



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E
SOCIEDADE
MESTRADO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE

GUTIERRES SILVA MEDEIROS AQUINO

***BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr.
Cam.): UMA ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS
DE ESPÉCIES FLORESTAIS SOB CONDIÇÕES DE SALINIDADE**

MOSSORÓ

2025

***BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.): UMA ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS SOB CONDIÇÕES DE SALINIDADE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Campus de Mossoró, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Orientadora: Dra. Narjara Walessa Nogueira de Freitas

Coorientador: Dr. Rômulo Magno Oliveira de Freitas

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.

A657b Aquino, Gutierres Silva Medeiros.
Biochar de resíduos de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.): uma estratégia sustentável para a produção de mudas de espécies florestais sob condições de salinidade / Gutierres Silva Medeiros Aquino. - 2025.
92 f. : il.

Orientadora: Narjara Walessa Nogueira de Freitas.

Coorientador: Romulo Magno Oliveira de Freitas.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2025.

1. Biocarvão. 2. Sustentabilidade. 3. Espécies florestais. 4. Estresse salino. I. Freitas, Narjara Walessa Nogueira de, orient. II. Freitas, Romulo Magno Oliveira 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.

Gutierrez Silva Medeiros Aquino

BIOCHAR DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (Spondias tuberosa Arr. Cam.): UMA ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS SOB CONDIÇÕES DE SALINIDADE

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus de Mossoró, como parte das exigências para a obtenção de título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Orientadora: Profa. Dra. Narjara Walessa Nogueira de Freitas

Coorientador: Prof. Dr. Rômulo Magno Oliveira de Freitas

Defendida em: 28 / 11 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **NARJARA WALESSA NOGUEIRA DE FREITAS**
Data: 27/02/2026 11:35:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Narjara Walessa Nogueira de Freitas
(UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Rômulo Magno Oliveira de Freitas
(IFRN)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **MARIA IRAILDES DE ALMEIDA SILVA MATIAS**
Data: 01/03/2026 13:58:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria Iraíldes de Almeida Silva Matias
(IFBaiano)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **KLEANE TARGINO OLIVEIRA PEREIRA**
Data: 27/02/2026 11:50:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Kleane Targino Oliveira Pereira
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **CAIO CESAR PEREIRA LEAL**
Data: 27/02/2026 11:55:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Caio César Pereira Leal
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter tornado esse sonho possível e conduzido tudo da melhor forma, pela Sua vontade.

À Ufersa, pela oportunidade e condições propiciadas ao longo do curso de mestrado, contribuindo fortemente para o meu crescimento profissional e pessoal.

À minha orientadora, Profa. Dra. Narjara Walessa Nogueira de Freitas e ao meu coorientador, Prof. Dr. Rômulo Magno Oliveira de Freitas por todo ensinamento, apoio e direcionamento ao longo deste projeto.

À minha família, pelo suporte, cuidado e incentivo diário. Sua presença e encorajamento foram fundamentais para que eu mantivesse o foco e a determinação.

À minha querida esposa Renata, por compreensão, paciência e constante presença ao meu lado durante esta jornada. Seu apoio emocional e acadêmico foi essencial nos momentos de maior desafio, me dando força e serenidade. Sem sua dedicação e incentivo, esse trabalho não seria possível. Esse resultado é também fruto do seu amor e companheirismo.

A todos os integrantes do nosso grupo de pesquisa e parceiros, Profa. Dra. Poliana Coqueiro Dias, Felipe Loan, Jefferson Silva, Sarah Lima, Thamiris Aguiar, Vivian Silva, Wandalla Brenda, Iuri Uchôa, Ana Beatriz, Ingrid Lima, Marcos Ilson, Breno Eduardo e a técnica de laboratório Lidianne Martins pela força nas tarefas diárias e de rotina. Suporte essencial para os resultados acontecerem.

Só tenho a agradecer. A todos, o meu muito obrigado!

RESUMO

O *biochar* é um material rico em carbono, resultante da degradação térmica de resíduos orgânicos, como resíduos agrícolas e florestais, cujas propriedades físicas e químicas variam conforme a matéria-prima, a temperatura de pirólise e o tempo de residência empregados em sua produção. Esse produto apresenta potencial de aplicação em diferentes setores, como químico, farmacêutico e agrícola, destacando-se como uma tecnologia promissora na produção de mudas para mitigação dos efeitos adversos da salinidade. Dessa forma, objetivou-se com o presente trabalho avaliar as características físico-químicas de *biochar* de resíduos de frutos de umbu sob diferentes temperaturas de pirólise e tempo de residência, bem como o seu efeito no crescimento de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke e *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. em condição de salinidade (4,3 dSm⁻¹). Para o experimento do primeiro capítulo adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 x 2, três temperaturas de pirólise (300, 500 e 700 °C) e dois tempos de residência (2 e 3 h). O produto obtido foi caracterizado quanto ao teor de cinzas, teor de voláteis, teor de carbono fixo, rendimento e estrutura superficial em microscopia eletrônica de varredura (MEV), além dos teores de macro e micronutrientes. No segundo e terceiro capítulos os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação adotando o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial de 2 x 5, duas águas de irrigação (potável e salina) e cinco doses de *biochar* (0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹). Analisou-se as seguintes variáveis de crescimento em mudas de jurema-branca (*P. stipulacea*) e sabiá (*M. caesalpiniiifolia*): comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), diâmetro do colo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC) e massa seca total (MST), Índice de Robustez (IR) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD). A produção de *biochar* de resíduos de frutos de umbu na temperatura de pirólise de 700 °C associado ao tempo de residência de 3 h mostrou-se uma alternativa viável como condicionador do solo através de potencial disponibilidade de nutrientes para plantas. A dose de 60 t ha⁻¹ de *biochar* de resíduo de frutos de umbu foi a que proporcionou maiores ganhos no desenvolvimento das mudas de jurema-branca e sabiá em condição de salinidade, demonstrando que esse produto pode ser empregado como condicionador do solo com excesso de sais.

Palavras-Chave: biocarvão, sustentabilidade, espécies florestais, salinidade.

ABSTRACT

Biochar is a carbon-rich material resulting from the thermal degradation of organic residues, such as agricultural and forestry wastes, whose physical and chemical properties vary according to the feedstock, pyrolysis temperature, and residence time used in its production. This product shows potential for application in different sectors, such as the chemical, pharmaceutical, and agricultural sectors, and stands out as a promising technology in seedling production for mitigating the adverse effects of salt stress. Thus, the objective of the present study was to evaluate the physicochemical characteristics of *biochar* produced from umbu fruit residues under different pyrolysis temperatures and residence times, as well as its effect on the growth of seedlings of *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke and *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. under saline conditions (4.3 dS m⁻¹). For the experiment described in the first chapter, a completely randomized design (CRD) was adopted in a 3 × 2 factorial arrangement, with three pyrolysis temperatures (300, 500, and 700 °C) and two residence times (2 and 3 h). The obtained product was characterized in terms of ash content, volatile matter content, fixed carbon content, yield, and surface structure by scanning electron microscopy (SEM), in addition to macro- and micronutrient contents. In the second and third chapters, the experiments were conducted in a greenhouse using a randomized block design (RBD) in a 2 × 5 factorial arrangement, with two irrigation waters (potable and saline) and five *biochar* doses (0, 15, 30, 45, and 60 t ha⁻¹). The following growth variables were analyzed in seedlings of jurema-branca (*P. stipulacea*) and sabiá (*M. caesalpiniiifolia*): shoot length (SL), root length (RL), stem diameter (SD), number of leaves (NL), leaf area (LA), shoot dry mass (SDM), root dry mass (RDM), stem dry mass (StDM), total dry mass (TDM), Robustness Index (RI), and Dickson Quality Index (DQI). The production of *biochar* from umbu fruit residues at a pyrolysis temperature of 700 °C associated with a residence time of 3 h proved to be a viable alternative as a soil conditioner due to the potential availability of nutrients for plants. The *biochar* dose of 60 t ha⁻¹ provided the greatest gains in the development of jurema-branca and sabiá seedlings under saline conditions, demonstrating that this product can be used as a soil conditioner in soils with excess salts.

Keywords: *biochar*, sustainability, forest species, saline stress

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1	–	Microscopia Eletrônica de Varredura de <i>biochar</i> de resíduo de umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.) em diferentes tempos e temperaturas. Mossoró-RN, 2025.....	35
----------	---	---	----

CAPÍTULO 2

Figura 1	–	Localização da área de estudo. Mossoró-RN, 2025.....	55
Figura 2	–	Efeito da salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu na área foliar de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.....	60
Figura 3	–	Efeito da salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu na massa seca da folha (A), caule (B), parte aérea (C), raiz (D) e total (E) de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.....	62
Figura 4	–	Efeito da salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu no Índice de Qualidade de Dickson de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.....	64

CAPÍTULO 3

Figura 1	–	Localização da área de estudo. Mossoró-RN, 2025.....	76
Figura 2	–	Efeito das doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu no comprimento da parte aérea (A), diâmetro do caule (B) e área foliar (C) de mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. Mossoró-RN, 2025.....	82
Figura 3	–	Efeito das doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu na massa seca de folha (A), caule (B), parte aérea (C), raiz (D) e total (E) de mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. Mossoró-RN, 2025.....	86
Figura 4	–	Efeito das doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu no Índice de Qualidade de Dickson (IQD) em mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. Mossoró-RN, 2025.....	87

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1	–	Resumo da análise de variância da caracterização imediata de teor de cinzas, teor de voláteis, carbono fixo e rendimento do <i>biochar</i> de umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.). Mossoró-RN, 2025.....	31
Tabela 2	–	Caracterização imediata dos teores de cinza, voláteis, carbono fixo e rendimento do <i>biochar</i> de umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.) sob diferentes temperaturas e tempo de pirólise. Mossoró-RN, 2025.....	32
Tabela 3	–	Resumo de análise de variância para os teores de macronutrientes (N, P e K), micronutrientes (Fe, Zn, Mn e Cu) e Na em <i>biochar</i> de resíduo de umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.) submetido a diferentes temperaturas e tempo de pirólise. Mossoró-RN, 2025.....	36
Tabela 4	–	Caracterização de macronutrientes (N, P e K) do <i>biochar</i> de umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.) em diferentes períodos de tempo e temperatura de pirólise. Mossoró-RN, 2025.....	37
Tabela 5	–	Caracterização de micronutrientes (Fe, Mn e Cu) e Na do <i>biochar</i> de frutos de umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.) em diferentes períodos de tempo e temperaturas de pirólise. Mossoró-RN, 2025.....	40
Tabela 6	–	Caracterização de zinco do <i>biochar</i> de frutos de umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.) em diferentes temperaturas de pirólise. Mossoró-RN, 2025.....	42

CAPÍTULO 2

Tabela 1	–	Análise física e química dos substratos utilizados para o desenvolvimento inicial de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.....	56
Tabela 2	–	Resumo da análise de variância para comprimento da parte aérea (CPA), raiz (CR), diâmetro do caule (DC) e área foliar (AF) de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke sob condições de salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.....	59

Tabela 3	–	Efeito da salinidade no comprimento da parte aérea (CPA), raiz (CR) e diâmetro do caule (DC) de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.....	59
Tabela 4	–	Resumo da análise de variância do comprimento da massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca da raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST), Índice de Robustez (IR) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke sob condição de salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.....	61
Tabela 5	–	Efeito da salinidade no Índice de Robustez (IR) de mudas de <i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke desenvolvidas em substrato contendo doses de <i>biochar</i> . Mossoró-RN, 2025.....	63

CAPÍTULO 3

Tabela 1	–	Análise física e química dos substratos utilizados para o desenvolvimento inicial de mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. Mossoró-RN, 2025.....	78
Tabela 2	–	Resumo da análise de variância para comprimento da parte aérea (CPA), raiz (CR), diâmetro do caule (DC) e área foliar (AF) de mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. sob condição de salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.....	81
Tabela 3	–	Efeito da salinidade no diâmetro do caule (DC) de mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. cultivadas sob condição de salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.....	83
Tabela 4	–	Resumo da análise de variância para comprimento da massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca da raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST), Índice de Robustez (IR) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. sob condição de salinidade e doses de <i>biochar</i> de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.....	84
Tabela 5	–	Efeito da salinidade na massa seca da folha (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e Índice de Robustez (IR) de mudas de <i>Mimosa</i>	

<i>caesalpiniiifolia</i> Benth. cultivadas em substrato com resíduo de umbu. Mossoró- RN, 2025.....	84
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

N	Nitrogênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
M.O	Matéria Orgânica
P	Fósforo
K	Potássio
Na	Sódio
Ca	Calcio
Mg	Magnésio
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Zn	Zinco
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
CCA	Centro de Ciências Agrárias
CPA	Comprimento da parte aérea
AF	Área foliar
CR	Comprimento da raiz
DC	Diâmetro de caule
MSF	Massa seca da folha
MSR	Massa seca da raiz
MST	Massa seca total
IR	Índice de Robustez
IQD	Índice de Qualidade de Dickson
MSPA	Massa seca da parte aérea
IBI	International <i>Biochar</i> Initiative
SISVAR	Sistema para Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 1	19
1. INTRODUÇÃO	22
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
2.1 Caracterização da área de estudo	25
2.2 Coleta do material	25
2.3 Produção do <i>biochar</i>	25
2.4 Parâmetros físico-químicos avaliados	25
2.4.1 Teor de Cinzas	26
2.4.2 Teor de Materiais Voláteis	26
2.4.3 Teor Carbono Fixo	26
2.4.4 Rendimento do <i>biochar</i>	27
2.4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	27
2.4.6 Determinação de Nitrogênio	27
2.4.7 Determinação de Fósforo	28
2.4.8 Determinação de Potássio	28
2.4.9 Determinação de Sódio	28
2.4.10 Determinação de Cobre.....	29
2.4.11 Determinação de Manganês.....	29
2.4.12 Determinação de Zinco	29
2.4.13 Determinação de Ferro	29
2.5 Análise estatística	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
3.1 Propriedades do <i>biochar</i> e rendimento	31
3.2 Estrutura superficial do <i>biochar</i>	34
3.3 Macronutrientes, micronutrientes e sódio.....	36
4. CONCLUSÃO	43
5. REFERÊNCIAS	44
CAPÍTULO 2	48

1. INTRODUÇÃO	52
2. MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1 Caracterização da área em estudo	55
2.2 Coleta do material.....	55
2.3 Produção do material	55
2.4 Produção de mudas	56
2.5 Delineamento experimental.....	58
2.6 Análise estatística	58
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4. CONCLUSÃO	65
5. REFERÊNCIAS	66
CAPÍTULO 3	69
1. INTRODUÇÃO	73
2. MATERIAL E MÉTODOS	76
2.1 Caracterização da área em estudo	76
2.2 Coleta do material	76
2.3 Produção do material	76
2.4 Produção das mudas	78
2.5 Delineamento experimental.....	80
2.6 Análise estatística	80
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4. CONCLUSÃO	88
5. REFERÊNCIAS	89

INTRODUÇÃO GERAL

Toneladas de resíduos orgânicos são geradas diariamente no Brasil, principalmente por atividades agrícolas. Esses resíduos, quando descartados de maneira irregular, podem causar problemas ambientais significativos como eutrofização de recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa, tais como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. Além disso, tais resíduos podem atrair insetos e outros animais vetores de doenças para os seres humanos (Trombetta *et al.*, 2020; Benega *et al.*, 2022). Destacando, assim, a necessidade de tecnologias que visem o aproveitamento destes resíduos.

Entre esses resíduos, vale destacar os gerados no processamento de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.), uma espécie frutífera nativa da Caatinga (região semiárida do Brasil), de grande porte, com frutos compostos por 68% de polpa, 22% de casca e 10% de semente (Xavier *et al.*, 2022). Uma árvore adulta pode produzir em torno de 300 kg do fruto por safra. Além de serem consumidos *in natura*, os frutos também são amplamente utilizados na produção de sorvetes, sucos e polpas congeladas. Desses processos, em torno de 30% de resíduos são gerados, envolvendo casca e semente (Barreto e Castro, 2010).

Uma alternativa sustentável de destinação ambiental dos resíduos agroindustriais é a utilização na composição de substratos, visando reduzir custos de produção, e constituindo uma forma de mitigar impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos resíduos (Muniz *et al.*, 2020). Esses compostos podem influenciar positivamente a qualidade do substrato e também das mudas, promovendo maior crescimento através da disponibilidade de nutrientes e garantindo mudas de alta qualidade, com maior possibilidade de sobrevivência em campo (Souza, Passos e Gonçalves, 2023).

Nesse contexto, o *biochar* surge como uma tecnologia limpa para o aproveitamento de resíduos orgânicos, como os gerados no processamento dos frutos de umbu.

O *biochar*, é um material carbonáceo, oriundo de biomassa, o qual pode ser produzido pelo processo de pirólise (degradação termoquímica sob condições de ausência ou presença reduzida de oxigênio). Esse material possui propriedades físicas e químicas que precisam ser estudadas e que variam conforme a matéria-prima, a temperatura e o tempo do processo. Entre as propriedades, pode-se citar o teor de cinzas, o teor de voláteis, o teor de carbono fixo, a porosidade, o pH e a CTC. Tais propriedades se relacionam não só com funções ambientais, mas também agrícolas, como, por exemplo,

o sequestro de carbono, a adsorção de poluentes no solo e a água, a retenção de água, bem como melhorias na fertilidade dos solos e a atenuação de efeitos deletérios causados pela salinidade (Xie *et al.*, 2022; Ahmed *et al.*, 2024).

Com isso, a aplicação de *biochar* em substrato de mudas pode ser um fator chave para garantir a produção de mudas de espécies florestais de alta qualidade e com maior tolerância a estresses abióticos, como o salino. Entre essas espécies, merecem destaque a jurema-branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke) e o sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.).

A jurema-branca e o sabiá são espécies florestais nativas do bioma Caatinga, de porte médio, com altura entre 2 e 4 metros. São utilizadas na composição de projetos de recuperação de áreas degradadas, principalmente pelo fato de serem espécies pioneiras e fixadoras de nitrogênio. Além disso, as espécies possuem usos medicinais, fornecem pólen para a apicultura, e suas madeiras podem ser utilizadas na produção de ferramentas (Maia, 2012). Apesar dessa importância, ainda existe a necessidade de estudos que contribuam para o estabelecimento de mudas de jurema e de sabiá em campo, principalmente sob condições adversas.

Entre as condições adversas as quais as mudas são submetidas em campo, salienta-se os estresses abióticos. O estresse salino é capaz de causar redução na absorção de água pelas plantas e alterações no potencial osmótico, resultando em distúrbios nas relações hídricas, em virtude da presença de altos teores de sais. Isso pode afetar negativamente as plantas de diversas formas como dificuldade de absorção de nutrientes, alterações fisiológicas e bioquímicas decorrentes do fechamento dos estômatos, redução da transpiração e da fotossíntese, comprometendo a qualidade das mudas (Sousa *et al.*, 2022, 2021).

Considerando o clima semiárido em que a jurema-branca e o sabiá estão inseridos, que possui solos com alto teor de salinidade em decorrência dos baixos índices de pluviosidade, da elevada evapotranspiração e de irrigações com água de moderado a alto teor de sais (Gheyi, 2016), o desenvolvimento de tecnologias como o *biochar*, capazes de amenizar os efeitos da salinidade nas mudas das espécies florestais, torna-se ainda mais urgente.

Estudos envolvendo a caracterização de *biochar* produzido a partir de resíduos de frutos de umbu são escassos na literatura. Ainda mais raros são os estudos relacionando esse *biochar* à produção de mudas de jurema-branca e sabiá em condições de salinidade, o que reforça a necessidade de se compreender essa relação.

Diante disso, objetivou-se com o presente trabalho caracterizar e avaliar o uso do *biochar* obtido de resíduos de frutos de umbu como uma estratégia sustentável na produção de mudas de jurema-branca e sabiá sob condições de salinidade da água de irrigação. A dissertação está dividida em três capítulos, sendo o primeiro sobre a caracterização física e química do *biochar* produzido a partir de resíduos de frutos de umbu. O segundo e terceiro capítulos avaliam o efeito do *biochar* de umbu na produção de mudas de jurema-branca e sabiá, respectivamente, submetidas à condição de salinidade.

REFERÊNCIAS

- AHMED, N.; DENG, L.; WANG, C.; SHAH, Z.; DENG, L.; LI, Y.; LI, J.; CHACHAR, S.; CHACHAR, Z.; HAYAT, F.; BOZDAR, B.; ANSARI, F.; ALI, R.; GONG, L.; TU, P. Advancements in *Biochar* Modification for Enhanced Phosphorus Utilization in Agriculture. **Land**, v. 13, n. 5, p. 644, maio 2024.
- GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES, E. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2016. 504p.
- MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 1. ed. São Paulo: D & Z Computação Gráfica e Editora, 2012.
- MUNIZ, P. S. B.; NETO, R. C. A.; LUNZ, A. M. P.; ALMEIDA, U. O.; ARAÚJO, J. M. Alternative substrates and controlled-release fertilizer in the production of yellow passion fruit seedlings. **Comunicata Scientiae**, v. 11, p. e3292–e3292, 24 ago. 2020.
- SOUSA, G. G.; SOUSA, H. C.; SANTOS, M. F.; LESSA, C. I. N.; GOMES, S. P. Água salina e adubação nitrogenada na composição foliar e produtividade do milho. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 191–198, 2022.
- SOUSA, H. C.; SOUSA, G. G.; LESSA, C. I. N.; LIMA, A. F. S.; RIBEIRO, R. M. R.; RODRIGUES, F. H. C. Growth and gas exchange of corn under salt stress and nitrogen doses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 174–181, 2021.
- SOUZA, C. O.; PASSOS, R. R.; GONÇALVES, E. O. Biocarvão como condicionar de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 9, p. e2712943156–e2712943156, 2023.
- TROMBETTA, L. J.; TURCHETTO, R.; ROSA, G. M.; VOLPI, G. B.; BARROS, S.; SILVA, V. R. Resíduos orgânicos e suas implicações com o carbono orgânico e microbiota do solo e seus potenciais poderes poluentes / Organic waste and its implications with the organic carbon and soil microbiot and its potential polluting powers. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 43996–44005, 2020.
- XAVIER, V. L.; FEITOZA, G. S.; BARBOSA, J. M. L.; ARAÚJO, K. S.; SILVA, M. V.; CORREIA, M. T.; CANEIRO-DA-CUNHA, M. G. Nutritional and technological potential of Umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) processing by-product flour. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, p. e20200940, 2022.
- XIE, Y.; WANG, L.; LI, H.; WESTHOLM, L. J.; CARVALHO, L.; THORIN, E.; YU, Z.; YU, X.; SKREIBERG, O. A critical review on production, modification and utilization of *biochar*. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 161, p. 105405, 2022.

