



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA FLORESTAL**

MATHEUS DE ARAÚJO OLIVEIRA

**BIOCARVÃO DE *Syagrus coronata* (OURICURI) E SUA UTILIZAÇÃO EM
SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS**

RIO BRANCO - AC

MARÇO 2026

MATHEUS DE ARAÚJO OLIVEIRA

**BIOCARVÃO DE *Syagrus coronata* (OURICURI) E SUA UTILIZAÇÃO EM
SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Ciência
Florestal da Universidade Federal do Acre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo André Trazzi

Co-orientadora: Prof. Dra. Keiti Roseani Mendes
Pereira

RIO BRANCO - AC

MARÇO 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PRÓ- REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA FLORESTAL - PPGCIFLOR



ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MATHEUS DE ARAÚJO OLIVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO, STRICTO SENSU, EM CIÊNCIA FLORESTAL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE.

Às treze horas do dia trinta do mês de março de 2026, realizou-se, de forma online, por meio da plataforma Google Meet, a Sessão Pública de Defesa de Dissertação, intitulada: “**BIOCARVÃO DE *Syagrus coronata* (OURICURI) E SUA UTILIZAÇÃO EM SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS**”, de autoria do mestrando **Matheus de Araújo Oliveira**, discente do Programa de Pós - graduação em Ciência Florestal, da Universidade Federal do Acre - UFAC, em nível de Mestrado. Na ocasião, a Banca Examinadora esteve constituída pelos membros: **Prof. Dr. Paulo André Trazzi (Presidente - orientador - CCBN - UFAC); Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira - Membro externo – PPG Ciências Florestais - UFES; Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Junior - Membro externo - PPG Ciências Florestais - UFES**. Logo após a exposição oral, houve arguição pelos examinadores e, ao final da arguição, reaberta a sessão pública, o discente foi considerado APROVADO pela Banca Examinadora. E, ao término, foi lavrada a presente Ata, que será assinada pelos avaliadores.

Documento assinado digitalmente



PAULO ANDRE TRAZZI

Data: 01/04/2026 18:10:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo André Trazzi
(Presidente - orientador - CCBN - UFAC)

Documento assinado digitalmente



MARCOS VINICIUS WINCKLER CALDEIRA

Data: 06/04/2026 07:49:29-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira
(Membro externo – PPG Ciências Florestais – UFES)

Documento assinado digitalmente



ANANIAS FRANCISCO DIAS JUNIOR

Data: 06/04/2026 15:11:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Junior
(Membro externo - PPG Ciências Florestais – UFES)

O482b Oliveira, Matheus de Araújo, 1999 -

Biocarvão de *Syagrus coronata* (Ouricuri) e sua utilização em substrato para produção de mudas florestais / Matheus de Araújo Oliveira; Orientador: Dr. Paulo André Trazzi e Coorientadora Dr^a. Keiti Roseani Mendes Pereira. - 2026.

46 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Mestre em Engenharia Florestal, Rio Branco, 2026.

Inclui referências bibliográficas.

1. Biocarvão de ouricuri. 2. *Corymbia citriodora*. 3. Produção de mudas. I. Trazzi, Paulo André (Orientador). II. Pereira, Keiti Roseani Mendes (Coorientadora). III. Título.

CDD: 634

Bibliotecária: Nádia Batista Vieira CRB-11º/882

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO OLIVEIRA, Matheus de. 2026. Biocarvão de *Syagrus coronata* e sua utilização em substrato para produção de mudas florestais. Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal do Acre, Rio Branco-AC, 46 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Matheus de Araújo Oliveira

GRAU: Mestre

Concedo à Universidade Federal do Acre-UFAC permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestá-las somente para propósitos acadêmicos e científicos. Reservo outros direitos de publicação, de forma que nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem minha autorização por escrito.

Matheus de Araújo Oliveira

Endereço eletrônico: Matheus.araujo@sou.ufac.br

Enquanto você está vivo, você precisa de uma razão para sua existência. Ser incapaz de encontrar uma razão é o mesmo que estar morto.

