorption properties of biochars derived from diverse  
1332 precursory materials. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 22644, 2016.
- 1333 YADAV, S. P. S.; BHANDARI, S.; BHATTA, D.; POUDEL, A.; BHATTARAI, S.; YADAV,  
1334 P.; GHIMIRE, N.; PAUDEL, Prava; PAUDEL, Pragya; SHRESTHA, J. Biochar application:  
1335 A sustainable approach to improve soil health. **Journal of Agriculture and Food Research**,  
1336 v. 11, p. 100498, 2023.
- 1337 YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of  
1338 organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p.  
1339 1467–1476, 1988.
- 1340 ZHANG, R.; QU, Z.; LIU, L.; YANG, W.; WANG, L.; LI, J.; ZHANG, D. Soil respiration and  
1341 organic carbon response to biochar and their influencing factors. **Atmosphere**, v. 13, n. 12, p.  
1342 2038, 2022.
- 1343 ZUBAIRU, A. M.; MICHÉLI, E.; OCANSEY, C. M.; BOROS, N.; RÉTHÁTI, G.;  
1344 LEHOCZKY, É.; GULYÁS, M. Biochar improves soil fertility and crop performance: A case  
1345 study of Nigeria. **Soil Systems**, v. 7, n. 4, p. 105, 2023.
- 1346