CAPÍTULO 1
CARACTERIZAÇÃO DE *BIOCHAR* DERIVADO DE RESÍDUOS DE FRUTOS
DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.)

CAPÍTULO 1: CARACTERIZAÇÃO DE *BIOCHAR* DERIVADO DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.)

RESUMO

O *biochar* é um material rico em carbono, produzido a partir da pirólise da biomassa, como resíduos agrícolas e florestais. O potencial uso do *biochar* está relacionado às suas propriedades físicas e químicas, as quais variam de acordo com a matéria-prima utilizada na produção, a temperatura e o tempo de residência aplicados. Entre seus usos, destacam-se o medicinal, a adsorção de poluentes, a retenção de água e o feito condicionante no solo, favorecendo o desenvolvimento de plantas. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as propriedades físico-químicas de *biochar* produzido a partir de resíduos de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em diferentes temperaturas e tempos de residência. Os resíduos de frutos de umbu foram coletados, pirolisados e, após resfriamento procedeu-se às análises. Foram avaliadas três temperaturas (300 °C, 500 °C e 700 °C) e dois tempos de residência (2 h e 3 h). As seguintes variáveis foram analisadas: teor de cinzas, teor de voláteis, teor de carbono fixo, rendimento e estrutura superficial em microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, foram analisados os teores dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), dos micronutrientes ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), bem como o sódio (Na). A produção de *biochar* a partir de resíduos de frutos de umbu mostrou-se uma alternativa viável no combate às mudanças climáticas, por meio do sequestro de carbono, da adsorção de poluentes, bem como condicionador do solo devido à potencial disponibilidade de nutrientes para plantas, principalmente na temperatura de 700 °C a 3 h de tempo de residência.

Palavras-Chave: biocarvão, fixação de carbono, pirólise, propriedades, agricultura sustentável, economia circular

ABSTRACT

Biochar is a carbon-rich material produced through the pyrolysis of biomass, such as agricultural and forestry residues. The potential use of biochar is related to its physical and chemical properties, which vary according to the feedstock used in its production, as well as the temperature and residence time applied. Among its uses, medicinal applications, pollutant adsorption, water retention, and soil conditioning stand out, promoting plant development. In this context, the objective of this study was to characterize the physicochemical properties of biochar produced from umbu fruit residues (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) at different temperatures and residence times. Umbu fruit residues were collected, pyrolyzed, and, after cooling, analyses were performed. Three temperatures (300 °C, 500 °C, and 700 °C) and two residence times (2 h and 3 h) were evaluated. The following variables were analyzed: ash content, volatile matter content, fixed carbon content, yield, and surface structure by scanning electron microscopy (SEM). In addition, the contents of the macronutrients nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K), the micronutrients iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), and zinc (Zn), as well as sodium (Na), were determined. The production of biochar from umbu fruit residues proved to be a viable alternative for combating climate change through carbon sequestration, pollutant adsorption, and soil conditioning due to the potential availability of nutrients for plants, especially at a temperature of 700 °C with a residence time of 3 h.

Keywords: *biochar*, carbon sequestration, pyrolysis, sustainable agriculture, circular economy

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DE *BIOCHAR* DERIVADO DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.)

1. INTRODUÇÃO

O *biochar* é um material rico em carbono, oriundo da degradação térmica de recursos orgânicos, como resíduos agrícolas e florestais (Gul e Whalen, 2016; Vijayaraghavan, 2019). Diversas técnicas têm sido aplicadas para a produção de *biochar*, como a pirólise, gaseificação, torrefação e carbonização hidrotérmica (Ighalo *et al.*, 2023). A pirólise, por sua vez, consiste em um método de produção de *biochar* através de biomassa pré-tratada, que é submetida a elevadas temperaturas em condições de ausência ou baixa quantidade de oxigênio (Aboelela *et al.*, 2023).

Em virtude de suas propriedades, o biocarvão possui alto potencial de aplicação em diversos segmentos. Por exemplo, aplicações de *biochar* podem reduzir as emissões de dióxido de carbono na atmosfera através da promoção do sequestro de carbono, mantendo-o fixo no solo por muitos anos (Neogi *et al.*, 2022). Na nanotecnologia, o *biochar* tem sido utilizado na composição de nanocompósitos como nanofibras de carbono, nanotubos de carbono e nanoesferas de carbono (Esohe Omoriyekomwan *et al.*, 2022). Além disso, estudos recentes na medicina apontam o uso promissor dessa biomassa na administração de medicamentos para o combate ao câncer devido à capacidade de nanoestruturas de carbono reconhecerem seletivamente receptores específicos de células cancerosas (Iannazzo *et al.*, 2022).

Nos recursos hídricos, a porosidade do *biochar* o torna viável para adsorver poluentes, agindo como agente descontaminante de águas residuais. Em recursos edáficos, pesquisas detalham a aplicabilidade do material como condicionador de solo, melhorando a retenção de água, elevação do potencial hidrogeniônico (pH) e da Capacidade de Troca Catiônica (CTC), promovendo maior disponibilidade de nutrientes às plantas, além de contribuir positivamente para a microbiota do solo (Solaiman *et al.*, 2020; Garg *et al.*, 2022).

Por ser um material orgânico, renovável e destinar de forma ambientalmente correta resíduos agrícolas, o *biochar* vem se destacando como solução eficaz para a gestão ambiental. A conversão de resíduos agrícolas em *biochar* é uma possibilidade de eliminá-los ou reutilizá-los com segurança (Van Nguyen *et al.*, 2022; Patel e Panwar, 2023). Além das vantagens ambientais, o *biochar* inclui vantagens tecnológicas, como baixa

condutividade térmica, estabilidade química e baixa inflamabilidade (Maljaee *et al.*, 2021).

Essas vantagens estão intrinsecamente relacionadas com as propriedades físico-químicas do produto, as quais são cruciais para definir potenciais aplicações, destacando a importância de conhecê-lo e caracterizá-lo (Ippolito *et al.*, 2020).

As propriedades físico-químicas do *biochar* podem variar bastante, a depender do tipo de matéria-prima de biomassa, tipos de reatores e condições de operação, tempo de residência, temperatura aplicada, entre outros fatores (Stainer *et al.*, 2010).

Por exemplo, biomassa com alto teor de lignina possui estruturas mais macroporosas após a carbonização, enquanto biomassa com alto teor de celulose produz *biochar* com estruturas microporosas (Joseph *et al.*, 2007). No tocante à temperatura de produção por meio da pirólise, as propriedades físico-químicas também são afetadas durante o processo, visto que temperaturas muito elevadas podem degradar partículas de carbono e afetar a porosidade. De forma semelhante, o tempo de residência também interfere nas condições estruturais do *biochar* (Halim e Swithenbank, 2016).

Entre as principais características físicas que são analisadas, pode-se destacar a densidade aparente, a área superficial específica, obtida por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e a porosidade. Em relação às principais características químicas analisadas no *biochar*, destacam-se o teor de voláteis, o teor de cinzas, o carbono fixo, os micronutrientes (como cobre, manganês, zinco e ferro) e macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio). O resultado dessas características é primordial para definir as propriedades do *biochar*, seja ele oriundo de madeira, de materiais não madeireiro, de resíduos agrícolas ou de esterco, para subsidiar potenciais aplicações (Ippolito *et al.*, 2020).

Resíduos agrícolas são uma importante fonte de material para a produção de *biochar*, com possibilidade de transformá-los em um produto economicamente viável (Sait *et al.*, 2022). Além disso, essa produção pode proporcionar uma destinação final ambientalmente adequada a resíduos orgânicos. Inclusive, quando esses resíduos são oriundos de instituições de organização social como cooperativas de agricultores familiares, a iniciativa passa a ter importância social ainda maior, sendo uma possibilidade de geração de renda para essas entidades.

Estima-se que, em 2023, a produção agrícola global foi de 9,9 bilhões de toneladas (FAO, 2024). Shinde *et al.* (2022) calcularam a produção mundial de resíduos agrícolas, atingindo a valores de 5 bilhões de toneladas entre 2020 e 2021. No Brasil, a geração de

resíduos agrícolas e agroindustriais foi de aproximadamente 640 milhões de toneladas, somente no ano de 2015 (Brasil, 2022).

Entre esses resíduos, pode-se citar aqueles oriundos do processamento de frutos de *Spondias tuberosa* Arr. Cam. Popularmente conhecida como umbu, umbuzeiro e imbuzeiro, a *S. tuberosa* é uma espécie frutífera arbórea endêmica do bioma Caatinga. Seus frutos são verde-amarelados, ricos em vitamina C e outros compostos bioativos, o que os torna bastante consumidos e comercializados tanto *in natura*, quanto em forma de polpa congelada, sorvetes, sucos e doces no Nordeste brasileiro (Batista *et al.*, 2015).

O processamento dos frutos gera resíduos orgânicos compostos por cascas e caroços. Esse material tem potencial de transformação em *biochar*, principalmente devido à disponibilidade regional, à sustentabilidade e à subutilização atual desses resíduos.

Estudos recentes têm analisado as propriedades físico-químicas de *biochar* proveniente de diferentes resíduos agrícolas. Han *et al.* (2021) avaliaram as propriedades, a estabilidade e a adsorção de *biochar* de palha de arroz. Xu *et al.* (2020), ao caracterizar o *biochar* de madeira de pinho, observaram que a temperatura de pirólise afetou significativamente as propriedades. Apesar da disponibilidade de trabalhos relacionados com a caracterização do *biochar* de resíduos agrícolas, pesquisas que busquem caracterizar o *biochar* de resíduos de frutos de umbu ainda são escassas na literatura.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar as propriedades físico-químicas do *biochar* obtido a partir de resíduos de frutos de umbu, considerando diferentes tempos de residência e temperatura de pirólise.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada nos laboratórios de Engenharia Florestal, do Centro de Ciências Agrárias, e em laboratórios do Centro de Pesquisa em Ciências Vegetais do Semi-Árido (CPVSA), ambos pertencentes à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa), localizada na cidade de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte.

O estado está inserido no bioma Caatinga e, conforme classificação climática de Köppen–Geiger, a região apresenta clima do tipo BSh, caracterizado como tropical semiárido (Beck *et al.*, 2018).

2.2 Coleta do material

Os resíduos de umbu utilizados como matéria-prima para a produção de *biochar* foram obtidos em parceria com a Cooperativa dos Agricultores e Agricultoras Familiares de Mossoró e Região (COOAFAM), produtora de polpas de frutas e localizada na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte.

2.3 Produção do *biochar*

Para a produção do *biochar*, os resíduos, compostos por cascas e caroços dos frutos, foram secos ao ar livre, triturados em moinho de facas e, em seguida, colocados em cadinhos de porcelana com tampa, sendo 10 g submetidos ao processo de pirólise em forno do tipo mufla.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 x 2, sendo três temperaturas de pirólise e dois tempos de residência.

Foram avaliadas três temperaturas (300 °C, 500 °C e 700 °C) e dois tempos de pirólise (2 horas e 3 horas). Após o esfriamento dos materiais obtidos na pirólise, estes foram peneirados em peneira de 20 *mesh* e o material retido na peneira de 100 *mesh* foi utilizado para a realização das análises, em triplicata.

2.4 Parâmetros físico-químicos avaliados

Para a caracterização do *biochar*, foram analisados o teor de cinzas, o teor de voláteis, o teor de carbono fixo, o rendimento do *biochar* e a análise da estrutura morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizados nos laboratórios de Engenharia Florestal (UFERSA) e do Centro de Pesquisa em Ciências Vegetais do Semi-Árido (CPVSA/UFERSA).

Além disso, realizou-se a determinação de sódio (Na), macronutrientes (N, P e K), e micronutrientes (Cu, Mn, Fe e Zn), a qual foi realizada no Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (LASAP/CCA/UFRSA), conforme métodos propostos por Silva (2009).

2.4.1 Teor de Cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, utilizou-se a análise termogravimétrica, conforme a norma ASTM D3174, em que 1 g de *biochar* foi colocado em um cadinho sem tampa, levado à mufla a 900 °C por 4 horas. Este método degrada inteiramente a fração orgânica, resultando apenas a fração inorgânica da amostra. Após resfriadas em dessecador, pesou-se a amostra, e o teor de cinzas foi obtido através da seguinte equação:

$$TC\% = \frac{Md}{Mi} = x \ 100$$

Em que:

TC %: teor de cinzas em percentagem de massa

Mi: massa inicial da amostra, em grama (g)

Md: massa da amostra após degradação térmica, em grama (g)

2.4.2 Teor de Materiais Voláteis

O teor de materiais voláteis foi realizado através da norma ASTM D3175-07, em que foi pesado 1 g de *biochar* em um cadinho, levado a mufla à 950 °C durante 6 minutos. Após resfriamento em dessecador, foi verificada a massa do material. A seguinte equação foi utilizada para calcular o teor de materiais voláteis:

$$TMV = \frac{Mi - Ma}{Mi} = x \ 100$$

Em que:

TV: teor de materiais voláteis, dado em percentagem (%)

Mi: massa inicial da amostra, dada em grama (g)

Ma: massa após o aquecimento da amostra, dado em grama (g)

2.4.3 Teor Carbono Fixo

O teor de carbono fixo foi calculado conforme a norma ASTM D3172, através do cálculo da seguinte equação:

$$TCF = 100 - (TMV + TC)$$

Em que:

TCF: teor de carbono fixo, dado em percentagem (%)

100: percentual máximo do material

TMV: teor de materiais voláteis, dado em percentagem (%)

TC: teor de cinzas, dado em percentagem (%)

2.4.4 Rendimento do *biochar*

O rendimento do *biochar* foi calculado através da razão entre a massa da matéria-prima seca e massa do material pirolisado, multiplicado por 100, conforme descrito por Sato *et al.* (2019), por meio da seguinte equação:

$$R = \frac{Ms}{Mp} \times 100$$

Em que:

R: rendimento do *biochar*, dado em percentagem (%)

Ms: matéria-prima seca, dado em gramas (g)

Mp: material pirolisado, dado em gramas (g)

2.4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises das estruturas morfológicas do *biochar* foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (TESCAN, modelo VEGA 3, República Tcheca), operado a 20 kV, ampliação de 500x, por meio de detector de elétrons secundários. Os materiais de análise foram fixados em suporte de alumínio (stubs), com auxílio de fita adesiva de carbono. Em seguida, foram levados para o metalizador à vácuo (Quorum Technologies Ltd, modelo Q150R, Laughton, East Sussex, Inglaterra), durante cinco minutos a 20 mA, sendo os materiais cobertos por uma camada de 9 nm de ouro. Essa cobertura é necessária para que a amostra se torne condutiva, possibilitando a captura das micrografias eletrônicas de varredura.

2.4.6 Determinação de Nitrogênio

Para determinação do nitrogênio foi utilizado o método da destilação – titulação (Kjeldahl), recomendado para um número reduzido de amostras, devido a sua baixa velocidade analítica.

O extrato digerido de H₂SO₄ foi transferido para um destilador Kjeldahl. Um becker de 100 mL contendo 25 mL de H₃BO₃ a 2% foi conectado na ponta do destilador e adicionado 10 mL de NaOH ao digerido. Em seguida, a torneira de vapor de água foi

aberta e destilado até completar 45 mL de solução, momento em que a solução de H_3BO_3 passou de vinho para verde. Posteriormente, realizou-se a titulação com solução de HCl $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, sendo o ponto final da titulação identificado pelo retorno à coloração inicial de cor vinho.

A determinação foi calculada através da seguinte equação:

$$\text{N-NH}_4 \text{ g kg}^{-1} = (V_b - V_a) \times 1,4$$

Em que:

V_a : volume de HCl gasto no branco, em mL

V_b : volume de HCl gasto na amostra, em mL

2.4.7 Determinação de Fósforo

Para a determinação do fósforo foi utilizado o método de espectrofotometria com azul-de-molibdênio.

Foi pipetado 5 mL de solução digerida de H_2SO_4 em um tubo de 30 mL, em que foi adicionado 10 mL da solução diluída de molibdato, adicionada uma pitada de ácido ascórbico e a solução foi agitada. Após 30 minutos, procedeu-se com a leitura no espectrofotômetro a 660 nm.

A determinação foi calculada através da seguinte equação:

$$\text{P g kg}^{-1} = \text{mg L}^{-1} \times 0,5$$

2.4.8 Determinação de Potássio

A determinação de potássio foi realizada por meio do método da fotometria de chama.

Pipetou-se 2 mL da solução da digestão seca em tubo de 30 mL, em que foi completado o volume até 20 mL com H_2O . Em seguida, o fotômetro de chama foi ajustado com a solução padrão de K e a leitura efetuada.

Para a determinação aplicou-se a seguinte equação:

$$\text{K g kg}^{-1} = \text{mg L}^{-1} \times 0,5$$

2.4.9 Determinação de Sódio

Para determinação de sódio, aplicou-se o mesmo da fotometria de chama.

Foi pipetada 2 mL da solução da digestão seca em um tubo de 30 mL, adicionado H_2O (água) até completar o volume de 20 mL. Em seguida, o fotômetro de chama foi ajustado com a solução padrão de Na e procedeu-se com a leitura.

A determinação foi calculada através da seguinte equação:

$$\text{Na mg kg}^{-1} = \text{mg L}^{-1} \times 50$$

2.4.10 Determinação de Cobre

A determinação de cobre foi realizada por meio do método da espectrofotometria absorção atômica (EAA).

Para isso, realizou o ajuste do EAA, de acordo com manual do equipamento, e efetuou-se a leitura da solução padrão e da solução da digestão seca.

Para a determinação aplicou-se o seguinte cálculo:

$$\text{Cu mg kg}^{-1} = \text{mg L}^{-1} \times 50$$

2.4.11 Determinação de Manganês

Para a determinação de manganês nas amostras, foi aplicado o método da espectrofotometria absorção atômica (EAA).

O equipamento foi ajustado, conforme seu manual, e em seguida foi realizada a leitura tanto das soluções padrão de manganês quanto das amostras avaliadas.

Para obtenção dos valores foi aplicada a seguinte equação:

$$\text{Mn mg kg}^{-1} = \text{mg L}^{-1} \times 50$$

2.4.12 Determinação de Zinco

A determinação de zinco foi realizada através do método de espectrofotometria absorção atômica (EAA).

Para isso, realizou a leitura das soluções padrão de zinco e das amostras após ajuste do equipamento de acordo com o manual.

Aplicou o seguinte cálculo para obtenção dos resultados:

$$\text{Zn mg kg}^{-1} = \text{mg L}^{-1} \times 50$$

2.4.13 Determinação de Ferro

Para determinação do ferro nas amostras, aplicou o método da espectrofotometria absorção atômica (EAA).

Desta forma, o equipamento foi regulado, conforme manual próprio, e procedeu com a leitura das soluções padrão de Fe e das amostras.

A determinação foi obtida através da seguinte equação:

$$\text{Fe mg kg}^{-1} = \text{mg L}^{-1} \times 50$$

2.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANAVA) e, quando houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos, foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade, com auxílio do programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o resumo da análise de variância (ANAVA) para as variáveis teor de cinzas, teor de voláteis, carbono fixo e rendimento do *biochar* produzido através de resíduos de frutos de umbu submetidos a diferentes temperaturas e tempos de residência.

Tabela 1. Resumo da análise de variância da caracterização imediata de teor de cinzas, teor de voláteis, carbono fixo e rendimento do *biochar* de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). Mossoró-RN, 2025.

Fontes de Variação	Quadrado médio			
	TC	TV	CF	REND.
Tempo	0,73 ns	485,68**	524,12**	2,32 ns
Temperatura	23,95**	1282,09**	956,93**	520,43**
Tempo x Temperatura	3,52 ns	5,29 ns	0,48 ns	10,25 ns
CV (%)	25,18	11,88	9,04	8,39

TC: teor de cinzas; TV: teor de voláteis; CF: carbono fixo; REND.: rendimento; CV: coeficiente de variação
Fonte: Autor (2025)

Observa-se que a temperatura de pirólise exerceu efeito significativo em todas as variáveis analisadas. Esse efeito foi a 1% de probabilidade, mostrando-se altamente significativo, apontando que, para as condições estudadas, a temperatura é uma fonte de variação determinante. Já o tempo de residência afetou significativamente ($p < 0,01$) os valores obtidos de teor de voláteis e carbono fixo. No entanto, foi não significativo para o teor de cinzas e o rendimento.

No tocante à interação entre as fontes de variação (tempo x temperatura), percebe-se que estas não interferiram significativamente nos valores obtidos no presente trabalho.

3.1 Propriedades do *biochar* e rendimento

A temperatura de 700 °C promoveu o maior teor de cinzas, sendo este valor mais que o dobro do teor de cinzas produzido à 300 °C (Tabela 2). Como observado, o teor de cinzas tende a aumentar à medida que a temperatura aumenta, fatores diretamente ligados. Avornyo *et al.* (2021), caracterizando *biochar* de casca de arroz, também observaram que à medida que a temperatura aumentou o teor de cinzas também se elevou, apontando um padrão regular.

Tabela 2. Caracterização imediata dos teores de cinza, voláteis, carbono fixo e rendimento do *biochar* de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) sob diferentes temperaturas e tempo de pirólise. Mossoró-RN, 2025.