Naruto Uzumaki, Masashi Kishimoto, 2007.

AGRADECIMENTOS

Àqueles que estiveram ao meu lado durante esta longa e transformadora jornada acadêmica, expresso minha mais sincera gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Paulo André Trazzi, cuja dedicação e comprometimento foram decisivos para a realização deste trabalho. Seu empenho constante em me orientar, mesmo nos momentos em que eu não correspondia da melhor forma — com atrasos, hesitações e certa desorganização — foi essencial para que eu não perdesse o rumo. Sempre presente, generoso em compartilhar conhecimento, firme em suas observações e atento aos detalhes, o professor Paulo foi mais do que um orientador: foi um verdadeiro guia acadêmico. Sua postura crítica e, ao mesmo tempo, acolhedora, me ensinou não apenas a pesquisar, mas também a ter responsabilidade e ética com aquilo que produz. Tenho plena consciência de que grande parte da maturidade acadêmica que desenvolvi ao longo deste processo se deve à sua atuação incansável e exemplar.

À minha coorientadora, Professora Doutora Keiti Rossiane Perreira, deixo um agradecimento igualmente profundo. Desde os tempos da graduação, sua presença tem sido constante e fundamental. Sua orientação cuidadosa, sua disponibilidade para o diálogo e seu olhar atento sobre minha trajetória contribuíram de maneira significativa para minha formação. Mais do que apoio técnico, a professora Keiti me ofereceu incentivo e confiança nos momentos em que mais precisei, e por isso, serei eternamente grato.

À minha namorada, Rayssa Castelo Branco, expresso minha mais profunda gratidão. Sua presença foi essencial em cada etapa desta jornada. Obrigado por me incentivar nos momentos de dúvida, por acreditar em mim mesmo quando eu vacilava, por me apoiar com paciência e carinho e, principalmente, por não me deixar desistir. Sua força, compreensão e amor foram o alicerce que me sustentou até a conclusão deste trabalho. Este resultado também é fruto da sua fé em mim.

A todos vocês, minha mais sincera gratidão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forno do tipo caixote utilizado na produção do biocarvão a 700 °C.....	14
Figura 2 - Etapas de preparo dos substratos experimentais para produção de mudas de <i>Corymbia citriodora</i> . A: mistura do biocarvão ao substrato comercial nas proporções de 20%, 40% e 60% (v/v); B: preenchimento dos tubetes com os substratos formulados.....	16
Figura 3 - Instalação dos blocos experimentais em viveiro. A: tubetes preenchidos com os substratos formulados contendo diferentes proporções de biocarvão; B: fileiras de tubetes identificadas de acordo com os respectivos tratamentos experimentais.....	17
Figura 4 - Distribuição dos tratamentos nos blocos experimentais em delineamento de blocos casualizados.....	17
Figura 5 - Distribuição da altura (cm) das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 30 dias após o plantio nos tratamentos B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial).....	22
Figura 6 - Distribuição da altura (cm) das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 60 dias após o plantio nos tratamentos B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial).....	25
Figura 7 - Distribuição da altura (cm) das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 90 dias após o plantio nos tratamentos B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial).....	28
Figura 8 - Distribuição da altura (cm) das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 120 dias após o plantio nos tratamentos B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial).....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos tratamentos experimentais utilizados na produção de mudas de <i>Corymbia citriodora</i> sob diferentes proporções de biocarvão de ouricuri.....	16
Tabela 2 - Altura média (cm) das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 30, 60, 90 e 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).....	31
Tabela 3 - Número médio de folhas das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão.....	34
Tabela 4 - Diâmetro médio das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão.....	35
Tabela 5 - Massas secas da parte aérea (MSPA), radicular (MSR) e total (MST) das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão.....	36
Tabela 6 - Índices morfológicos derivados das mudas de <i>Corymbia citriodora</i> aos 120 dias após a semeadura, calculados a partir dos valores médios dos tratamentos com biocarvão..	38