		TC	TV	CF	REND.
		%			
Temperatura de pirólise (°C)	300	3,24 b	58,20 a	38,55 b	35,98 a
	500	6,32 a	34,06 b	59,62 a	23,07 a
	700	6,98 a	31,85 b	61,15 a	17,89 b
Tempo (h)	2	5,31 a	36,17 b	58,50 a	25,29 a
	3	5,72 a	46,56 a	47,71 b	26,01 a

TC: teor de cinzas; TV: teor de voláteis; CF: carbono fixo; REND.: rendimento

Fonte: Autor (2025).

Vale destacar que o teor de cinzas é uma variável importante para que o *biochar* possa ser aplicado na correção da acidez do solo, uma vez que as cinzas são compostas por minerais que ajudam a neutralizar a acidez, como magnésio, cálcio, potássio e sódio.

Além disso, com o aumento da temperatura e, conseqüentemente, teor de cinzas, dependendo da sua composição, o *biochar* pode apresentar alto potencial de uso como fertilizante natural na nutrição de plantas, reduzindo o uso de fertilizantes sintéticos (Yin *et al.*, 2022).

Para esta mesma variável foi possível perceber que o fator tempo não interferiu significativamente nos valores, sendo uma diferença de apenas 0,41% entre o observado no tempo de residência de 2 h e 3 h.

Os teores de voláteis apresentaram comportamento inversamente proporcional ao aumento da temperatura, ou seja, à medida que a temperatura aplicada foi aumentada, a porcentagem de voláteis diminuía. O aumento da temperatura promove maior liberação gasosa, resultando em menor teor de voláteis (Pinheiro e Sèye, 1998). Esse resultado está em consonância com outros trabalhos da literatura, como a caracterização realizada por Marques *et al.* (2022), que produziram *biochar* a partir de palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) e encontraram menor teor de voláteis nas amostras submetidas à maior temperatura estudada.

O fator tempo também afetou de forma significativa os teores de voláteis. O tempo de residência de 3 h apresentou 46,56% de voláteis, diferindo estatisticamente do tempo de residência de 2 h (26,17%).

No que se refere ao teor de carbono fixo, variável importante na análise de *biochar*, tendo em vista sua relação com a estabilidade do material, o presente trabalho

constatou que o aumento da temperatura resultou em maior porcentagem de carbono fixo nas amostras.

Na temperatura de 300 °C, o teor de carbono fixo foi de 38,55%, enquanto a 500 °C e 700 °C não diferiram entre si e apresentaram valores de 59,62% e 61,15%, respectivamente.

De maneira semelhante, Róz *et al.*, (2015), ao investigarem o teor de carbono fixo em *biochar* produzido a partir de resíduos de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus urophylla* ST Blake) identificaram que na menor temperatura aplicada (200 °C) o teor de carbono fixo foi de 10%, enquanto na maior temperatura aplicada (500° C) o teor de carbono fixo foi de 72%.

De acordo com Enebe, Ray e Griffin (2025), o *biochar* produzido através de madeira e resíduos agrícolas como matérias-primas, tendem a apresentar maior teor de carbono fixo.

Essa variável aponta o potencial de utilidade do *biochar* de umbu no combate às mudanças climáticas, visto que um elevado teor de carbono fixo pode manter o carbono estável no solo por milhares de anos, evitando, assim, que esses átomos retornem ao seu ciclo e atuem como precursores de moléculas que contribuem para o aquecimento global (Schmidt *et al.*, 2019).

Desse modo, a estabilidade do carbono fixo ocorre porque temperaturas de pirólise mais elevadas tendem a criar compostos aromáticos de carbono estáveis, além de complexos de silicato-carbono, geralmente considerados recalcitrantes à oxidação microbiana (Guo e Chen, 2014).

O fator tempo também afetou de forma significativa o teor de carbono fixo das amostras, apesar de não ter havido interação com a temperatura. Com 2 h de tempo de residência, as amostras apresentaram 58,50% de carbono fixo, diferindo estatisticamente das submetidas a 3 h, que apresentaram 47,51%.

O rendimento do *biochar* reduziu à medida que a temperatura aumentou. Na temperatura de 300 °C, o rendimento foi de 35,98%, não diferindo estatisticamente do valor obtido a 500 °C, o qual promoveu 23,07% de rendimento. No entanto, a 700 °C, o rendimento foi de apenas 17,58%, sendo 18,40 pontos percentuais a menos em relação à menor temperatura estudada.

Avaliar o rendimento do *biochar* é importante, pois essa variável auxilia no planejamento da quantidade necessária de *biochar* pós-pirólise, como também pode impactar na produção em larga escala. Trabalhos recentes têm demonstrado esse

comportamento de redução do rendimento com o aumento da temperatura de pirólise. Por exemplo, Júnior *et al.* (2022), ao caracterizarem *biochar* de resíduos de açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) e de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) sob as mesmas temperaturas analisadas neste estudo, constataram que, à medida que a temperatura aumentava, o rendimento gravimétrico diminuía, sendo 700 °C a temperatura que mais afetou esta variável. Paralelamente, a temperatura de 300 °C foi a temperatura que menos afetou o rendimento, corroborando com os dados aqui discutidos.

A fonte de variação tempo não promoveu alterações significativas nas amostras nas condições avaliadas, sendo obtida uma média de 25,65% de carbono fixo entre os tempos de 2 h e 3 h, respectivamente.

3.2 Estrutura superficial do *biochar*

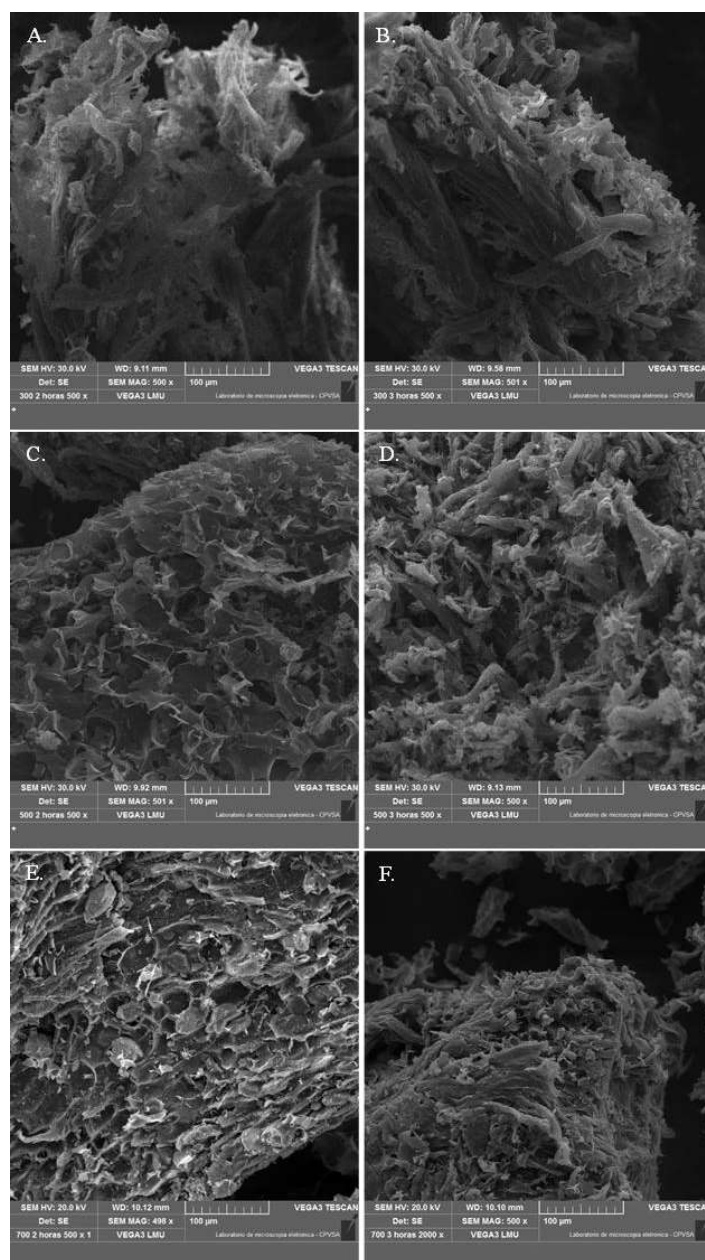
As imagens microscópicas eletrônicas de varredura (Figura 1) evidenciam alterações na área superficial do *biochar*, que se torna mais porosa com o aumento da temperatura. Esse fenômeno está associado à modificação estrutural do material e à liberação de espaço pela volatilização de compostos.

De acordo com Wang *et al.*, (2021), depois da pirólise, poros regulares são formados na estrutura do *biochar*, compondo um arranjo denso e ordenado, sendo um importante fator relacionado com o potencial uso do *biochar* como adsorvente de poluentes, como também pode favorecer a retenção de água no solo e funcionar como habitat de micro-organismos edáficos.

Essas potencialidades de uso ocorrem em virtude do aumento da porosidade do material, haja vista que o material mais poroso possui espaços para reter água e nutrientes, evitando a lixiviação destes. Essas cavidades também podem contribuir para a ecologia de microfauna benéfica no solo. Além disso, do ponto de vista de qualidade ambiental, o material poroso pode ser útil na adsorção de moléculas que contribuem com a poluição do solo ou da água (Wei *et al.*, 2023; Jin *et al.*, 2024; Majeswska e Hanaka, 2025).

A estrutura superficial do *biochar* também possui relação com outras variáveis frequentemente analisadas, conforme observado por autores como Younis *et al.* (2023), os quais relataram que à medida materiais volatilizam, fazem surgir cavidades (poros) no *biochar*. Ou seja, quanto menor o teor de voláteis, maior tende a ser a porosidade.

Figura 1. Microscopia Eletrônica de Varredura de *biochar* de resíduo de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em diferentes tempos e temperaturas. A: 300 °C a 2 h, B: 300 °C a 3 h; C: 500 °C a 2 h, D: 500 °C a 3 h; E: 700 °C 2 h e F: 700 °C a 3 h. Mossoró-RN, 2025.



Fonte: Autor (2025).

Pesquisas apontam que o teor de carbono fixo também possui relação com a porosidade, pois com o aumento da temperatura a estrutura do material se torna mais aromática e condensada, promovendo a estabilização da estrutura porosa do *biochar* (Venkatesh *et al.*, 2022).

3.3 Macronutrientes, micronutrientes e sódio

De acordo com o resumo da análise de variância (ANAVA) dos teores de macronutrientes, micronutrientes e sódio, presente na Tabela 3, depreende-se que a interação da temperatura com o tempo foi o fator que mais influenciou na concentração dos nutrientes, exceto para o zinco. A temperatura foi segundo fator que mais influenciou nos valores, seguido do fator tempo.

Tabela 3. Resumo de análise de variância para os teores de macronutrientes (N, P e K), micronutrientes (Fe, Zn, Mn e Cu) e Na em *biochar* de resíduo de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) submetido a diferentes temperaturas e tempo de pirólise. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de Variação	Quadrado médio							
	N	P	K	Fe	Zn	Mn	Cu	Na
Tempo (To)	0,12**	14,04 *	1813,42**	2,38**	0,007 ns	0,005*	0,0006 ns	700,75 ns
Temperatura (Ta)	0,02 ns	136,0**	5659,04**	6,45**	0,118**	0,002 ns	0,099**	3612,95**
To x Ta	0,14**	19,87*	835,49*	3,29**	0,008 ns	0,036**	0,020**	2398,03**
CV (%)	15,78	21,11	13,85	10,96	13,28	14,12	10,88	12,58

CV: Coeficiente de variância; ns: efeito não significativo; *: efeito significativo a 5%; **: efeito significativo a 1%.

Fonte: Autor (2025).

Em relação aos teores de nitrogênio, observou-se que tanto o tempo quanto a interação do tempo com a temperatura foram capazes de detectar alterações significativas nas amostras. No entanto, a temperatura não promoveu efeito significativo para esse nutriente.

Para o fósforo, a análise de variância mostrou que todas as fontes de variação influenciaram nos teores do nutriente nas condições analisadas. Por exemplo, a temperatura foi capaz de promover alterações altamente significativas ($p < 0,01$), enquanto o tempo e a combinação tempo e temperatura promoveram alterações significativas a 5% de probabilidade, apontando resposta combinada dos fatores.

No que se refere aos teores de potássio, a análise estatística mostra que tanto o tempo quanto a temperatura de forma isolada, como também a combinação desses fatores afetou significativamente os teores do nutriente, mostrando que o aumento do teor de potássio no *biochar* aumenta de acordo com as condições de pirólise.

Todos os fatores influenciaram de maneira altamente significativa ($p < 0,01$) os teores de ferro, atestando a sua influência na concentração final do *biochar* resíduos de frutos de umbu.

Para o zinco, somente a temperatura influenciou de maneira significativa sua concentração, apontando que o principal fator que causa variações para esse micronutriente é o aquecimento.

Já o manganês não sofreu alteração significativa com as temperaturas analisadas. No entanto, para este nutriente, a interação do tempo com a temperatura foi o fator que mais influenciou nos valores, sendo altamente significativo ($p < 0,01$). O tempo também afetou os valores, sendo significativos a 5% de probabilidade.

A disponibilidade de cobre foi afetada principalmente pela temperatura e pela interação do tempo com a temperatura, sendo que, de forma isolada, o tempo não foi capaz de influenciar na concentração do micronutriente em questão.

No que se refere ao sódio, a análise de variância mostra que a temperatura e a interação do tempo com a temperatura foram capazes de afetar de forma significativa sua concentração. O fator tempo não exerceu influência significativa nos valores.

Para o nitrogênio, a temperatura de 300 °C por 3 h proporcionou maiores valores (0,87 g/kg) em relação ao tempo de 2 h (0,62 g/kg). Entretanto, ao aplicar a temperatura de 500 °C de pirólise, não houve diferença estatística entre os tempos de residência analisados. Já sob a temperatura de 700 °C, o tempo de residência de 3 h proporcionou valores mais acentuados (acrécimo de 46,1%) em relação ao tempo de residência de 2 h (Tabela 4).

Tabela 4. Caracterização de macronutrientes (N, P e K) do *biochar* de resíduos de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em diferentes períodos de tempo e temperatura de pirólise. Mossoró-RN, 2025.

Temperatura (°C)	N		P		K	
	g kg		mg dm ³			
	Tempo de pirólise (h)		Tempo de pirólise (h)		Tempo de pirólise (h)	
	2	3	2	3	2	3
300	0,62 Bab	0,87 Aa	3,0 Ab	2,88 Ac	46,47 Bb	58,30 Ac
500	0,71 Aa	0,53 Ab	9,68 Aa	9,14 Ab	91,46 Aa	93,15 Ab
700	0,48 Bb	0,89 Aa	9,24 Ba	15,21 Aa	89,43 Ba	136,12 Aa

N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; letras maiúsculas: diferença estatística entre tempos; letras minúsculas: diferença estatística entre temperaturas.

Fonte: Autor (2025).

Analisando o diferimento estatístico entre as temperaturas em cada tempo de residência, pode-se notar que no tempo de residência de 2 h, a temperatura de 500°

proporcionou teor de 0,71 g/kg de nitrogênio do *biochar*, sendo estatisticamente superior aos valores observados nas temperaturas de 300 °C (0,62 g/kg) e 700 °C (0,48 g/kg). Em relação ao tempo de residência de 3 h, não houve diferença estatística entre as três temperaturas avaliadas.

Avornyo *et al.* (2021), avaliando o teor de nitrogênio em amostras de casca de arroz, também perceberam que a 500 °C de pirólise os teores de nitrogênio foram maiores em relação à temperatura de 300 °C e 700 °C. No entanto, também não houve uma tendência clara de aumento. Os autores citaram como provável motivo o fato de o nitrogênio ser um componente muito volátil.

O nitrogênio é um macronutriente primário essencial às plantas, influenciando diretamente na fisiologia vegetal. Além disso, a sua deficiência pode acarretar inúmeros prejuízos no desenvolvimento das plantas, interferindo na produção (Wang *et al.*, 2024). Com isso, é importante identificar fontes alternativas de fornecimento do nutriente, como encontrado no *biochar* de resíduos de frutos de umbu.

O fósforo é outro macronutriente que tem sua importância no desenvolvimento vegetal, assim como o nitrogênio. No presente estudo, observou-se a presença desse nutriente no material estudado. Por exemplo, nas temperaturas de 300 °C e 500 °C por duas horas, não houve diferença estatística para as concentrações de P. No entanto, na temperatura de 700 °C, houve diferença estatística entre os tempos de residência, sendo que, a 700 °C por 3 h de tempo de residência, o teor de fósforo é de 15,21 mg/dm³, já por 2 h esse valor é de 9,24 mg/dm³, havendo um incremento de aproximadamente 40% do primeiro tempo para o segundo.

Ao analisar os dados das diferentes temperaturas em cada tempo de residência, depreende-se as temperaturas 500 °C e 700 °C promoveram as maiores concentrações de fósforo no tempo de 2 h de residência, 9,68 e 9,24 mg/dm³, respectivamente, sendo cada valor quase o triplo da concentração encontrada a 300 °C, que foi de 3 mg/dm³.

Murtaza *et al.* (2024), caracterizando *biochar* de casca de berinjela perceberam que o aumento da temperatura de 300 °C para 600 °C por 2 h, promoveu aumento gradativo na concentração de fósforo. No presente estudo esse comportamento foi observado no tempo de 3 h de pirólise a 700 °C.

No tocante às concentrações de potássio, quando o *biochar* foi submetido a 300 °C, observou-se que o tempo de pirólise de 3 h proporcionou valores mais acentuados do nutriente (58,30 mg/dm³), sendo superior ao valor de 46,47 mg/dm³ encontrado no tempo de 2 h.

Já a 500 °C de temperatura de pirólise, os teores não diferiram entre si nos tempos avaliados, ficando em aproximadamente 92 mg/dm³. No entanto, vale destacar que a temperatura de 700 °C, a 3 h, produziu 136,12 mg/dm³ em relação ao tempo de 2 h (89,43 mg/dm³), um incremento de 34,3%.

Dentro de cada tempo de pirólise é possível constatar que as temperaturas 500 °C e 700 °C foram as temperaturas que proporcionaram maiores concentrações de potássio a 2 h. Já a 3 h, a temperatura de 700 °C proporcionou um valor 57% superior ao observado na temperatura de 300 °C. Isso mostra que, para a obtenção de maiores teores de potássio de *biochar* de umbu, deve-se aplicar a maior temperatura aliado ao maior tempo de pirólise analisado.

Caracterizando a concentração de potássio em resíduo de frutos de coco-de-espinho (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd.), León-Ovelar, Fernández-Boy e Knicker (2022) relataram que o aumento da temperatura e do tempo de residência promoveu aumento gradativo do teor de potássio, de forma semelhante aos resultados aqui encontrados.

Biochar que não tem como matéria-prima madeira geralmente exibem níveis mais altos de potássio em comparação com àqueles produzidos através de madeira (N. Diagboya *et al.*, 2024), corroborando com os resultados observados para este nutriente no presente estudo.

Vale destacar que o potássio exerce papel essencial na fisiologia das plantas, influenciando diretamente na sua produtividade. Além disso, o nutriente pode atuar minimizando significativamente estresses abióticos e bióticos (Zielewicz *et al.*, 2022), o que torna potencial o uso do *biochar* de resíduos de frutos de umbu na fertilização natural de macronutrientes para plantas.

Complementando a caracterização nutricional do *biochar*, a Tabela 5 traz os resultados referentes à análise de micronutrientes e também de sódio. Apesar deste não ser considerado um nutriente, mas é um elemento importante de ser analisado.

Tabela 5. Caracterização de micronutrientes (Fe, Mn e Cu) e Na do *biochar* de resíduos de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em diferentes períodos e temperaturas de pirólise. Mossoró-RN, 2025.

Temperatura (°C)	Fe		Mn		Cu		Na	
	mg dm³							
	Tempo de pirólise (h)		Tempo de pirólise (h)		Tempo de pirólise (h)		Tempo de pirólise (h)	
	2	3	2	3	2	3	2	3
300	1,86 Ab	2,16 Ac	0,31 Aa	0,11 Bc	0,29 Ab	0,21 Bc	85,42 Ab	67,71 Ac
500	4,29 Aa	3,80 Ab	0,22 Ab	0,22 Ab	0,42 Aa	0,40 Ab	117,18 Aa	114,51 Ab
700	2,18 Bb	4,56 Aa	0,20 Bb	0,30 Aa	0,43 Ba	0,58 Aa	92,78 Bab	150,60 Aa

Fe: ferro; Mn: manganês; Cu: cobre; Na: sódio; letras maiúsculas: diferença estatística entre tempos; letras minúsculas: diferença estatística entre temperaturas.

Fonte: Autor (2025).

As temperaturas avaliadas não foram suficientes para diferir estatisticamente as concentrações de ferro nos tempos de pirólise estudados, exceto para 700 °C, que apresentou concentrações superiores no tempo de 3 h (Tabela 5). Dentro de cada tempo, foi possível classificar as melhores temperaturas. Por exemplo, para o tempo de pirólise 2 h, a temperatura de 500 °C produziu maior teor de ferro em relação aos obtidos a 300 °C e 700 °C. A concentração de ferro obtida em 500 °C foi 56,5% superior ao obtido a 300 °C, evidenciando que, no tempo de pirólise de 2 h, a temperatura de 500 °C é mais apropriada para a obter maiores concentrações de ferro. Já quando atentamos aos valores obtidos a 3 h, percebe-se que a temperatura de 700 °C proporcionou maior teor de ferro (4,56 mg dm³), diferindo estatisticamente das demais temperaturas no mesmo tempo (3,80 mg/dm³ a 500 °C e 2,16 mg/dm³ a 300 °C, respectivamente).

Outro importante micronutriente é o manganês. Durante a produção do *biochar* de resíduos de frutos de umbu foi possível obter concentrações desse elemento. A 300 °C, o tempo de pirólise de 2 h proporcionou valores significativos de ferro, alcançando 0,31 mg/dm³, enquanto no tempo de 3 h o valor foi de 0,11 mg/dm³. A temperatura de 500 °C não foi suficiente para diferir as concentrações estatisticamente nos dois tempos estudados. Já a 700 °C, no tempo máximo (3 h), o teor de manganês se sobressaiu em comparação com o tempo mínimo.

Dentro dos tempos de pirólise é possível perceber que, a 2 h, houve diferença estatística significativa a 300 °C, em que o teor de manganês foi de 0,31 mg/dm³, ao passo o que, a 3 h, a maior temperatura avaliada é que promoveu uma maior produção do

nutriente ($0,30 \text{ mg/dm}^3$), quase o triplo do observado a 300°C , correspondendo a $0,11 \text{ mg/dm}^3$.

Em relação à concentração de cobre, as temperaturas de 300°C e 500°C de pirólise foram suficientes para detectar diferença estatística. A 300°C , a quantidade de cobre produzido durante 2 h de tempo de pirólise foi de $0,29 \text{ mg/dm}^3$, enquanto a 3 h foi de $0,21 \text{ mg/dm}^3$. Apesar de ser uma tímida diferença, é pertinente ao analisarmos os valores promovidos pela temperatura de 700°C , a qual promoveu $0,58 \text{ mg/dm}^3$ de ferro quando o *biochar* foi submetido a esta temperatura durante 3 h.

Dentro do tempo de 2 h, os valores influenciados pelas temperaturas 500°C e 700°C não diferiram entre si, mas foram superiores às concentrações quantificadas na temperatura de 300°C . Além disso, a concentração de Cu dentro do tempo de 3 h nas diferentes temperaturas foi maior à 700°C ($0,58 \text{ mg/dm}^3$). Esse resultado evidencia que, obter uma maior quantidade desse nutriente, deve-se aplicar os fatores máximos do presente estudo nessas condições.

Em relação às concentrações de sódio no *biochar*, observa-se que somente a temperatura de 700°C foi capaz de detectar diferença significativa na quantidade do elemento, chegando a valores de 150 mg/dm^3 a 3 h de produção. Dentro de cada tempo é possível depreender que, a 2 h, a temperatura de 500°C proporcionou $117,18 \text{ mg/dm}^3$ de sódio, diferindo estatisticamente dos valores apresentados na temperatura de 300°C ($85,42 \text{ mg/dm}^3$) e 700°C ($92,78 \text{ mg/dm}^3$). Já examinando os valores obtidos dentro do tempo de 3 h de pirólise, pode-se perceber que os valores diferiram entre si sendo que a maior temperatura acarretou a maior concentração de sódio ($150,60 \text{ mg/dm}^3$). A temperatura de 500°C apresentou valor intermediário de $114,51 \text{ mg/dm}^3$, enquanto a menor temperatura apresentou valor menor de $67,71 \text{ mg/dm}^3$. Para esse elemento, no tempo de 3h, à medida que a temperatura aumentou, os teores de sódio também aumentaram.

As concentrações de zinco só foram afetadas pela temperatura, apontando que esta é o principal fator relacionado com a disponibilização do micronutrientes (Tabela 6).

Tabela 6. Caracterização de zinco do *biochar* de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em diferentes temperaturas de pirólise. Mossoró-RN, 2025.

Temperatura de pirólise (°C)	Zn mg dm ³
300	0,39 c
500	0,67 a
700	0,50 b

Zn: zinco; Letras minúsculas: diferença estatística entre as temperaturas.

Fonte: Autor (2025).

De acordo com os dados, a temperatura de 500 °C foi a que proporcionou maior concentração de zinco (0,67 mg/dm³) entre as temperaturas estudadas, tendo diferenciado estatisticamente dos valores obtidos a 700 °C (0,50 mg/dm³) e a 300 °C (0,39 mg/dm³).

De modo geral, no tempo de 3 h de residência, a elevação da temperatura também aumentou a concentração de micronutrientes, principalmente à 700 °C. Resultados semelhantes foram encontrados por Torres *et al.* (2025) analisando o teor de micronutrientes em *biochar* produzido a partir de casca de coco, em que a partir de 300° C os teores dos nutrientes começaram a aumentar, apontando seu potencial uso em suprir tais elementos às plantas.

Diante do exposto, evidencia-se o potencial de uso do *biochar* de frutos de umbu como fertilizante natural para plantas em substituição aos fertilizantes sintéticos, os quais exercem pressão no meio ambiente podendo contribuir com a poluição dos solos, dos recursos hídricos e também da fauna e da flora. Não só isso, mas também contribuir com comunidade rurais e pequenos agricultores através da geração de emprego e renda e fortalecimento de organizações sociais, podendo se tornar um produto a mais a ser comercializado por cooperativas e associações.

4. CONCLUSÃO

A produção de *biochar* de resíduos de frutos de umbu a 700 °C proporcionou melhorias nos parâmetros físicos e químicos.

A obtenção de *biochar* de resíduos de frutos de umbu no tempo de residência de 3 h elevou a disponibilidade de nutrientes.

A temperatura de 700 °C aumentou a porosidade do *biochar*, demonstrando potencial para uso na adsorção de poluentes em ambientes contaminados e retenção de água no solo.

As descobertas deste estudo contribuem com o desenvolvimento de tecnologias ambientais ao disponibilizar informações sobre a caracterização do *biochar* de resíduos de frutos de umbu.

5. REFERÊNCIAS

ABOELELA, D.; SALEH, H.; ATTIA, A. M.; ELHENAWY, Y.; MAJOZI, T.; BASSYOUNI, M. Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. **Sustainability**, v. 15, n. 14, p. 11238, jan. 2023.

ASTM INTERNACIONAL. **ASTM D3175-07: Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007. 5 p.

AVORNYO, V. K.; MANU, A.; LAIRD, D. A.; THOMPSON, M. L. Temperature Effects on Properties of Rice Husk *Biochar* and Calcinated Burkina Phosphate Rock. **Agriculture**, v. 11, n. 5, p. 432, 2021.

BATISTA, F. R. da C.; SILVA, S. M.; SANTANA, M. F. S.; CAVALCANTE, A. R. O umbuzeiro no semiárido brasileiro. **Campina Grande: INSA**, 2015. 72 p.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p. 180214, 2018.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 14 abr. 2022. Disponível em https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2022/decreto-11043-13-abril-2022-792514-anexo-pe.pdf?utm_source=chatgpt.com

DIAGBOYA, P. N.; ODAGWE, A.; OYEM, H. H.; OMORUYI, C.; OSABOHIEN, E. Adsorptive decolorization of dyes in aqueous solution using magnetic sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) peel waste. **RSC Sustainability**, v. 2, p. 686-694, 2024.

ENEBE, M. C.; RAY, R. L.; GRIFFIN, R. W. The impacts of *biochar* on carbon sequestration, soil processes, and microbial communities: a review. **Biochar**, v. 7, n. 1, p. 107, 9 set. 2025.

ESOHE OMORIYEKOMWAN J.; TAHMASEBI, A.; ZHANG, J.; YU, J. Synthesis of Super-Long Carbon Nanotubes from Cellulosic Biomass under Microwave Radiation. **Nanomaterials**, v. 12, n. 5, p. 737, jan. 2022.

FAO, Fao. **Agricultural production statistics, 2010-2023**. 2024.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 20 dez. 2019.

GARG, A.; WANI, I.; ZHU, H.; KUSHVAHA, V. Exploring efficiency of *biochar* in enhancing water retention in soils with varying grain size distributions using ANN technique. **Acta Geotechnica**, v. 17, n. 4, p. 1315–1326, 1 abr. 2022.

GUL, S.; WHALEN, J. K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in *biochar*-amended soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 03, p. 1-15, 2016.

GUO, J.; CHEN, B. Insights on the Molecular Mechanism for the Recalcitrance of *Biochars*: Interactive Effects of Carbon and Silicon Components. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 16, p. 9103–9112, 19 ago. 2014.

HALIM, S. A.; SWITHENBANK, J. Characterisation of Malaysian wood pellets and rubberwood using slow pyrolysis and microwave technology. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 122, p. 64–75, 1 nov. 2016.

IANNAZZO, D.; CELESTI, C.; ESPRO, C.; FERLAZZO, A.; GIOFRÈ, S. V.; SCUDERI, M.; SCALESE, S.; GABRIELE, B.; MANCUSO, R.; ZICCARELLI, I.; VISALLI, G.; DI PIETRO, A. Orange-Peel-Derived *Nanobiochar* for Targeted Cancer Therapy. **Pharmaceutics**, v. 14, n. 10, p. 2249, out. 2022.

IGHALO, J. O.; CONRADIE, J.; OHORO, C. R.; AMAKU, J. F.; OYEDOTUN, K. O.; MAXAKATO, N. W.; AKPOMIE, K. G.; OKEKE, E. S.; OLISAH, C.; MALLOUM, A.; ADEGOKE, K. A. *Biochar* from coconut residues: An overview of production, properties, and applications. **Industrial Crops and Products**, v. 204, p. 117300, 15 nov. 2023.

IPPOLITO, J. A.; CUI, L.; KAMMANN, C.; WRAGE-MONNING, N.; ESTAVILLO, J. M.; FUERTES-MENDIZABAL, T.; CAYUELA, M. L.; SIGUA, G.; NOVAK, J.; SPOKAS, K.; BORCHARD, N. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence *biochar* characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. **Biochar**, v. 2, n. 4, p. 421–438, 1 dez. 2020.

JIN, X.; ZHANG, T.; HOU, Y.; BOL, R.; ZHANG, X.; ZHANG, M.; YU, N.; MENG, J.; ZOU, H.; WANG, J. Review on the effects of biochar amendment on soil microorganisms and enzyme activity. **Journal of Soils and Sediments**, v. 24, p. 2599–2612. 2024.

JOSEPH, S. D.; DOWNIE, A.; MUNROE, P.; CROSKY, A.; LEHMANN, J. *Biochar* for carbon sequestration, reduction of greenhouse gas emissions and enhancement of soil fertility; a review of the materials science. In: **Proceedings of the Australian combustion symposium**. University of Sydney, Sydney, 2007. p. 130–133.

JÚNIOR, L. D.; CASTRO, W. C.; BONATTO, E. C. S.; FALCÃO, N. P. S. Caracterização de biocarvões produzidos com resíduos de açaí e castanha-do-Brasil / Characterization of *biochar* produced with waste from açai and Brazil nuts. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 27429–27442, 18 abr. 2022.

LEÓN-OVELAR, R.; FERNÁNDEZ-BOY, M. E.; KNICKER, H. Characterization of the Residue (Endocarp) of *Acrocomia aculeata* and Its *Biochars* as a Potential Source for Soilless Growing Media. **Horticulturae**, v. 8, n. 8, p. 739, ago. 2022.

MALJAE, H.; MADADI, R.; PAIVA, H.; TARELHO, L.; FERREIRA, V. M. Incorporation of *biochar* in cementitious materials: A roadmap of *biochar* selection. **Construction and Building Materials**, v. 283, p. 122757, 10 maio 2021.

MARQUES, C. A.; SILVA, D. A.; APRESENTAÇÃO, M. J. F.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. Produção de *biochar* com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum*

sp.). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e31211124675-e31211124675, 2022.

MAJEWSKA, M.; HANAKA, A. *Biochar* in the Bioremediation of Metal-Contaminated Soils. **Agronomy**. 2025.

MURTAZA, G.; USMAN, M.; IQBAL, J.; HYDER, S.; SOLANGI, F.; IQBAL, R.; OKLA, M. K.; AL-GHAMDI, A. A.; ELSALAHY, H.; TARIQ, W.; AL-ELWANY, O. A. A. I. Liming potential and characteristics of *biochar* produced from woody and non-woody biomass at different pyrolysis temperatures. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 11469, 20 maio 2024.

NEOGI, S. SHARMA, V.; KHAN, N.; CHAURASIA, D.; AHMAD, A.; CHAUHAN, S.; SINGH, A.; YOU, S.; PANDEY, A.. Sustainable *biochar*: A facile strategy for soil and environmental restoration, energy generation, mitigation of global climate change and circular bioeconomy. **Chemosphere**, v. 293, p. 133474, 1 abr. 2022.

PATEL, M. R.; PANWAR, N. L. *Biochar* from agricultural crop residues: Environmental, production, and life cycle assessment overview. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 19, p. 200173, 1 nov. 2023.

PINHEIRO, P. C. da C.; SÈYE, O. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. In: **Congresso Anual da ABM**. 1998. p. 2032.

RÓZ, A. L.; RICARDO, J. F. C.; NAKASHIMA, G. T.; SANTOS, L. R. O.; YAMAJI, F. M. Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 810–814, 2015.

SAIT, H. H.; HUSSAIN, A.; BASSYOUNI, M.; ALI, I.; KANTHASAMY, R.; AYODELE, B. V.; ELHENAWY, Y. Hydrogen-Rich Syngas and *Biochar* Production by Non-Catalytic Valorization of Date Palm Seeds. **Energies**, v. 15, n. 8, p. 2727, jan. 2022.

SCHMIDT, H. P.; ANCA-COUCÉ, A.; HAGEMANN, N. Pyrogenic carbon capture and storage. **GCB Bioenergy**, v. 11, n. 4, p. 573–591, 2019.

SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2009. 627 p.

SOLAIMAN, Z. M.; SHAFI, M. I.; BEAMONT, E.; ANAWAR, H. M. Poultry Litter *Biochar* Increases Mycorrhizal Colonisation, Soil Fertility and Cucumber Yield in a Fertigation System on Sandy Soil. **Agriculture**, v. 10, n. 10, p. 480, out. 2020.

STEINER, C.; MCLAUGHLIN, H.; HARLEY, A.; FLORA, G.; LARSON, R.; REED, A. United States *Biochar* Initiative 2010: U.S.-Focused *Biochar* Report–Assessment of *Biochar*’s Benefits for the United States of America; **United States Center for Energy and Environmental Security**; United States *Biochar* Initiative: Morgantown, WV, USA, 2010; p. 84.

TORRES, E. P.; CHAVES, R. M.; SOUZA NETO, M. J.; LIMA, A. S.; ANDRADE SOBRINHO, L. G.; CANDEIA, R. A. Interação *biochar*: solo do semiárido paraibano: aspecto sob capacidade de retenção de água e nutrição. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 17, p. e7167–e7167, jan. 2025.

VAN NGUYEN, T. T.; PHAN, A. N.; NGUYEN, T. A.; NGUYEN, T. K.; NGUYEN, S. T.; PUGAZHENDHI, A. Valorization of agriculture waste biomass as *biochar*: As first-rate biosorbent for remediation of contaminated soil. **Chemosphere**, v. 307, p. 135834, 1 nov. 2022.

VENKATESH, G.; GOPINATH, K.; REDDY, K.; REDDY, B.; PRABHAKAR, M.; SRINIVASARAO, C.; KUMARI, V.; SINGH, V. Characterization of *Biochar* Derived from Crop Residues for Soil Amendment, Carbon Sequestration and Energy Use. **Sustainability**, v. 14, p. 2295, 2022.

VIJAYARAGHAVAN K. Recent advancements in biochar preparation, feedstocks, modification, characterization and future applications. **Environmental Technology Reviews**, v. 8, p. 47-64, 2019.

WANG, Q.; LI, S.; LI, J.; HUANG, D. The Utilization and Roles of Nitrogen in Plants. **Forests**, v. 15, n. 7, p. 1191, jul. 2024.

WANG, X.; GUO, X.; LI, T.; ZHU, J.; PANG, J.; XU, J.; WANG, J.; HUANG, X.; GAO, J.; WANG, L. Study on Adsorption Characteristics of Heavy Metal Cd²⁺ by *Biochar* Obtained from *Water Hyacinth*. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 31, n. 3, 2022.

WEI, B.; PENG, Y.; LIN, L.; ZHANG, D.; JIANG, L.; LI, Y.; HE, T.; WANG, Z. Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: a meta-analysis. **Geoderma**, v. 437, p. 516-591. 2023.

YIN, D.; YANG, X.; WANG, H.; GUO, X.; WANG, S. Effects of chemical-based fertilizer replacement with *biochar*-based fertilizer on albic soil nutrient content and maize yield. **Open Life Sciences**, v. 17, n. 1, p. 517–528, 1 jan. 2022.

YOUNIS, M.; FARAG, H.; ALHAMDAN, A.; ABOELASAAD, G.; EL-ABEDEIN, A.; KAMEL, R. Utilization of palm residues for *biochar* production using continuous flow pyrolysis unit. **Food Chemistry**, v. 20, p. 100-103, 2023.

ZIELEWICZ, W.; SWEDRZYNSKA, D.; SWEDRZYNSKI A.; GRZEBISZ, W.; GOLINSKI, P. The Influence of Calcium Sulfate and Different Doses of Potassium on the Soil Enzyme Activity and the Yield of the Sward with a Mixture of Alfalfa and Grasses. **Agriculture**, v. 12, n. 4, p. 475, abr. 2022.

CAPÍTULO 2
EFEITO DE *BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE JUREMA-BRANCA (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke) SOB CONDIÇÃO DE SALINIDADE

CAPÍTULO 2: EFEITO DE *BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE JUREMA-BRANCA (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke) SOB CONDIÇÃO DE SALINIDADE

RESUMO

O sucesso de projetos de recuperação de áreas degradadas passa pela produção de mudas de espécies nativas de qualidade. Para tanto, é necessário recursos e técnicas que garantam mudas vigorosas e com boa taxa de sobrevivência em campo. Quando a área está inserida na região semiárida, que possui solos com elevada salinidade, os desafios são ainda maiores. Desta forma, é essencial o desenvolvimento de tecnologias que possam auxiliar as mudas no combate aos efeitos negativos do estresse salino. Esse estresse abiótico é capaz de causar distúrbios fisiológicos e bioquímicos nas plantas e também toxidez. Uma alternativa pode ser o uso de *biochar* de resíduos de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) na produção de mudas de espécies nativas da Caatinga, como a jurema-branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke). Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do *biochar* de resíduos de frutos de umbu no desenvolvimento inicial de mudas de jurema-branca sob condições de salinidade. As sementes foram coletadas na região agreste do Rio Grande do Norte (RN) e os resíduos de frutos de umbu foram coletados em cooperativa no município de Mossoró, RN. O experimento foi realizado em casa de vegetação. Inicialmente, solo típico da Caatinga foi coletado e misturado com doses de *biochar* e permaneceram por 30 dias acondicionados em caixa plástica, sendo revolidos diariamente e umedecido. As doses de *biochar* foram 0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹. Após a incubação foi realizada a caracterização do substrato quanto aos atributos químicos e físicos. As mudas foram produzidas em tubetes de 280 ml e irrigadas diariamente. Analisou-se as seguintes variáveis: comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), diâmetro do colo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC) e massa seca total (MST), Índice de Robustez (IR) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD). De maneira geral, o *biochar* de resíduos de frutos de umbu atenuou os efeitos deletérios causados pela salinidade para as variáveis AF, MSPA, MSR, MSC, MST e IQD, as quais tiveram diferença significativa na interação entre a salinidade e as doses de *biochar*. A dose de 60 t ha⁻¹ foi a que proporcionou maiores ganhos de massa seca. O *biochar* de

resíduos de frutos de umbu se mostrou uma alternativa viável como condicionador do solo promovendo ganhos significativos às mudas de jurema-branca sob condições de estresse.

Palavras-Chave: espécie florestal, Caatinga, salinidade, sustentabilidade, aproveitamento de resíduos

ABSTRACT

The success of degraded area restoration projects depends on the production of high-quality seedlings of native species. For this purpose, resources and techniques that ensure vigorous seedlings with good survival rates in the field are essential. When the area is located in the semi-arid region, where soils present high salinity levels, the challenges become even greater. Therefore, developing technologies that can help seedlings cope with the negative effects of salt stress is crucial. This abiotic stress can cause physiological and biochemical disturbances in plants, as well as toxicity. One possible alternative is the use of *biochar* produced from umbu fruit residues (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) in the production of seedlings of native Caatinga species, such as jurema-branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke). Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of *biochar* from umbu fruit residues on the initial development of jurema-branca seedlings under saline conditions. Seeds were collected in the agreste region of Rio Grande do Norte (RN), and umbu fruit residues were obtained from a cooperative in Mossoró, RN. The experiment was carried out in a greenhouse. Initially, typical Caatinga soil was collected and mixed with *biochar* doses, remaining for 30 days in plastic boxes, being turned daily and moistened. The *biochar* doses were 0, 15, 30, 45, and 60 t ha⁻¹. After incubation, the substrate was characterized for its chemical and physical properties. The seedlings were grown in 280 mL tubes and irrigated daily. The following variables were analyzed: shoot length (SL), root length (RL), stem diameter (SD), number of leaves (NL), leaf area (LA), shoot dry mass (SDM), root dry mass (RDM), stem dry mass (StDM), total dry mass (TDM), Robustness Index (RI), and Dickson Quality Index (DQI). In general, *biochar* from umbu fruit residues mitigated the deleterious effects of salt stress on the variables LA, SDM, RDM, StDM, TDM, and DQI, which showed significant differences in the interaction between salinity and *biochar* doses. The dose of 60 t ha⁻¹ provided the highest dry mass gains. The umbu fruit residue *biochar* proved to be a viable alternative as a soil conditioner, promoting significant growth improvements in jurema-branca seedlings under salt stress conditions.

Keywords: forest species, Caatinga, salinity, sustainability, waste utilization

CAPÍTULO 2

EFEITO DE *BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE JUREMA-BRANCA (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke) SOB CONDIÇÃO DE SALINIDADE

1. INTRODUÇÃO

O sucesso e a eficiência de projetos de recuperação de áreas degradadas e conservação no bioma Caatinga dependem da produção de mudas florestais nativas. Quando nos referimos a um bioma como esse, localizado em região de clima semiárido, os desafios são ainda maiores, principalmente em relação aos estresses abióticos aos quais as mudas estão suscetíveis em campo (Lucena, Ferrer e Guilhermino, 2021).