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
2 MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1 PRODUÇÃO DO BIOCARVÃO	14
2.2 PRODUÇÃO DE MUDAS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	15
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
3.1 VISÃO GERAL DA ANÁLISE ESTATÍSTICA	20
3.2 DINÂMICA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (30, 60, 90, 120 DIAS).....	20
3.3 VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS AOS 120 DIAS (Nº DE FOLHAS, DIÂMETRO DO COLETO).....	33
4 CONCLUSÃO.....	40
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS	45

BIOCARVÃO DE *Syagrus coronata* (OURICURI) E SUA UTILIZAÇÃO EM SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o biocarvão de *Syagrus coronata* como componente de substrato para produção de mudas de *Corymbia citriodora*. O biocarvão foi produzido mediante pirólise lenta em temperatura de 700 °C. Foram formulados substratos com incorporação de biocarvão nas proporções de 20%, 40% e 60% (v/v) em mistura com substrato comercial. O experimento foi conduzido em viveiro utilizando delineamento em blocos casualizados, com produção de mudas a partir de sementes em tubetes de 120 cm³. Os resultados demonstraram que a incorporação do biocarvão de ouricuri ao substrato influenciou positivamente o crescimento e a qualidade das mudas de *Corymbia citriodora*, destacando-se o tratamento B3 como o mais eficiente entre os avaliados. Esse tratamento promoveu maiores incrementos em altura, diâmetro do coleto e acúmulo de biomassa, resultando em mudas mais vigorosas e com melhor qualidade morfológica. As respostas observadas estiveram associadas às melhorias nas características químicas do substrato, especialmente ao aumento da disponibilidade de nutrientes, com destaque para os teores de fósforo e nitrato. Conclui-se que o biocarvão de ouricuri apresenta características físico-químicas adequadas para utilização como componente de substratos, constituindo uma alternativa sustentável e promissora para a produção de mudas florestais de alta qualidade na Amazônia.

Palavras-chave: Biocarvão de ouricuri; *Corymbia citriodora*; Substrato alternativo; Produção de mudas.

BIOCHAR FROM *Syagrus coronata* (OURICURI) AND ITS USE AS A SUBSTRATE COMPONENT FOR FOREST SEEDLING PRODUCTION

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate *Syagrus coronata* biochar as a substrate component for the production of *Corymbia citriodora* seedlings. The biochar was produced through slow pyrolysis at a temperature of 700 °C. Substrates were formulated by incorporating biochar at proportions of 20%, 40%, and 60% (v/v) into a commercial substrate. The experiment was conducted in a nursery using a randomized complete block design, with seedlings produced from seeds in 120 cm³ tubes. The results demonstrated that the incorporation of *Syagrus coronata* biochar into the substrate positively influenced the growth and quality of *Corymbia citriodora* seedlings, with treatment B3 showing the best performance among those evaluated. This treatment promoted greater increases in height, stem diameter, and biomass accumulation, resulting in more vigorous seedlings with superior morphological quality. The observed responses were associated with improvements in the chemical properties of the substrate, particularly increased nutrient availability, especially phosphorus and nitrate concentrations. It can be concluded that *Syagrus coronata* biochar possesses suitable physicochemical characteristics for use as a substrate component, representing a sustainable and promising alternative for the production of high-quality forest seedlings in the Amazon region.

Keywords: Ouricuri biochar; *Corymbia citriodora*; Alternative substrate; Seedling production.

1 INTRODUÇÃO

A produção de mudas de espécies arbóreas em viveiros desempenha um papel fundamental na restauração ambiental e no reflorestamento, especialmente em ecossistemas críticos e de alta sensibilidade ecológica, como a Amazônia. Viveiros florestais são essenciais para a propagação de espécies nativas em escala controlada, garantindo a diversidade genética e ecológica necessária para a recomposição de áreas degradadas (MARTINS, 2007). A adoção de técnicas adequadas para a produção de mudas e a restauração florestal é considerada essencial para aumentar o sucesso dos projetos de recomposição ambiental (MARTINS, 2007).