A salinidade é um fator abiótico recorrente em solos da Caatinga, afetando diretamente o crescimento e a fisiologia das plantas em estágio inicial de desenvolvimento. Esse estresse pode ser provocado pela elevada evaporação dos recursos hídricos superficiais, pela baixa pluviosidade ou pela irrigação com água salina. Essa condição tem alto potencial de acarretar estresse salino nas mudas provocando redução da germinação de sementes, o crescimento das mudas, bem como afetar as taxas de fotossíntese (Silva *et al.*, 2025; Parida; Das, 2005; Holanda *et al.*, 2007).

Entre as espécies vulneráveis a essas condições, podemos citar a jurema-branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke), nativa do bioma Caatinga. Trata-se de uma espécie pioneira, de pequeno porte, que pode atingir até 4 m de altura, apresentando casca de tonalidade castanha e revestida por acúleos. Entre suas utilidades, contribuir para a formação de pasto apícola, compõe projetos de recuperação de áreas degradadas, fornece madeira para a fabricação de utensílios, além de ser considerada uma espécie forrageira. (Maia, 2012). Por ser uma leguminosa, atua como fixadora de N. Seu estágio sucessional evidencia a importância em ações de restauração, visto que é crucial que espécies pioneiras tenham boas condições de sobrevivência para favorecer o estabelecimento de espécies subsequentes, garantindo a estabilidade do ecossistema florestal.

Conforme Nogueira (2020), a espécie apresenta tolerância moderada à salinidade. No entanto, carece de informações sobre a sensibilidade da espécie em estágios iniciais de desenvolvimento, como estudos que ressaltem a necessidade de ajustar substratos e regimes de irrigação para melhorar o crescimento e a sobrevivência de mudas de jurema-branca.

Uma alternativa para melhorar o desenvolvimento de mudas e mitigar efeitos da salinidade pode ser o desenvolvimento de novas tecnologias, como *biochar*.

O *biochar* é um material rico em carbono, oriundo de biomassa, produzido por meio da pirólise, que é a degradação térmica da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio ou quando a presença desse elemento é reduzida (Rashid *et al.*, 2024).

Potenciais aplicações do *biochar* são influenciadas por suas propriedades físico-químicas, as quais podem garantir, entre outros fatores, carbono de alta estabilidade, porosidade, pH alcalino, disponibilidade de macronutrientes e micronutrientes, melhor atividade de micro-organismos edáficos, fatores que variam com a matéria-prima utilizada na produção (Wu *et al.*, 2023).

Entre as matérias-primas possíveis de transformação em *biochar*, pode-se citar os resíduos de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) oriundos da agroindústria de polpa de frutas. O umbu é uma espécie frutífera do bioma Caatinga e tem seus frutos amplamente consumidos *in natura* ou processados em polpas, sorvetes e doces (Costa *et al.*, 2021). Essa produção acarreta a geração abundante de resíduos dos frutos, oportunizando o uso sustentável desse recurso e podendo promover a destinação ambientalmente adequada frente ao descarte irregular. Além da questão ambiental, destaca-se a questão socioeconômica, tendo em vista que a transformação desses resíduos em *biochar* pode gerar um produto com valor agregado que pode, inclusive, ser produzido por cooperativas de agricultores familiares.

Estudos apontam que o *biochar* causa efeito positivo no crescimento e fisiologia de mudas, inclusive quando submetidas a estresse salino. Lima *et al.*, (2016) avaliando o desempenho de mudas de angico (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brennan) em substrato contendo *biochar* de madeira de eucalipto comprovaram aumento na qualidade das mudas e maior eficiência de uso de nutrientes. De forma antagônica, Soares *et al.*, (2021) estudaram o uso de *biochar* de resíduos de eucalipto em mudas de *Sapindus saponaria* L. e concluíram que não proporcionou incremento nas mudas.

Sa'adah *et al.*, (2024) investigando o efeito de *biochar* feito de resíduos de *Brownleea parviflora* Harvey ex. Lindl. no desenvolvimento de mudas de pau-josé (*Sonneratia caseolaris* (L.) Engl.), perceberam que o *biochar* melhorou a tolerância das mudas ao estresse salino. De igual modo, Yousaf *et al.*, (2021) estudaram o efeito de *biochar* de casca de cana-de-açúcar na resposta de *Dalbergia sissoo* Roxb. sob condição salina e descobriram que a aplicação do *biochar* atenuou os efeitos da salinidade nas mudas.

Apesar disso, estudos envolvendo *biochar* de resíduos de umbu e espécies nativas como a jurema-branca são escassos na literatura, ainda mais relacionado a estresse salino. Isso ressalta a relevância científica e ambiental do presente trabalho, considerando o reaproveitamento de resíduos, a mitigação de efeitos da salinidade, como também o levantamento de informações úteis para projetos de restauração ecológica.

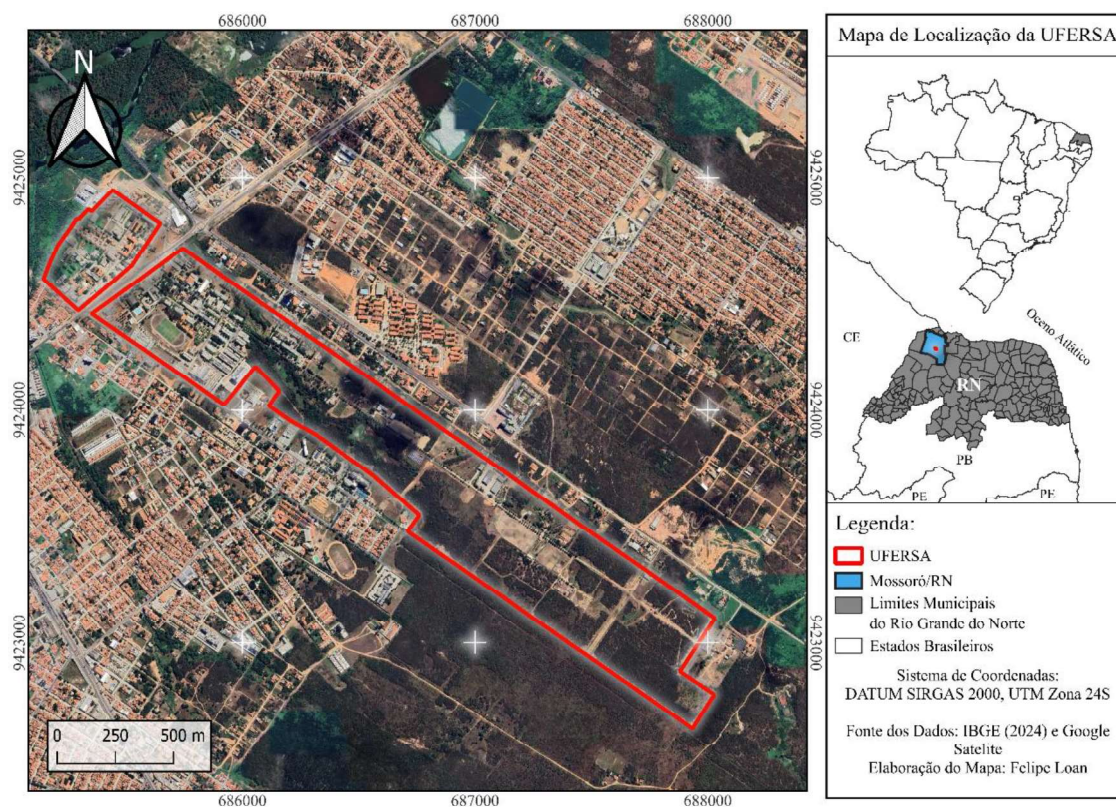
Dessa forma, objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito do *biochar* de resíduos de frutos de umbu no desenvolvimento inicial de mudas de jurema-branca submetidas à irrigação com água salina.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área em estudo

O experimento foi realizado em casa de vegetação do Centro de Ciências Agrárias (Engenharia Florestal) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte (Figura 1).

Figura 1. Localização da área de estudo. Mossoró-RN, 2025.



Fonte: Autor (2025)

2.2 Coleta do material

As sementes de jurema-branca foram coletadas no município de Currais Novos (RN) em agosto de 2023. Os resíduos de caroço de umbu utilizados para produção do *biochar*, foram recolhidos na Cooperativa de Agricultores e Agricultoras Familiares de Mossoró e Região (COOAFAM), produtora de polpa de frutas e localizada no município de Mossoró (RN).

2.3 Produção do material

O *biochar* utilizado foi produzido em um forno elaborado na UFERSA, tendo como base um modelo criado pela Internacional *Biochar* Initiative (IBI, 2020). Para isso, resíduos de frutos de umbu foram pirolisados no respectivo forno durante 2 h de tempo de

residência, temperatura de 600 °C, sendo utilizado madeira descartada de serraria como combustível no processo de queima.

Após a pirólise, o material foi resfriado e peneirado em peneira de 2 mm. Como caracterização, o teor de cinzas foi de 12,41%, o teor de voláteis 17,66%, carbono fixo 69,92% e rendimento de 30%.

O substrato utilizado foi composto de solo coletado de área da Caatinga com o *biochar*, os quais foram misturados manualmente, compondo as doses de 0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹. O substrato foi armazenado em caixas plásticas de 50 litros durante 30 dias, período em que foi umedecido e revolvido diariamente. Após a incubação foi realizada a caracterização física e química do substrato, envolvendo o potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, acidez, cálcio, magnésio, alumínio, potássio, sódio, fósforo, nitrogênio, cobre, zinco, ferro e manganês; matéria orgânica e granulometria, todos conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (2009). (Tabela 1).

Tabela 1. Análise física e química dos substratos utilizados para o desenvolvimento inicial de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.

Dose de <i>biochar</i>	Atributos químicos													V %
	pH	CE	MO	N	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC	
	H ₂ O	dSm ⁻¹	g kg ⁻¹			mg dm ⁻³				cmole dm ⁻³				
0 t ha ⁻¹	7,20	0,14	6,0	0,6	0,2	118,9	23,0	4,70	0,38	0,0	0,0	5,48	5,48	100
15 t ha ⁻¹	7,50	0,18	6,27	0,57	0,2	194,5	26,0	3,90	0,92	0,0	0,0	5,43	5,43	100
30 t ha ⁻¹	8,20	0,19	7,94	0,48	0,2	256,2	28,0	4,47	0,27	0,0	0,0	5,52	5,52	100
45 t ha ⁻¹	8,40	0,20	7,94	0,59	0,2	324,9	28,0	3,60	1,35	0,0	0,0	5,90	5,90	100
60 t ha ⁻¹	8,60	0,20	20,06	0,73	0,2	462,4	35,0	3,70	0,71	0,0	0,0	5,74	5,74	100

Dose de <i>biochar</i>	Atributos químicos				Atributos físicos		
	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila
		mg dm ⁻³				%	
0 t ha ⁻¹	0,45	6,50	35,35	15,45	82	12	6
15 t ha ⁻¹	0,45	8,0	39,90	16,0	85	9	6
30 t ha ⁻¹	0,45	15,55	41,65	16,0	85	9	6
45 t ha ⁻¹	0,40	12,40	42,80	18,25	84	10	6
60 t ha ⁻¹	0,45	10,85	52,50	19,10	84	10	6

Fonte: Autor (2025).

2.4 Produção de mudas

As mudas foram produzidas em tubetes de 280 ml contendo o substrato, onde foram semeadas duas sementes de jurema-branca por tubete. A dormência das sementes foi superada aplicando-se método de desponte do tegumento no lado oposto ao hilo.

A irrigação do experimento foi realizada diariamente, mantendo-se 60% da capacidade de campo do substrato, sendo as mudas irrigadas com água de abastecimento até o décimo dia após a semeadura. Passados os primeiros dez dias procedeu-se com o desbaste das mudas. Metade da população continuou sendo irrigada com água potável

(0,5 dSm⁻¹) e a outra metade com água salina (4,3 dSm⁻¹) durante os 60 dias de duração do experimento. O teor da água salina foi estabelecido de acordo com os resultados de Cosme *et al.* (2018), sendo a média da salinidade dos poços locais utilizados para irrigação.

Durante a condução do experimento, foram analisadas, semanalmente, as seguintes variáveis:

Comprimento da parte aérea (CPA): realizada com o auxílio de uma régua graduada em milímetros, medindo-se da base do colo à gema apical da planta.

Diâmetro do caule (DC): realizado com o auxílio de um paquímetro graduado em mm, medindo-se a base do caule da muda.

Número de Folhas (NF): realizado por meio da contagem direta.

Após o período de experimento, foram realizadas as seguintes variáveis destrutivas:

Comprimento da raiz (CR): realizado com auxílio de uma régua graduada em milímetros.

Área Foliar (AF): realizado pelo método do disco corrigido, conforme proposto por Santos *et al.* (2014).

Massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC) e massa seca total (MST): as mudas foram retiradas do substrato, lavadas e seccionadas, sendo acondicionadas em sacos de papel tipo *kraft* destinado para cada parte. Em seguida, os recipientes foram levados para estufa de circulação de ar forçada por 72 h a 70 °C para determinação da fitomassa.

Índice de Robustez (IR) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD), a partir das seguintes equações:

$$IR = \frac{H}{DC}$$

Em que:

IR = Índice de Robustez

H = altura da planta

DC = diâmetro do caule

$$IQD = [MST/(AP/DC) + MSA/MSR]$$

Em que:

IQD = Índice de Qualidade de Dickson

MST = massa seca total

AP = altura da parte aérea

DC = diâmetro do caule

MSPA = massa seca da parte aérea

MSR = massa seca da raiz

2.5 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com esquema fatorial de 2 x 5, sendo duas águas de irrigação (potável e salina, CE = 4,3 dSm⁻¹) e cinco doses de *biochar* (0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹), totalizando 10 tratamentos distribuídos em quatro blocos. Cada unidade experimental foi representada por cinco plantas.

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise da variância (ANAVA), e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade através do software SISVAR (Ferreira, 2019), e, quando houve significância, o software Sigmaplot[®] foi utilizado para produção de gráficos de regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação entre salinidade e doses de *biochar* apresentou efeito significativo apenas sobre a área foliar das mudas de jurema-branca. Em contrapartida, o fator salinidade, de forma isolada, influenciou significativamente o comprimento da parte aérea e o diâmetro do caule das mudas (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância para comprimento da parte aérea (CPA), raiz (CR), diâmetro do caule (DC) e área foliar (AF) de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke sob condição de salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de Variação	Quadrado médio			
	CPA	CR	DC	AF
Salinidade (S)	4515,62**	1,11 ns	1,92**	17771,70 **
Doses (D)	1,06 ns	0,12 ns	0,02 ns	47,79 ns
S x D	4,22 ns	2,3 ns	0,67 ns	80,55 **
CV (%)	9,43	7,11	7,84	10,02

* e ** significativo nos níveis de probabilidade de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo ao nível de probabilidade de 5%; CV: coeficiente de variação

Fonte: Autor (2025)

A salinidade afetou negativamente o crescimento das mudas de *P. stipulacea*, reduzindo em 53,9 e 17% o comprimento da parte aérea e o diâmetro do caule, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Efeito da salinidade no comprimento da parte aérea (CPA), raiz (CR) e diâmetro do caule (DC) de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.

Água	CPA	CR	DC
	cm		mm
Potável	39,42 a	17,18 a	2,53 a
Salina	18,17 b	16,85 a	2,10 b

Letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey; letras minúsculas comparam a água de irrigação; ns = não significativo; * = teste de Tukey a 5% de probabilidade; ** = teste de Tukey a 1% de probabilidade

Fonte: Autor (2025)

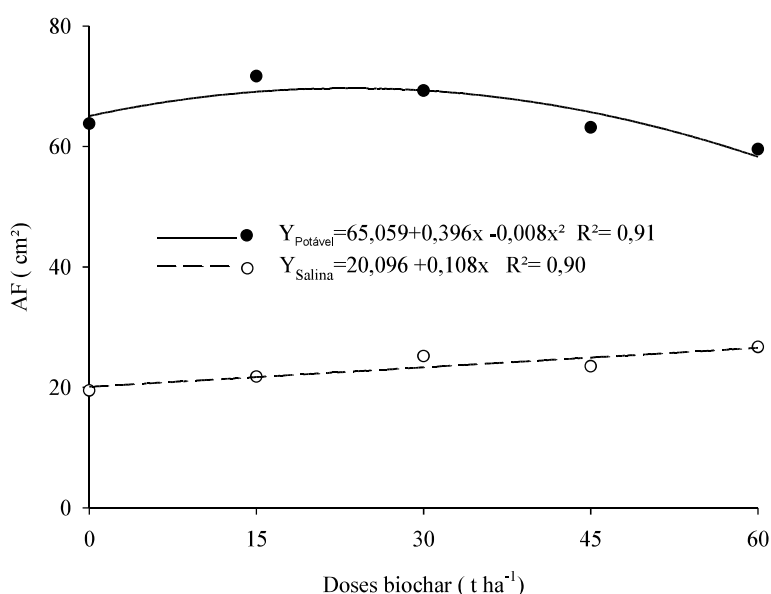
Na literatura são comuns resultados que apontam redução do crescimento de mudas ao serem submetidas à irrigação com água salina. Carvalho Aderaldo *et al.*, (2022), avaliando impactos do estresse salino em mudas de mulungu (*Erythrina velutina* Wild.), observaram que a salinidade de aproximadamente $5,0 \text{ dSm}^{-1}$, foi capaz de reduzir o crescimento da parte aérea, raiz e diâmetro do caule das mudas, em consonância com o presente estudo. Da mesma forma, Pereira *et al.*, (2023), estudaram o efeito da salinidade

(cloreto de sódio) no crescimento de mudas de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). Com os resultados, os autores perceberam que a concentração de sais reduziu o crescimento das plantas.

Avaliando parâmetros morfológicos de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), Oliveira *et al.*, (2025) encontraram resultados semelhantes ao observados nesta pesquisa para as variáveis de crescimento, em que a salinidade provocou redução na taxa de crescimento das mudas. O estresse salino provoca distúrbios fisiológicos e bioquímicos nas plantas, podendo reduzir seu crescimento, inclusive em virtude de a presença de sais afetar a disponibilidade de elementos químicos essenciais para o metabolismo vegetal (Hasegawa *et al.*, 2000).

A área foliar (AF) das mudas de jurema-branca foi influenciada pela interação entre salinidade e doses de *biochar* (Figura 2). Em condição não salina, verificou-se resposta quadrática das plantas às doses de *biochar*, com incremento da área foliar até a dose estimada de 24,8 t ha⁻¹. Sob condição salina, observou-se redução expressiva da área foliar em relação às plantas não submetidas ao estresse, embora a resposta linear crescente indique que o aumento das doses de *biochar* promoveu ganhos graduais na área foliar, evidenciando efeito mitigador do *biochar* frente ao estresse salino.

Figura 2. Efeito da salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu na área foliar de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.



Fonte: Autor (2025)

A salinidade do solo pode diminuir a absorção de água pelas plantas em reflexo à redução do potencial osmótico, comprometendo processos fisiológicos. Dessa forma, as plantas podem apresentar modificações morfofisiológicas como estratégia para tolerar os efeitos da salinidade, como a diminuição das folhas (Tester e Davenport, 2003).

É possível perceber que, na condição salina, o *biochar* promoveu aumento da área foliar, resultado relevante tendo em vista que o aumento da área foliar pode aumentar a taxa de fotossíntese das mudas. Além disso, esse aumento pode contribuir para a formação de mudas mais vigorosas, aumentando as chances de sobrevivência em campo. Conforme Pinto *et al.*, (2011), estudos envolvendo a área foliar de plantas é importante, pois está relacionado com a quantidade de fotoassimilados produzidos pelo vegetal. Uma maior área foliar pode representar alto potencial de acúmulo de biomassa, gerando mudas com maior qualidade e vigor.

A análise de variância (Tabela 4) demonstrou que a interação entre a salinidade e as doses de *biochar* afetou significativamente o acúmulo de massa seca e o Índice de Qualidade de Dickson em mudas de jurema-branca, evidenciando que o efeito do *biochar* foi dependente do nível de estresse salino. Contudo, o Índice de Robustez (IR) respondeu exclusivamente à salinidade, não sendo influenciado de forma isolada ou interativa pelas doses de *biochar*.

Tabela 4. Resumo da análise de variância do comprimento da massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca da raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST), Índice de Robustez (IR) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke sob condição de salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de Variação	Quadrado médio						
	MSF	MSC	MSR	MSPA	MST	IR	IQD
Salinidade (S)	2,24**	1,43**	0,44 **	7,27**	2,64**	475,78**	0,021**
Doses (D)	0,006 ns	0,004 ns	0,002 ns	0,01 ns	0,06 ns	0,64 ns	0,0003 ns
S x D	0,01**	0,002**	0,008*	0,07 **	0,20**	1,57 ns	0,0009*
CV (%)	10,08	11,46	17,65	9,02	9,69	11,74	15,59

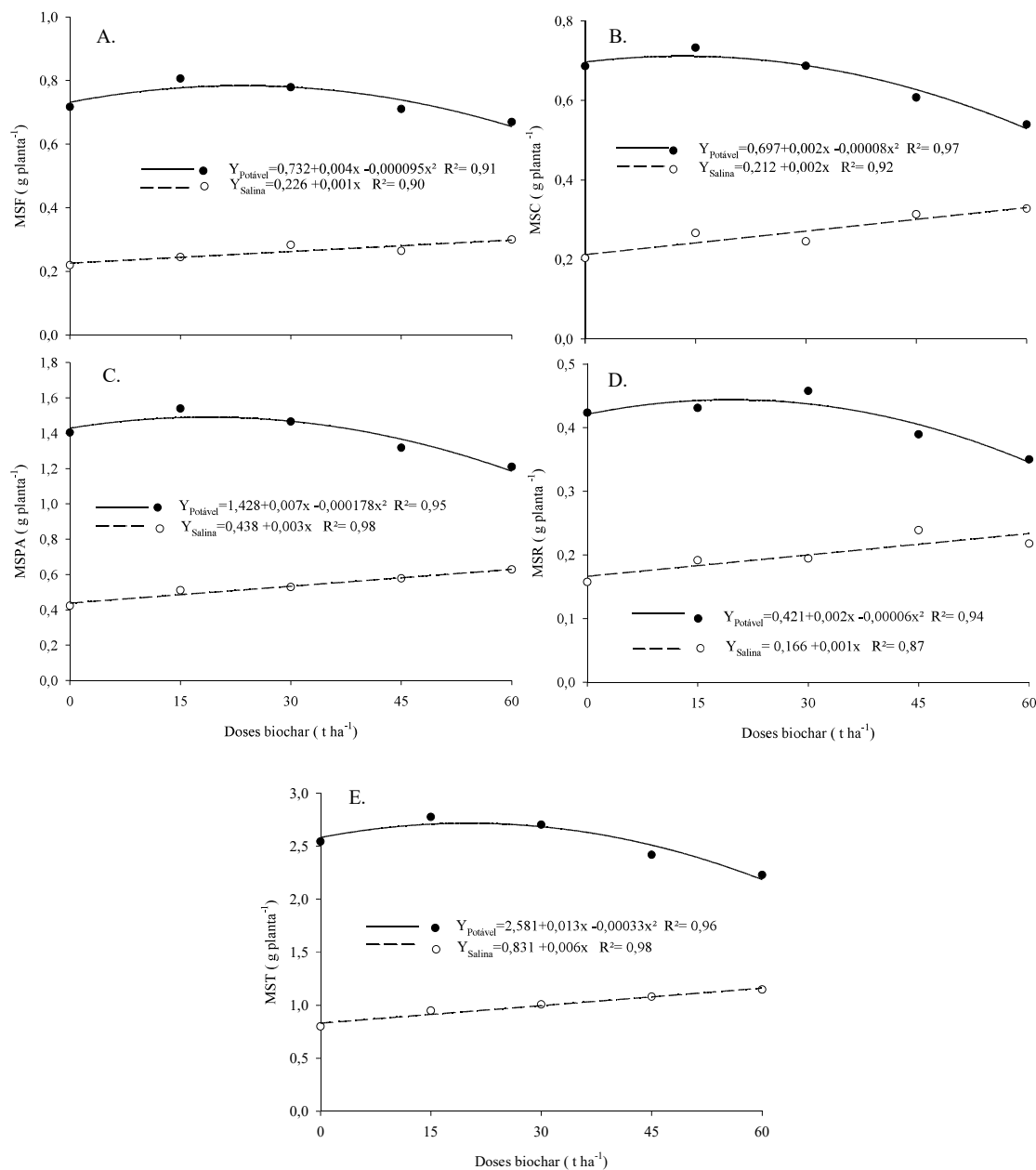
* e ** significativo nos níveis de probabilidade de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo ao nível de probabilidade de 5%; CV: coeficiente de variação

Fonte: Autor (2025)

O acúmulo de massa seca foliar, caulinar, da parte aérea, radicular e total em mudas de jurema-branca exibiu um padrão semelhante em resposta à salinidade. Os maiores valores foram observados em condição não salina, com uma redução significativa desses parâmetros sob estresse salino (Figura 3). Entretanto, quando submetidas ao

estresse salino combinado com doses de *biochar*, as mudas apresentaram uma resposta linear crescente. A maior disponibilidade de *biochar* promoveu aumentos progressivos na massa seca, com os valores máximos sendo alcançados na dose mais elevada (60 t ha⁻¹), a qual promoveu incrementos de 51,49; 73,95; 63,64; 38,22 e 56,98%, no acúmulo de massa seca da folha, caule, parte aérea, raiz e total, respectivamente.

Figura 3. Efeito da salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu na massa seca da folha (A), caule (B), parte aérea (C), raiz (D) e total (E) de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025



Fonte: Autor (2025)

A redução no acúmulo de biomassa das mudas irrigadas com água potável em relação às irrigadas com água salina podem estar relacionadas com o aumento de Na^+ e Cl^- no tecido vegetal, acarretando redução na produção de massa seca das plantas. Além disso, o cloreto de sódio pode afetar negativamente a síntese e translocação de hormônios entre as partes das plantas, prejudicando o desenvolvimento foliar, consequentemente, acúmulo de massa seca (Morais *et al.*, 2007; Taiz e Zeiger, 2007). Apesar disso, o aumento das doses de *biochar* promoveram aumento nos teores de massa seca mudas, evidenciando seu potencial função na atenuação de efeitos da salinidade nas mudas.

Ahmed *et al.*, (2024), estudaram o efeito do *biochar* de resíduos agrícolas em plantas e encontraram comportamento semelhante, em que o *biochar* promoveu aumento no acúmulo de massa seca em plantas cultivadas sob salinidade.

Para o Índice de Robustez (IR), verificou-se efeito significativo apenas da salinidade. A adição de sais, correspondente à condutividade elétrica de $4,3 \text{ dS m}^{-1}$, reduziu esse parâmetro em 43,97% em relação às mudas irrigadas com água potável (Tabela 5).

Tabela 5. Efeito da salinidade no Índice de Robustez (IR) de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke desenvolvidas em substrato contendo doses de *biochar*. Mossoró-RN, 2025.

Água	IR
Potável	15,62 a
Salina	8,75 b

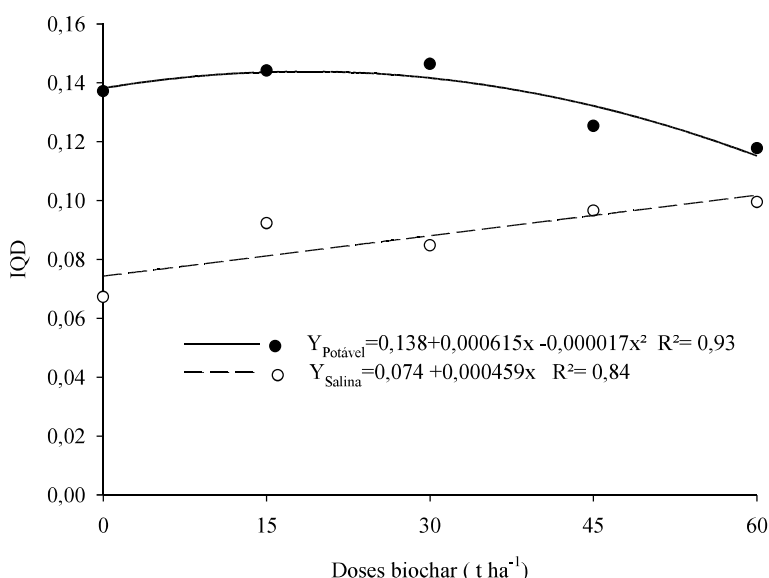
Letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey; letras minúsculas comparam a água de irrigação; ns = não significativo; * = teste de Tukey a 5% de probabilidade; ** = teste de Tukey a 1% de probabilidade

Fonte: Autor (2025)

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de jurema-branca foi significativamente influenciado pela interação entre a salinidade e as doses de *biochar* (Figura 4). Para esta variável verificou-se comportamento distinto em função do regime hídrico. No tratamento utilizando água potável, observou-se resposta quadrática, com aumento do IQD até a dose de 30 t ha^{-1} . Esse padrão indica a existência de uma dosagem ótima para o desenvolvimento das mudas em condições não estressantes. Em contrapartida, sob estresse salino, o IQD seguiu modelo linear crescente, aumentando de forma proporcional à elevação das doses de *biochar*, atingindo seu valor máximo na maior dose (60 t ha^{-1}). Essa resposta evidencia o papel atenuante do *biochar* ao estresse

salino, onde o aumento da sua disponibilidade mitigou progressivamente os efeitos deletérios da salinidade na qualidade das mudas de jurema-branca.

Figura 4. Efeito da salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu no Índice de Qualidade de Dickson de mudas de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke. Mossoró-RN, 2025.



Fonte: Autor (2025)

Com isso, é possível constatar que a presença do *biochar* de resíduos de frutos de umbu presentes no substrato das mudas de jurema-branca sob condições de estresse salino, atenuou os estresses causados pela salinidade. Além disso, vale destacar a relação entre o aumento da área foliar com o consequente aumento da taxa fotossintética, fazendo as mudas produzirem mais fotoassimilados, o que acarretou aumento no acúmulo de massa seca das plantas, principalmente no caule e nas folhas.

Ademais, os elevados teores de potássio oriundo das doses do *biochar* no substrato podem ter influenciado positivamente no comportamento das mudas no combate ao estresse. O sódio e potássio competem pelo mesmo sítio na planta, pois o mecanismo de absorção desses dois elementos é equivalente. Quando teor de potássio é maior que o de sódio, a planta absorve o potássio (elemento benéfico) em detrimento do sódio (elemento maléfico em alta concentração) (Watad *et al.*, 1991). Portanto, a nutrição apropriada de potássio pode aumentar a tolerância da planta ao estresse salino (Oliveira *et al.*, 2023).

4. CONCLUSÃO

O *biochar* de resíduos de frutos de umbu atua na redução dos efeitos negativos causados pela salinidade em mudas de jurema-branca, aumentando a área foliar e acúmulo de massa seca das mudas, sendo um potencial condicionador do solo. A dose de 60 t ha⁻¹ foi a que proporcionou maiores ganhos de massa seca em condições de salinidade. O *biochar* de resíduos de frutos de umbu apresenta-se como um produto promissor para projetos de restauração florestal em áreas com solos salinos. Para tanto, é crucial o desenvolvimento de novas pesquisas que avaliem o seu efeito em outras espécies florestais nativas do bioma Caatinga.

5. REFERÊNCIAS

- AHMED, N.; DENG, L.; WANG, C.; SHAH, Z. H.; DENG, L.; LI, Y.; LI, J.; CHACHAR, S.; CHACHAR, Z.; HAYAT, F.; BOZDAR, B.; ANSARI, F.; ALI, R.; GONG, L.; TU, P. Advancements in *Biochar* Modification for Enhanced Phosphorus Utilization in Agriculture. **Land**, v. 13, n. 5, p. 644, maio 2024.
- CARVALHO ADERALDO, F. I.; FERREIRA, G. S.; SOUSA, J. N.; BRITO, P. O. B.; GONDIM, F. A. Impactos dos estresses hídrico e salino em mudas de *Erythrina velutina* Wild. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 17, n. 2, p. 127–134, 2022.
- COSME, C. R.; DA SILVA, D. N.; DE SOUZA, M. M. R.; DE PAIVA, O. A. M.; DE FREITAS, S. G.; DE MOURA, E. S. Avaliação da qualidade das águas de poços em comunidades e assentamentos rurais Mossoró-RN. **Acta Iguazu**, v. 7, n.2, p. 97-108. 2018.
- COSTA, E. K. C.; SILVA, P. P. O.; MOREIRA, M. N.; DONATO, S. L. R. *Novas tecnologias na conservação póscolheita do umbu (Spondias tuberosa Arruda): um referencial teórico*. In: CORDEIRO, C. A. M.; SILVA, E. M.; EVANGELISTA-BARRETO, Norma Suely (orgs.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos: Pesquisa e Práticas Contemporâneas – Volume 2**. Salvador: Editora Científica, 2021. p. 573-583.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2009.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 20 dez. 2019.
- HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A.; ZHU, J. K.; BOHNERT, H. J. PLANT CELLULAR AND MOLECULAR RESPONSES TO HIGH SALINITY. **Annual Review of Plant Biology**, v. 51, n. Volume 51, 2000, p. 463–499, 1 jun. 2000.
- HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; NETO, M. F.; HOLANDA, A. C. (2010) Qualidade da água para irrigação. In: Gheyi, RH, Dias, NS, Lacerda, CF, (Eds.) - **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza, INCT Sal. 472p
- LIMA, S. L.; MARIMON JUNIOR, B. H.; MELO-SANTOS, K. S.; REIS, S. M.; PETTER, F. A.; VILAR, C. C.; MARIMON, B. S. *Biochar* no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 120–131, 2016.
- LUCENA, R. L.; FERRER, E.; GUILHERMINO, M. M. Mitigando os riscos da seca através de ações de recuperação e preservação do bioma caatinga no semiárido brasileiro / Mitigating dry risks through actions for the recovery and preservation of the caatinga biome in the brazilian semi-arid. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 36546–36557, 8 abr. 2021.
- MAIA, G.N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 1. ed. São Paulo: D & Z Computação Gráfica e Editora, 2012.

MORAIS, D. L.; VIÉGAS, R. A.; SILVA, L. M. M.; LIMA JUNIOR, A. R.; COSTA, R. C. L.; ROCHA, I.; SILVEIRA, J. A. G. Acumulação de íons e metabolismo de N em cajueiro anão em meio salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 125–133, 2007.

NAVROSKI, M.C.; BERGHETTI, A. L. P.; FENILLI, T. A. B.; BUSS, R.; PEREIRA, M. O.; TURCHETTO, F. **Produção de sementes e mudas: um enfoque à silvicultura**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 237-257, 2018.

NOGUEIRA, N. W.; FREITAS, R. M. O.; LEAL, C. C. P.; TORRES, S. B. Estresse salino na emergência e desenvolvimento inicial de plântulas de jurema-branca. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 7, n. 3, p. 1081-1087, 2020.

OLIVEIRA, G. C. B.; BERNARDO, F. G.; SOUSA, A. A.; MOURA, B. G.; SANTOS, M. S.; GOMES, B. E. A.; SILVA, R. F.; SANTOS, B. F.; OLIVEIRA, N. P.; FREIRE, C. S.; NASCIMENTO, H. H. C. Parâmetros Morfológicos e Biomassa Seca de Mudas de *Eucalyptus urograndis* 1144 Submetidas a Diferentes Níveis de Salinidade. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 8, p. e5235–e5235, 29 ago. 2025.

OLIVEIRA, R. R. T.; OLIVEIRA, F. A.; GÓIS, H. M. M. N.; MENEZES, P. V.; SANTOS, S. T.; AROUCHA, E. M. M.; ALMEIDA, J. G. L. Salt stress and K/Ca ratios of the nutrient solution in the production and quality of the melon. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, p. e20207586, 2023.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 60, n. 3, p. 324–349, 1 mar. 2005.

PEREIRA, F. R. A.; PEREIRA, W. E.; PESSOA, A. M. S.; VASCONCELOS, E. S. A. G. Crescimento inicial de mudas de *Spondia tuberosa* irrigadas com água salina. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, v. 6, n. 12, p. 494–513, 12 jan. 2023.

PINTO, S. I. C.; NETO, A. E. F.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.; MORETTI, B. S. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 523–533, 2011.

RASHID, S.; RAGHAV, A.; GOYAL, A.; AB, D. R.; SINGH, M. *Biochar* as a sustainable additive in cementitious composites: A comprehensive analysis of properties and environmental impact. **Industrial Crops and Products**, v. 209, p. 118044, 1 mar. 2024.

SA'ADAH, A. H. N.; JEYANNY, V.; ROSAZLIN, A.; SYAFAWATI, Y. J.; FAKHRI, I. M.; TIUN, X. C.; IRDINA, Z. N. Enhancing Growth, Soil Chemistry, and Nutrient Uptake in *Sonneratia Caseolaris* Seedlings Under Salinity Stress Through *Biochar* Application. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 36, n. 4, p. 444–460, 2024.

SANTOS, F. G. B.; NEGREIROS, M. Z.; MEDEIROS, J. F.; LOPES, W. A. R.; SOARES, A. M.; NUNES, G. H. S.; FREITAS, F. C. L. Growth and yield of Cantaloupe melon “Acclaim” in protected cultivation using agrotextile. **Horticultura Brasileira**, v. 32, p. 55–62, 2014.

SILVA, J. J.; SOUTO, J. S.; PEREIRA JUNIOR, E. B.; PEREIRA, W. E.; SOUTO, P. C.; DANTAS, J. S.; ROLIM, H. O.; LIMA, L. R. Avaliação da aroeira (*myracrodruon*

urundeuva, alemão) e catingueira (*cenostigma pyramidale*) (tul.)) na recuperação de solos em área degradados por sais no sertão paraibano. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 18, n. 1, p. e14591–e14591, 14 jan. 2025.

SOARES, D. C. O.; LIMA, S. F.; LIMA, A. P. L.; PAULA, J. A. F. Uso do *biochar* e de bioestimulante na produção e qualidade de mudas de *Sapindus saponaria* L. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 106–122, 2021.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia vegetal**. Universitat Jaume I, 2007.

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na⁺ Tolerance and Na⁺ Transport in Higher Plants. **Annals of Botany**, v. 91, n. 5, p. 503–527, 1 abr. 2003.

WATAD, A. E. A.; REUVENI, M.; BRESSAN, R. A.; HASEGAWA, P.M. Enhanced Net K⁺ Uptake Capacity of NaCl-Adapted Cells 1. **Plant Physiology**, v. 95, n. 4, p. 1265–1269, 1 abr. 1991.

WU, Y.; WANG, X.; ZHANG, L.; ZHENG, Y.; LIU, X.; ZHANG, Y. The critical role of *biochar* to mitigate the adverse impacts of drought and salinity stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 8 maio 2023.

YOUSAF, M. T. B.; NAWAZ, M. F.; REHMAN, M. Z. U.; GUL, S.; YASIN, G.; RIZWAN, M.. ALI, S. Effect of three different types of *biochars* on eco-physiological response of important agroforestry tree species under salt stress. **International Journal of Phytoremediation**, v. 23, n. 13, p. 1412–1422, 10 nov. 2021.

CAPÍTULO 3
**EFEITO DE *BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias*
tuberosa Arr. Cam.) NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE SABIÁ (*Mimosa*
caesalpiniiifolia Benth.) SUBMETIDAS À SALINIDADE**

CAPÍTULO 3: EFEITO DE *BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE FRUTOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE SABIÁ (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.) SUBMETIDAS À SALINIDADE

RESUMO

A produção de mudas de espécies florestais nativas demanda elevados custos, principalmente com insumos como substratos, sacos plásticos, sementes e adubação, que representam cerca de metade do total. Como o substrato é um dos itens mais onerosos, a busca por alternativas de menor custo e boa qualidade torna-se estratégica para o sucesso dos projetos de restauração. Substratos comerciais, compostos por materiais como casca de árvore, turfa e pó de coco, apresentam custo elevado devido ao processamento e transporte. Nesse contexto, o uso de resíduos agrícolas e florestais, como o *biochar*, surge como alternativa sustentável e economicamente viável. O *biochar*, um carvão de granulometria fina com propriedades que melhoram a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e o sequestro de carbono, tem despertado crescente interesse na produção de mudas. Uma das matérias-primas possíveis de conversão em *biochar* para avaliação em mudas é o resíduo de frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam), o qual tem potencial de composição de substratos de mudas de espécies nativas como o sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.). Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito de *biochar* de resíduos de frutos de umbu na produção de mudas de sabiá submetidas à salinidade. As sementes foram obtidas na região agreste do Rio Grande do Norte (RN), e os resíduos dos frutos de umbuzeiro foram provenientes de uma cooperativa localizada no município de Mossoró, RN. O experimento foi conduzido em ambiente protegido (casa de vegetação). Inicialmente, um solo característico da Caatinga foi coletado, misturado às diferentes doses de *biochar* e mantido por 30 dias em recipiente plástico, sendo revolvido diariamente e mantido úmido. As doses aplicadas de *biochar* corresponderam a 0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹. Após o período de incubação, foi realizada a caracterização físico-química do substrato. As mudas foram cultivadas em tubetes com capacidade de 280 mL e submetidas à irrigação diária. Foram avaliadas as seguintes variáveis: comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), diâmetro do colo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca total (MST), índice de robustez (IR) e índice de qualidade de Dickson (IQD). De modo geral, o *biochar*

promoveu o crescimento das mudas de sabiá, tendo proporcionando maiores valores principalmente para as variáveis diâmetro do caule, área foliar e comprimento da parte aérea. O acúmulo de biomassa também foi favorecido pelas doses de *biochar*, tendo a dose de 60 t ha⁻¹ promovido maiores valores. Além disso, o *biochar* tornou o estresse salino moderado, criando condições favoráveis para as mudas ativarem mecanismos de adaptação e tolerância aos sais.

Palavras-Chave: espécie florestal, salinidade, sustentabilidade, aproveitamento de resíduos, Caatinga

ABSTRACT

The production of seedlings of native forest species involves high costs, mainly due to inputs such as substrates, plastic bags, seeds, and fertilizers, which account for about half of the total expenses. Since the substrate is one of the most costly components, finding low-cost and good-quality alternatives becomes strategic for the success of restoration projects. Commercial substrates, composed of materials such as bark, peat, and coconut fiber, are expensive due to processing and transportation. In this context, the use of agricultural and forestry residues, such as *biochar*, emerges as a sustainable and economically viable alternative. *Biochar*, a fine-grained carbon material with properties that improve water retention, nutrient availability, and carbon sequestration, has attracted increasing interest in seedling production. One potential feedstock for *biochar* production to be tested in seedling substrates is umbu fruit residue (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.), which shows potential for use in substrates for native species such as sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.). Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of *biochar* from umbu fruit residues on the production of sabiá seedlings under salinity conditions. Seeds were collected in the agreste region of Rio Grande do Norte (RN), and umbu fruit residues were obtained from a cooperative located in the municipality of Mossoró, RN. The experiment was conducted in a protected environment (greenhouse). Initially, typical Caatinga soil was collected, mixed with different doses of *biochar*, and incubated for 30 days in a plastic container, being turned daily and kept moist. The *biochar* doses applied were 0, 15, 30, 45, and 60 t ha⁻¹. After the incubation period, the substrate was characterized for its physical and chemical properties. The seedlings were grown in 280 mL tubes and irrigated daily. The following variables were evaluated: shoot length (SL), root length (RL), stem diameter (SD), number of leaves (NL), leaf area (LA), shoot dry mass (SDM), root dry mass (RDM), stem dry mass (StDM), total dry mass (TDM), Robustness Index (RI), and Dickson Quality Index (DQI). In general, *biochar* promoted the growth of sabiá seedlings, providing higher values mainly for stem diameter, leaf area, and shoot length. Biomass accumulation was also enhanced by *biochar* application, with the 60 t ha⁻¹ dose showing the greatest values. Moreover, *biochar* mitigated the effects of salt stress, creating favorable conditions for seedlings to activate adaptive and tolerance mechanisms to salinity.