Contudo, a otimização da produção de mudas ainda enfrenta desafios significativos, particularmente no que tange à sobrevivência pós-transplante e à qualidade dos substratos utilizados. Substratos inadequados podem comprometer severamente o desenvolvimento radicular, a resistência das mudas a estresses hídricos e nutricionais, e, conseqüentemente, sua taxa de sobrevivência (GONÇALVES ET AL., 2000). A dependência de recursos não renováveis, como a turfa, e a crescente necessidade de reduzir custos operacionais têm impulsionado a busca por materiais alternativos e sustentáveis para a composição de substratos (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Nesse contexto, a incorporação de biocarvão (biochar) surge como uma alternativa promissora, dada a sua reconhecida capacidade de melhorar a retenção de água, a aeração do solo e a disponibilidade de nutrientes, contribuindo para a formação de mudas mais resilientes em viveiros (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

As propriedades do biocarvão são altamente influenciadas pela matéria-prima utilizada e pelas condições de pirólise, como temperatura e tempo de residência (WEBER; QUICKER, 2018). Biochars produzidos em diferentes faixas de temperatura podem apresentar variações significativas em pH, teor de carbono total, capacidade de troca catiônica (CTC) e teor de cinzas, impactando diretamente sua eficácia como condicionador de solo ou componente de substrato (LEHMANN; JOSEPH, 2015). Embora o potencial do biochar seja reconhecido, a literatura ainda apresenta uma escassez de estudos aprofundados sobre a caracterização energética do biochar de ouricuri e sua aplicação em substratos para espécies florestais de interesse econômico, como o *Corymbia citriodora*.

Entre as biomassas com potencial para a produção de biocarvão, a espécie *Syagrus coronata* (ouricuri), uma palmeira nativa da Caatinga e da Amazônia, destaca-se como matéria-

prima promissora. Sua biomassa é rica em lignina e celulose, conferindo ao biochar propriedades físico-químicas adequadas, como alta área superficial e porosidade, características desejáveis para o melhoramento de substratos. Além de suas qualidades intrínsecas, o ouricuri é amplamente disponível em regiões semiáridas e tropicais, onde comunidades locais já utilizam suas folhas e frutos para fins artesanais e alimentares (Rufino et al., 2008).

A valorização do ouricuri para a produção de biochar não apenas agrega valor a um recurso muitas vezes subutilizado, mas também fortalece práticas sustentáveis, alinhando-se às demandas por substratos ecologicamente viáveis. A incorporação desse biocarvão em substratos comerciais para mudas florestais pode, assim, otimizar a produção em viveiros amazônicos, reduzindo a dependência de insumos convencionais e promovendo ciclos econômicos locais integrados à conservação ambiental (LEHMANN; JOSEPH, 2015; MARTINS, 2007).

A padronização de sua produção e a determinação das proporções ideais de mistura em substratos ainda representam desafios a serem superados para atender às exigências específicas de cada espécie e otimizar os resultados na produção de mudas. A compreensão detalhada dessas variáveis é crucial para maximizar os benefícios do biochar e desenvolver protocolos mais eficientes e sustentáveis para viveiros.

Diante do exposto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar o uso do biochar de ouricuri (*Syagrus coronata*) produzido a 700 °C como componente de substrato na produção de mudas de *Corymbia citriodora*, analisando os efeitos de diferentes proporções desse material sobre o crescimento e a qualidade morfológica das mudas produzidas em viveiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 PRODUÇÃO DO BIOCARVÃO

As amostras de coquinhos de ouricuri, provenientes de palmeiras da espécie *Syagrus coronata*, foram coletadas em propriedades rurais localizadas na região do Moreno Maia, zona rural de Rio Branco, Acre, Brasil. Após a coleta, o material foi submetido à secagem em estufa de ventilação forçada, a 105 °C, por um período de 5 horas, com o objetivo de padronizar o teor de umidade antes da realização dos procedimentos experimentais.