Keywords: forest species, Caatinga, salinity, sustainability, waste utilization

CAPÍTULO 3

EFEITO DE *BIOCHAR* DE RESÍDUOS DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE SABIÁ (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.) SUBMETIDAS À SALINIDADE

1. INTRODUÇÃO

A produção de mudas de espécies florestais nativas envolve custos expressivos, especialmente relacionados aos insumos utilizados. Aproximadamente metade do custo total de produção corresponde à aquisição de substratos (22%), sacos plásticos (14%) sementes (7%) e adubação (7%), enquanto os demais 50% estão ligados à infraestrutura e à mão de obra (Smiderle e Souza, 2023). Nesse contexto, o aprimoramento das técnicas de produção torna-se essencial para projetos de restauração ambiental, uma vez que mudas de qualidade elevam significativamente o sucesso do estabelecimento em campo. Entre os elementos que influenciam diretamente esse desempenho, destaca-se a escolha do substrato, que deve atender às necessidades nutricionais específicas de cada espécie, favorecendo seu crescimento inicial (Filho *et al.*, 2015).

Como o substrato representa uma das parcelas de maior peso no custo final da produção de mudas (Kratz *et al.*, 2013), a substituição de parte desse insumo por materiais alternativos pode ser estratégica. Os substratos comerciais geralmente utilizam compostos orgânicos como casca de árvore, turfa, pó de coco e palha de arroz, associados ou não a materiais minerais e fertilizantes (Araújo *et al.*, 2017). Entretanto, a obtenção e processamento desses componentes encarecem o produto final, o que acaba impactando diretamente o custo da muda produzida (Lustosa Filho *et al.*, 2015; Araújo *et al.*, 2017).

A busca por alternativas que tornem a produção de mudas florestais mais acessível tem incentivado a utilização de resíduos agrícolas e florestais como insumos. Entre esses materiais, destacam-se subprodutos gerados no processo de carbonização da biomassa, como o *biochar*, que tem sido considerado opção ambiental e economicamente viável. O *biochar*, por exemplo, é um carvão de granulometria fina cuja utilização remonta a práticas agrícolas antigas e está associado às “terras pretas de índio”. Seu interesse atual decorre das propriedades que conferem ao solo maior capacidade de retenção hídrica, aumento da superfície de troca para nutrientes e liberação lenta desses elementos, além do potencial de contribuir para o sequestro de carbono (Chen *et al.*, 2019; Maia *et al.*, 2021).

No contexto da vegetação característica da Caatinga, o umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) ocupa posição de destaque por sua forte adaptação ao semiárido brasileiro, do qual é espécie endêmica. Seus nomes populares “umbu”, “imbu” ou “ambu” derivam do tupi-guarani e remetem à ideia de “árvore que fornece água”, referência direta à sua capacidade de armazenar água em órgãos subterrâneos, mecanismo fundamental para sua sobrevivência em longos períodos de seca. Além de seu valor ecológico, o umbuzeiro desempenha papel socioeconômico relevante, pois a coleta e comercialização de seus frutos representam uma importante fonte de alimentação e renda para diversas famílias rurais do Nordeste (Santos, 2021).

A salinidade do solo constitui um dos principais entraves ao desenvolvimento vegetal em regiões semiáridas, onde a baixa pluviosidade combinada à elevada evaporação favorece o acúmulo de sais na superfície (Tester e DavenportT, 2003). Nesse cenário, em que a salinidade do solo constitui um dos principais desafios à produção agrícola nas regiões semiáridas, a ampla disponibilidade de resíduos provenientes do processamento do umbuzeiro surge como uma oportunidade estratégica. Esses resíduos podem ser convertidos, por pirólise, em *biochar*, um material que tem demonstrado potencial para melhorar as condições do substrato, favorecendo a retenção de água, reduzindo a concentração de sais e criando um ambiente mais adequado ao crescimento de mudas sob estresse salino. Assim, além de agregar valor a um recurso já existente no território, essa abordagem pode contribuir para mitigar os efeitos da salinidade, fortalecendo práticas produtivas sustentáveis em região de clima semiárido.

A conversão desses resíduos em *biochar*, permite transformar um passivo agroindustrial em um condicionador de substrato com propriedades benéficas: aumento da capacidade de retenção hídrica, maior porosidade e CTC, além de potencial adsorção de íons sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-). Estudos experimentais e revisões recentes relatam ganhos no crescimento de plântulas e redução da toxicidade por sódio após aplicação de *biochar* em solos salinizados, embora a resposta dependa da matéria-prima do produto, do manejo e das propriedades do solo ou substrato (Su *et al.*, 2024; Gullap *et al.*, 2024; Araújo *et al.*, 2024).

Para espécies florestais nativas do bioma Caatinga como o sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.), a integração entre estudos de salinidade e o uso de *biochar* nos substratos de produção de mudas é promissora. Trabalhos sobre condicionamento de substratos com *biochar* demonstram efeitos positivos em mudas de espécies florestais e relatos recentes específicos para o semiárido apontam melhorias na qualidade de mudas

e mitigação de efeitos deletérios causados pelo estresse salino. Contudo, há necessidade de estudos que combinem a aplicação de doses de *biochar* de resíduos de umbu, o desenvolvimento inicial de mudas de sabiá e a salinidade, condição típica de solos do semiárido, validando, assim, protocolos de produção aplicáveis em viveiros locais (Petter, 2012; Silva, 2024; Gama, 2024).

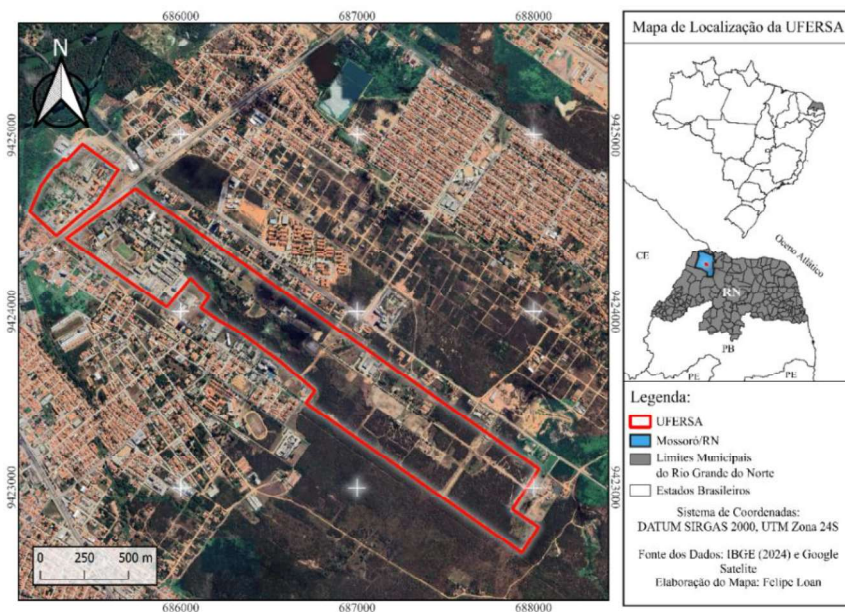
Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do *biochar* produzido a partir de resíduo de umbu sobre o desenvolvimento inicial de mudas de sabiá em condições de salinidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área em estudo

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação do curso de Engenharia Florestal, do Centro de Ciências Agrárias (CCA), Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), estando localizada na cidade de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte (Figura 1).

Figura 1. Localização da área de estudo. Mossoró-RN, 2025.



Fonte: Autor (2025).

2.2 Coleta do material

As sementes de sabiá foram coletadas de matrizes localizadas no município de Santana do Matos (RN), em agosto de 2023.

Para a produção de *biochar*, resíduos de frutos de umbu foram coletados em uma cooperativa de processamento de frutos para produção de polpas congeladas na cidade de Mossoró, a Cooperativa dos Agricultores e Agricultoras Familiares de Mossoró e Região (COOAFAM).

2.3 Produção do material

O *biochar* foi produzido em um forno desenvolvido na UFERSA, elaborado com base em modelo proposto pela International *Biochar* Initiative (IBI, 2020). Para tanto, resíduos de frutos de umbu passaram pelo processo de pirólise no supracitado forno por

um período de 2 h (tempo de residência). Como combustível no processo de queima, utilizou-se madeira descartada de serrarias locais.

Além disso, foram realizados o teor de cinzas, teor de voláteis, teor de carbono fixo e o rendimento do *biochar*, conforme a norma ASTM D3175-07.

Para o teor de cinzas, utilizou-se a análise termogravimétrica em que 1 g de *biochar* foi colocado em um cadinho sem tampa, levado à mufla a 900 °C por 4 horas. Este método degrada inteiramente a parte orgânica, resultando apenas a parte inorgânica da amostra. Após resfriadas em dessecador, pesou-se a amostra, a qual é obtida através da seguinte equação:

$$TC\% = \frac{Md}{Mi} \times 100$$

Em que:

TC %: teor de cinzas em percentagem de massa

Mi: massa inicial da amostra, em grama (g)

Md: massa da amostra após degradação térmica, em grama (g)

Para o teor de materiais voláteis foi pesado 1 g de material em um cadinho, levado a mufla à 950 °C durante 6 minutos. Após resfriamento em dessecador, foi verificada a massa do material. A seguinte equação foi utilizada para calcular o teor de materiais voláteis:

$$TMV = \frac{Mi - Ma}{Mi} \times 100$$

Em que:

TV: teor de materiais voláteis, dado em percentagem (%)

Mi: massa inicial da amostra, dada em grama (g)

Ma: massa após o aquecimento da amostra, dado em grama (g)

O teor de carbono fixo foi calculado através do cálculo da seguinte equação:

$$TCF = 100 - (TMV + TC)$$

Em que:

TCF: teor de carbono fixo, dado em percentagem (%)

100: percentual máximo do material

TMV: teor de materiais voláteis, dado em percentagem (%)

TC: teor de cinzas, dado em percentagem (%)

O rendimento do *biochar* foi calculado através da razão da matéria-prima seca pelo material pirolisado, multiplicado por 100, conforme Sato et. al. (2019), por meio da seguinte equação:

$$R = \frac{Ms}{Mp} \times 100$$

Em que:

R: rendimento do *biochar*, dado em percentagem (%)

Ms: matéria-prima seca, dado em gramas (g)

Mp: material pirolisado, dado em gramas (g)

O material foi resfriado após a pirólise, apresentando valores de 12,41% de teor de cinzas; 17,66% de teor de voláteis; 69,92% de carbono fixo e 30% de rendimento.

O substrato utilizado na produção das mudas foi um composto de solo típico da Caatinga misturado com manualmente com doses de *biochar* (0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹) Após a mistura, o substrato foi acondicionado em caixas plásticas de 50 litros, por 30 dias (período de incubação) sendo umedecido e revolvido diariamente. Após o período de incubação, realizou a caracterização físico-química do substrato no tocante aos seguintes atributos: potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, sódio, cálcio, magnésio, alumínio, soma de bases, capacidade de troca catiônica, seguindo metodologia proposta por EMBRAPA (2009). Os valores estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 Análise física e química dos substratos utilizados para o desenvolvimento inicial de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. Mossoró-RN, 2025.

Dose de <i>biochar</i>	Atributos químicos													
	pH H ₂ O	CE dSm ⁻¹	MO g kg ⁻¹	N	P	K ⁺ mg dm ⁻³	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺ cmolc dm ⁻³	H+Al	SB	CTC	V %
0 t ha ⁻¹	7,20	0,14	6,0	0,6	0,2	118,9	23,0	4,70	0,38	0,0	0,0	5,48	5,48	100
15 t ha ⁻¹	7,50	0,18	6,27	0,57	0,2	194,5	26,0	3,90	0,92	0,0	0,0	5,43	5,43	100
30 t ha ⁻¹	8,20	0,19	7,94	0,48	0,2	256,2	28,0	4,47	0,27	0,0	0,0	5,52	5,52	100
45 t ha ⁻¹	8,40	0,20	7,94	0,59	0,2	324,9	28,0	3,60	1,35	0,0	0,0	5,90	5,90	100
60 t ha ⁻¹	8,60	0,20	20,06	0,73	0,2	462,4	35,0	3,70	0,71	0,0	0,0	5,74	5,74	100

Dose de <i>biochar</i>	Atributos químicos				Atributos físicos		
	Cu mg dm ⁻³	Fe mg dm ⁻³	Mn	Zn	Areia	Silte %	Argila
0 t ha ⁻¹	0,45	6,50	35,35	15,45	82	12	6
15 t ha ⁻¹	0,45	8,0	39,90	16,0	85	9	6
30 t ha ⁻¹	0,45	15,55	41,65	16,0	85	9	6
45 t ha ⁻¹	0,40	12,40	42,80	18,25	84	10	6
60 t ha ⁻¹	0,45	10,85	52,50	19,10	84	10	6

Fonte: Autor (2025).

2.4 Produção das mudas

Para a produção de mudas foi utilizado tubetes de 280 ml, preenchidos pelo substrato, em que foram semeadas 2 sementes de sabiá por tubete. Para a superação da dormência foi aplicado a técnica de desponte do tegumento no lado oposto ao hilo.

A irrigação das mudas ocorreu da seguinte forma: diariamente, mantendo capacidade de campo do substrato em 60%. Todas as mudas foram irrigadas com água de abastecimento até os dez dias. Após o décimo dia foi realizado o desbaste das mudas, mantendo apenas uma muda por tubete. Em seguida, metade da população passou a ser irrigada com água salina (4,3 dSm⁻¹), e a outra metade continuou sendo irrigada com água de abastecimento (0,5 dSm⁻¹). O teor da água salina foi estabelecido com base nos resultados de Cosme *et al.* (2018), sendo a média da salinidade dos poços locais utilizados para irrigação.

Durante e após o experimento foram analisadas as seguintes variáveis: Comprimento da parte aérea (CPA) e Comprimento da raiz (CR), realizados com o auxílio de régua graduada em milímetros; Diâmetro do caule (DC), realizado com auxílio de paquímetro em milímetros, medindo-se a inserção entre o colo da planta e o substrato; Número de folhas (NF), através de contagem manual; Área foliar (AF), realizado pelo método do disco corrigido, conforme proposta de Santos *et al.* (2014). Massa seca da parte aérea (MSPA), Massa seca da raiz (MSR), Massa seca do caule (MSC) e Massa seca total (MST), através do acondicionamento de cada parte seccionada em sacos de papel. Em seguida, as embalagens foram mantidas em estufa de circulação forçada de ar durante 72 h por 70 °C para determinação da biomassa.

Além das variáveis supramencionadas, avaliou-se também os índices de Robustez e de Qualidade de Dickson, através das seguintes equações:

Índice de Robustez:

$$IR = \frac{H}{DC}$$

Em que:

IR = Índice de Robustez

H = altura da planta

DC = diâmetro do caule

Índice de Qualidade de Dickson:

$$IQD = [MST/(AP/DC) + MSA/MSR]$$

Em que:

IQD = Índice de Qualidade de Dickson

MST = massa seca total

AP = altura da parte aérea

DC = diâmetro do caule

MSPA = massa seca da parte aérea

MSR = massa seca da raiz

2.5 Delineamento experimental

O delineamento do experimento foi do tipo DBC (Delineamento em Blocos Casualizados), em esquema fatorial 2 x 5, duas águas de irrigação (salina e potável) e cinco doses de *biochar* (0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹). Ao todo, dez tratamentos distribuídos em quatro blocos. A unidade experimental foi representada por cinco mudas.

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à ANAVA (análise de variância) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, através do software SISVAR (Ferreira, 2019). Quando houve significância, foram gerados gráficos de regressão utilizando o software Sigmaplot®.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As doses de *biochar* obtido a partir do resíduo de umbu promoveram efeito significativo sobre o comprimento da parte aérea, o diâmetro do caule e a área foliar de mudas de sabiá, isoladamente. Em contrapartida, a salinidade influenciou de forma isolada apenas o diâmetro do caule da espécie (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância para comprimento da parte aérea (CPA), raiz (CR), diâmetro do caule (DC) e área foliar (AF) de mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. sob condição de salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.

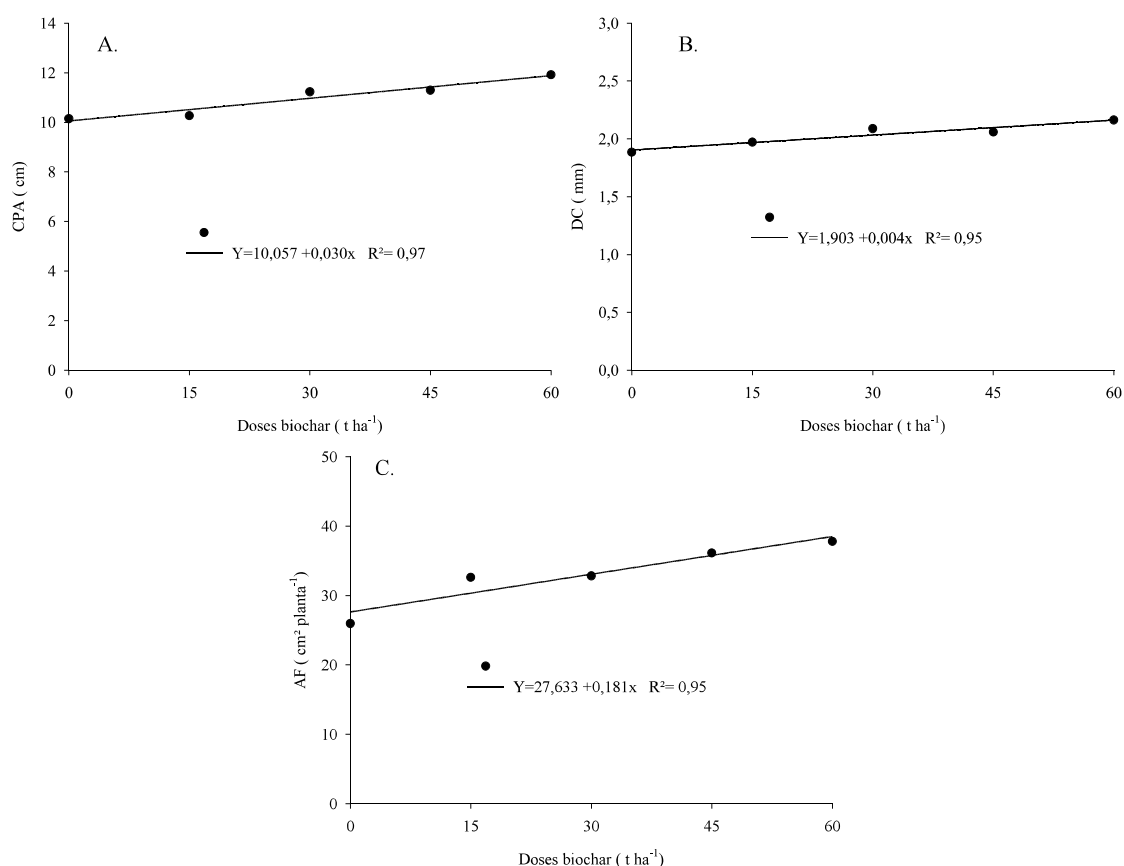
Fontes de Variação	Quadrado médio			
	CPA	CR	DC	AF
Salinidade (S)	0,44 ns	1,52 ns	0,37**	7,46 ns
Doses (D)	4,48**	5,63 ns	0,09**	165,01*
S x D	0,26 ns	2,5 ns	0,0009 ns	6,85 ns
CV (%)	7,91	10,54	5,36	22,67

* e ** significativo nos níveis de probabilidade de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo ao nível de probabilidade de 5%; CV: coeficiente de variação

Fonte: Autor (2025)

As doses de *biochar* provenientes do resíduo de umbu influenciaram significativamente o comprimento da parte aérea, o diâmetro do caule e a área foliar de mudas de sabiá, independentemente do nível de salinidade da água de irrigação (Figura 2). Para essas variáveis, observou-se resposta linear crescente, indicando que a maior dose (60 kg ha^{-1}) promoveu incrementos de 18,16%, 13,57% e 39,34% no comprimento da parte aérea, diâmetro do caule e área foliar, respectivamente.

Figura 2. Efeito das doses de *biochar* de resíduo de umbu no comprimento da parte aérea (A), diâmetro do caule (B) e área foliar (C) de mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. Mossoró-RN, 2025.



Fonte: Autor (2025)

O comprimento da parte aérea e o diâmetro do caule são variáveis importantes de serem analisadas durante pesquisas com mudas, sendo umas das principais características morfológicas analisadas, pois mudas mais altas demonstram maior qualidade e está diretamente relacionada com o crescimento da planta em campo. Da mesma forma, o diâmetro do caule também tem sua importância de análise visto que mudas com incremento em diâmetro apresentam maior capacidade de formação e crescimento de novas raízes. Isso ocorre em virtude do acúmulo de substâncias de reserva na haste, o que propicia às mudas aspecto mais sadio (Souza *et al.*, 2006; Scremin-Dias *et al.*, 2006; Gomes e Paiva, 2011).

No tocante à área foliar, percebeu-se o incremento significativo à medida que as doses de *biochar* aumentaram. Com maior área foliar, as mudas tendem a elevar a taxa fotossintética através de maior interceptação de luz solar, melhorando processos fisiológicos e metabólicos e produção de fotoassimilados (Pinto *et al.*, 2011). Destacando,

assim, a importância do *biochar* na promoção do aumento da área foliar das mudas atribuindo-as melhor qualidade.

Santos *et al.*, (2023), avaliando o desenvolvimento inicial de acácia (*Acacia mearnsii* De Wild.) perceberam que o aumento de doses de *biochar* feito com resíduos de madeira aumentou o comprimento da parte aérea, diâmetro do caule e a área foliar das mudas.

Ainda corroborando com os resultados encontrados para essas variáveis na presente pesquisa, Vieira, Fávris e Botelho (2025), estudaram a influência de doses de *biochar* de esterco de aves na produção de mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart. ex DC.) Standl.) e notaram incremento de variáveis morfológicas como altura e diâmetro do colo com maior disponibilidade de *biochar*.

Para o diâmetro do caule (DC), observou-se efeito isolado da salinidade, onde as mudas submetidas à irrigação com água salina apresentaram maior diâmetro em comparação às irrigadas com água potável (Tabela 3). Esse resultado sugere uma possível resposta adaptativa da espécie como mecanismo de tolerância. O incremento do diâmetro do caule pode representar uma estratégia adaptativa da espécie voltada ao reforço estrutural, ao armazenamento de compostos de reserva ou à preservação do fluxo constante de água translocando íons minerais, características típicas de espécies mais tolerantes a condições de estresse abiótico, como o estresse salino (Atabayeva *et al.* 2013).

Tabela 3. Efeito da salinidade no diâmetro do caule (DC) de mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. cultivadas sob condição de salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.

Água	DC
	mm
Potável	1,93 b
Salina	2,12 a

Letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey; ns = não significativo; * = teste de Tukey a 5% de probabilidade; ** = teste de Tukey a 1% de probabilidade

Fonte: Autor (2025)

Outros trabalhos também observaram esse comportamento atípico, como por exemplo, Fatahiyan, Najafi e Shirkhani (2025), avaliando o efeito de estresse salino em mudas de açafraão (*Carthamus tinctorius* L.) e Parida *et al.* (2016), avaliando o comportamento de mudas de árvore-mostarda (*Brassica juncea* L.) sob salinidade observaram que o aumento da salinidade provocada por cloreto de sódio também

promoveu aumento do diâmetro do colo das mudas. Esse comportamento pode indicar uma estratégia adaptativa de espécies, como o sabiá.

As doses de *biochar* e a salinidade influenciaram, de forma independente, o acúmulo de massa seca nas folhas, caules, raízes e parte aérea das mudas de sabiá. Em contrapartida, a massa seca total e o Índice de Qualidade de Dickson foram afetados apenas pelas doses de *biochar*, enquanto o Índice de Robustez apresentou efeito significativo apenas em função da salinidade (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância para comprimento da massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca da raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST), Índice de Robustez (IR) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. sob condição de salinidade e doses de *biochar* de resíduo de umbu. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de Variação	Quadrado médio						
	MSF	MSC	MSR	MSPA	MST	IR	IQD
Salinidade (S)	0,005**	0,002**	0,006*	0,01**	0,002 ns	1,8*	0,0002 ns
Doses (D)	0,008**	0,001**	4,92**	0,01**	0,04 **	0,11 ns	0,0006**
S x D	0,0003 ns	0,0002 ns	1,61 ns	0,001 ns	0,004 ns	0,03 ns	0,0001 ns
CV (%)	10,52	15,25	21,27	10,34	11,85	8,58	15,25

Fonte: Autor (2025)

Quanto ao efeito da salinidade sobre o acúmulo de massa seca, verificou-se que o uso de água salina promoveu incremento na MSF, MSC e MSPA de mudas de sabiá. Por outro lado, observou-se redução na MSR e IR das mudas em resposta ao estresse salino (Tabela 5).

Tabela 5. Efeito da salinidade na massa seca da folha (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e Índice de Robustez (IR) de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. cultivadas em substrato com resíduo de frutos de umbu. Mossoró-RN, 2025.

Água	MSF	MSC	MSPA	MSR	IR
	g planta ⁻¹				
Potável	0,18 b	0,087 b	0,27 b	0,17 a	5,63 a
Salina	0,20 a	0,104 a	0,315 a	0,15 b	5,20 b

Letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey; ns = não significativo; * = teste de Tukey a 5% de probabilidade; ** = teste de Tukey a 1% de probabilidade

Fonte: Autor (2025)

Esse incremento na MSF, MSC e MSPA, ainda que irrigadas com água salina, pode estar relacionado a uma resposta adaptativa do sabiá, uma estratégia da planta para conseguir sobreviver às condições de salinidade (Tabela 5). Estudos avaliando o

comportamento da espécie em estresses abióticos têm mostrado que a espécie pode aumentar o acúmulo de biomassa nas folhas, caule ou parte aérea para aumentar as chances de sobrevivência (Aroca e Ruiz-Lozano, 2012).

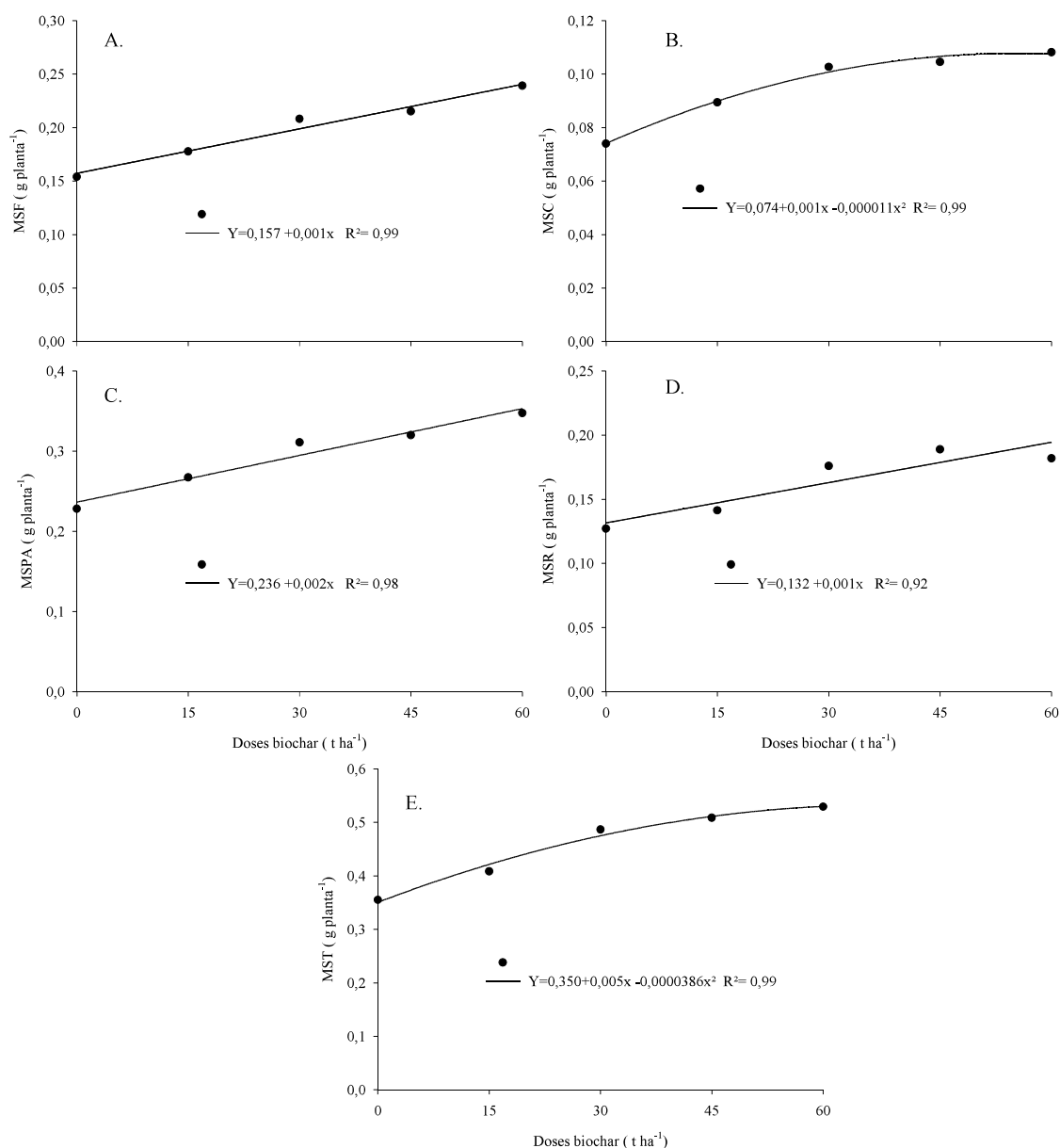
Até determinado momento, mesmo com salinidade e pouco estresse, é provável que a espécie consiga continuar absorvendo água através de ajustes osmóticos. Esse comportamento já foi relatado na literatura por Cavalcante (2023), ao avaliar o efeito do osmocondicionamento no desenvolvimento inicial de sabiá sob condições de estresse, observaram que o acúmulo de massa seca nas plântulas aumentou com as condições de estresse. Da mesma forma, Santiago, Nogueira e Lopes (2002), avaliando o crescimento de sabiá submetidas a estresse hídrico moderado, perceberam que plantas jovens da espécie desenvolvem estratégias para sobreviver às condições de restrições hídricas ao acumularem mais biomassa na parte aérea e no caule.

Com isso, o *biochar* pode ter contribuído para amenizar os efeitos do estresse salino, mantendo nível moderado nas mudas, fazendo com que estas tivessem condições de acionar mecanismos de investimento e sobrevivência em condições desfavoráveis.

Para a MSR e IR não foi possível observar o mesmo comportamento tendo a água salina afetado negativamente estas variáveis.

O acúmulo de massa seca foi influenciado positivamente pelas doses de *biochar*, independentemente da água de irrigação utilizada (Figura 3). Para a massa seca do caule e da massa seca total, observou-se comportamento quadrático, com valores máximos alcançados nas doses de 45,5 kg ha⁻¹ e 64,8 kg ha⁻¹, respectivamente. Essas doses proporcionaram incrementos de 38,57% e 46,29% em relação a dose zero. Por outro lado, para a massa seca das folhas, massa seca da parte aérea e massa seca das raízes, o comportamento foi linear, com a dose de 60 kg ha⁻¹ promovendo aumentos de 32,16%, 55,79% e 40,38%, em comparação a dose zero, respectivamente.

Figura 3. Efeito das doses de *biochar* de resíduo de umbu na massa seca de folha (A), caule (B), parte aérea (C), raiz (D) e total (E) de mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. Mossoró-RN, 2025.



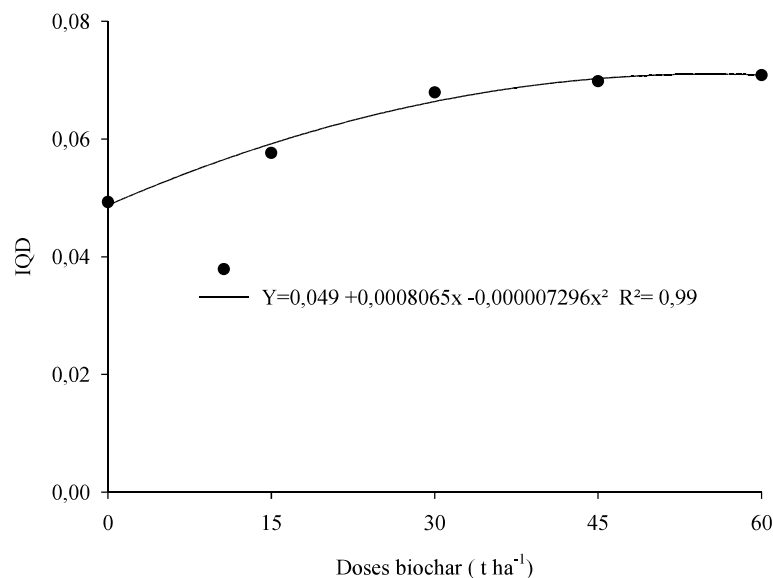
Fonte: Autor (2025)

De forma semelhante aos resultados encontrados no presente trabalho, Siqueira (2022), avaliando o efeito do *biochar* no crescimento de mudas de craibeira (*Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore), Borba (2023), analisando o crescimento de mudas de jucá (*Libidibia férrea* (Mart. ex Tul.) LP Queiroz) e Santos (2024), estudando o desenvolvimento inicial de mudas de ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC) Mattos), observaram que o aumento das doses de *biochar* também aumentou a quantidade de biomassa acumulada nas mudas. Esse comportamento

se deve, provavelmente, à composição dos diferentes tipos de *biochar* e consequente disponibilização de nutrientes para as mudas.

Já para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), as mudas de sabiá apresentaram resposta quadrática às doses de *biochar*, com incremento progressivo até a dose estimada de 55,3 t ha⁻¹, na qual se registrou o valor máximo da variável. Esse ponto correspondente a um aumento de 40% em relação ao tratamento sem aplicação de *biochar* (Figura 4). Com isso evidencia-se que as doses de *biochar* utilizadas foram suficientes para comprovar aumento na qualidade das mudas de sabiá, independentemente do tipo de água utilizada na irrigação.

Figura 4. Efeito das doses de *biochar* de resíduo de umbu no Índice de Qualidade de Dickson (IQD) em mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. Mossoró-RN, 2025.



Fonte: Autor (2025)

4. CONCLUSÃO

A aplicação de *biochar* de resíduos de frutos de umbu em substrato promove o crescimento vigoroso de mudas de sabiá.

A dose de 60 t ha⁻¹ de *biochar* mostrou-se a mais eficiente, favorecendo o crescimento das mudas de sabiá, com destaque para os aumentos no diâmetro do caule, área foliar, comprimento da parte aérea e acúmulo de biomassa.

O *biochar* pode atenuar impactos causados pela salinidade nas plantas, tornando-os moderados e criando condições favoráveis para as mudas de sabiá ativarem mecanismos de investimento e tolerância aos sais.

5. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. F.; AGUIAR, A. S.; ARAUCO, A. M. S.; GONÇALVES, E. O.; ALMEIDA, K. N. S. Crescimento e qualidade de mudas de paricá produzidas em substrato à base de resíduos orgânicos. **Nativa**, v. 5, p. 16-23, 2017.
- ARAÚJO, K. C.; SANTOS, W. M.; GONZAGA, M. I. S.; SILVA, A. N. C.; SOBRAL, L. F. *Biochar* melhorou a salinidade do solo, mitigou a toxicidade do sódio e melhorou o crescimento das plantas em solos afetados pelo sal. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 12, p. e95131247723–e95131247723, 7 dez. 2024.
- AROCA, R.; RUIZ-LOZANO J. M. **Regulation of Root Water Uptake Under Drought Stress Conditions**. In: Aroca, R. (eds) *Plant Responses to Drought Stress*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2012.
- ASTM INTERNACIONAL. **ASTM D3175-07: Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 5 p. 2007.
- ATABAYEVA, S.; NURMAHANOVA, A.; MINOCHA, S.; AHMETOVA, A.; KENZHEBAYEVA, S.; AIDOSOVA, S.; NURZHANOVA, A.; ZHARDAMALIEVA, A.; ASRANDINA, S.; ALYBAYEVA, R.; LI, T. The effect of salinity on growth and anatomical attributes of barley seedling (*Hordeum vulgare* L.). **African Journal of Biotechnology**, v. 12, p. 2366-2377, 2013.
- BORBA, L. G. L. **Biochar como condicionante de substrato na produção de mudas de *Libidibia ferrea***. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.
- CAVALCANTE, L. M. **Osmocondicionamento de sementes e seus efeitos na germinação e crescimento de mudas de Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) sob estresse hídrico**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural (CSTR), Patos, 2023.
- CHEN, W.; MENG, J.; HAN, X.; LAN, Y.; ZHANG, W. Past, presente and future of *biochar*. **Biochar**, v. 1, p. 75-78, 2019.
- COSME, C. R.; DA SILVA, D. N.; DE SOUZA, M. M. R.; DE PAIVA, O. A. M.; DE FREITAS, S. G.; DE MOURA, E. S. Avaliação da qualidade das águas de poços em comunidades e assentamentos rurais Mossoró-RN. **Acta Iguazu**, v. 7, n.2, p. 97-108.2018.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2009.
- FATAHIYAN, F.; NAJAFI, F.; SHIRKHANI, Z. Enhancing salt stress tolerance in *Carthamus tinctorius* L. through selenium soil treatment: anatomical, biochemical, and physiological insights. **BMC Plant Biology**, v. 1, p. 2-18, 2016.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 20 dez. 2019.

FILHO, Jose Ferreira Lustosa *et al.* Influence of organic substrates on growth and nutrient contents of jatob (*Hymenaea stigonocarpa*). **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 26, p. 2544–2552, 25 jun. 2015.

GAMA, D. C.; DEUS, D. A.; OLIVEIRA, F. F.; CASTRO, M. S.; SOUZA, M. O.; NASCIMENTO, J. S. Umbu tree (*Spondias tuberosa* Arr. Cam. – Anacardiaceae): From extractive to planted culture in Brazil. **Scientia Agraria** v. 20, p. 1-10, 2024.

GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. Viveiros florestais (propagação sexuada), Série didática. **Editora UFV**, 2011.

GULLAP, M. K.; KARABACAK, T.; SEVEROGLU, S.; KURT, A. N.; EKINCI, M.; AKTAS, H.; YILDIRIM, E. Biochar derived from olive oil pomace mitigates salt stress on seedling growth of forage pea. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 19 ago. 2024.

GULLAP, Mehmet Kerim *et al.* Biochar derived from olive oil pomace mitigates salt stress on seedling growth of forage pea. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 19 ago. 2024.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. SUBSTRATOS RENOVÁVEIS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 607–621, 2013.

KRATZ, Dagma *et al.* SUBSTRATOS RENOVÁVEIS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 607–621, 2013.

LUSTOSA FILHO, J. F.; NOBREGA, J. C. A.; NOBREGA, R. S. A.; DIAS, B. O.; AMARAL, F. H. C.; AMORIM, S. P. N. Influence of organic substrates on growth and nutrient contents of jatob (*Hymenaea stigonocarpa*). **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 26, p. 2544–2552, 25 jun. 2015.

MAIA, C. M. B. F.; GUIOTOKU, M.; PEIXOTO, R. T. G.; VARGAS, L. M. P. Biochar e o eucalipto. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF. Embrapa, 2021. Cap. 13, p. 589-609.

PARIDA, A. K.; VEERABATHINI, S. K.; KUMARI, A.; AGARWAL, P. K. Physiological, Anatomical and Metabolic Implications of Salt Tolerance in the Halophyte *Salvadora persica* under Hydroponic Culture Condition. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 3-18, 2016.

PETTER, F. A.; RIBEIRO, F. A.; MARIMON JUNIOR, B. H.; GONÇALVES, L. G.; SCHOSSLER, T. R. BIOCHAR COMO CONDICIONADOR DE SUBSTRATO PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO. **Revista Caatinga**, v. 25, p. 44-51, 2012.

PINTO, S. I. C.; FURTINI NETO, A. E.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.; MORETTI, B. S. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 523-533, 2011.

SANTIAGO, A. M. P.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; LOPES, E. C. Crescimento de plantas jovens de *Mimosa caesapiniifolia* Benth. cultivadas sob estresse hídrico. **Revista Ecosystema**, v. 26, p. 23-30, 2002.

SANTOS NETO, J. P.; SANTOS, Y. M. P.; CUNHA, P. S. J.; GATTI, V. C. M.; BARATA, H. S.; NUNES, G. G. T.; OLIVEIRA, J. T.; CARVALHO, F. I. M.; SILVA, P. A.; SANTANA, M. C. C. B. Functional liquor based on umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) and microalgae (*Spirulina* spp.). **Research, Society and Development**, v. 10, p. 1-9, 2021.

SANTOS, F. G. B.; NEGREIROS, M. Z.; MEDEIROS, J. F.; LOPES, W. A. R.; NUNES, G. H. S.; FREITAS, F. C. L. Growth and yield of Cantaloupe melon “Acclaim” in protected cultivation using agrotexile. **Horticultura Brasileira**, v. 32, p. 55–62, 2014.

SANTOS, M. B. S. B. **Biochar e extrato pirolenhoso no crescimento inicial de mudas de *Handroanthus impetiginosus***. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

SANTOS, Marina Remião dos *et al.* **DESARROLLO TEMPRANO DE *Acacia mearnsii* EN UN SUSTRATO QUE CONTIENE BIOCARBÓN DERIVADO DE FINOS DE CARBÓN VEGETAL**. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/269228>>.

SCREMIN-DIAS, E.; KALIFE, C.; MENEGUCCI, Z. R. H.; SOUZA, P. R. Manual de Produção de mudas de espécies florestais nativas. **Campo Grande: Editora UFMS**, 2006.

SILVA, C.; RIBEIRO, M. C. C.; SILVA, L. S.; LIMA, I.; COQUEIRO, P. Efeito do estresse salino na germinação de *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke. **ACSA Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 20, p. 63-65, 2024.

SIQUEIRA, E. S. **Uso de biochar na composição de substratos para a produção de mudas florestais**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. G. Custo de produção de mudas florestais produzidas em viveiro e semeadura direta a campo na Amazônia Setentrional. **MEIO AMBIENTE**, p. 8, 2024.

SOUZA, C. A. M.; OLIVEIRA, R. B.; MARTINS FILHO, S.; LIMA, J. S. S. CRESCIMENTO EM CAMPO DE ESPÉCIES FLORESTAIS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE ADUBAÇÕES. **Ciência Florestal**, v. 16, p. 243-249, 2006.

SU, Z.; LIU, X.; WANG, Z.; WANG, J. *Biochar* effects on salt-affected soil properties and plant productivity: A global meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 366, p. 121653, 1 ago. 2024.

SU, Z.; LIU, X.; WANG, Z.; WANG, J. *Biocchar* effects on salt-affected soil properties and plant productivity: A global meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 366, p. 121653, 1 ago. 2024.

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na⁺ Tolerance and Na⁺ Transport in Higher Plants. **Annals of Botany**, v. 91, n. 5, p. 503–527, 1 abr. 2003.

TESTER, MARK; DAVENPORT, ROMOLA. Na⁺ Tolerance and Na⁺ Transport in Higher Plants. **Annals of Botany**, v. 91, n. 5, p. 503–527, 1 abr. 2003.

VIEIRA, C. R.; FÁVARIS, N. A. B.; BOTELHO, R. A. Doses de esterco de aves no crescimento inicial de mudas de ipê roxo. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 23, n. 6, p. e10295–e10295, 16 jun. 2025.