A figura 1 apresenta o forno do tipo caixote para a produção do biochar. O forno foi construído com chapas metálicas galvanizadas, com dimensões aproximadas de 60 cm de comprimento, 50 cm de largura e 50 cm de altura. Este forno se baseia no princípio da pirólise controlada, no qual a biomassa é submetida ao aquecimento em ambiente com limitação de oxigênio, permitindo a conversão térmica em biocarvão com características específicas.

Figura 1 – Forno do tipo caixote utilizado na produção do biocarvão a 700 °C.



Fonte: Autor, 2026.

O forno é composto por duas câmaras: uma câmara interna, onde o material a ser carbonizado é inserido e uma câmara externa, onde ocorre a queima por meio de chamas responsável por fornecer calor necessário para o processo de pirólise.

A câmara externa possui portinholas que controlam a entrada de ar e o fluxo de chama, regulando diretamente a taxa de aquecimento e o perfil térmico do processo.

O processo de carbonização teve início com o acendimento das chamas na câmara externa, mantendo-se o fluxo de chama constante por aproximadamente 4 horas. A temperatura

interna foi monitorada com o auxílio de um termômetro digital acoplado a uma haste metálica inserida na câmara de carbonização, sendo controlada em 700 °C.

Após o resfriamento completo, o material carbonizado foi triturado manualmente com auxílio de almofariz e pistilo de porcelana, seguido de peneiramento sequencial utilizando peneiras metálicas de diferentes malhas, conforme a série granulométrica: 10, 20 , 35 , 60 , 100 e 200 mesh .

O peneiramento foi realizado de forma decrescente, iniciando-se pela peneira de maior abertura (10 mesh) e finalizando na de menor abertura (200 mesh), garantindo a separação dos diferentes tamanhos de partículas. O material retido em cada peneira foi pesado e quantificado para controle da distribuição granulométrica.

Para os tratamentos, foi utilizado o material retido nas peneiras de 10 mesh a 35 mesh, por apresentarem partículas médias com boa estrutura física, favorecendo a incorporação ao substrato e o equilíbrio entre porosidade e retenção hídrica.

O biochar padronizado foi, então, armazenado em sacos de papel tamanho M vedados, devidamente identificados com a temperatura de carbonização e faixa granulométrica utilizada, sendo mantido em local seco e protegido da luz até o momento de sua aplicação nos tratamentos experimentais.

2.2 PRODUÇÃO DE MUDAS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

2.2.1 Preparo do Substrato

Para a condução do experimento no viveiro, foram empregados tubetes plásticos com capacidade de 120 cm³ como recipientes para a produção de mudas de *Corymbia citriodora*.

Para a formulação do substrato, foram testadas diferentes proporções de incorporação de biochar produzido a 700 °C com o substrato comercial, em distintas concentrações, a saber: 20%, 40%, 60% do volume total do substrato, respectivamente. Essas proporções foram incorporadas no substrato até que atingiram 100% do volume total. Após a mistura dos componentes, o substrato foi homogeneizado para assegurar a distribuição uniforme do biochar, proporcionando condições de crescimento consistentes para todas as mudas, conforme as figuras abaixo.

Figura 2 – Etapas de preparo dos substratos experimentais para produção de mudas de *Corymbia citriodora*. A: mistura do biocarvão ao substrato comercial nas proporções de 20%, 40% e 60% (v/v); B: preenchimento dos tubetes com os substratos formulados.



Fonte: Autor, 2026

2.2.2 Delineamento experimental em blocos

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizado, composto por quatro tratamentos. Os tratamentos consistiram na adição de biocarvão de fruto de *Syagrus coronata* (ouricuri) em três proporções (20%, 40% e 60%) ao substrato comercial, além de um tratamento Controle constituído por 100% de substrato comercial (Tabela 1).

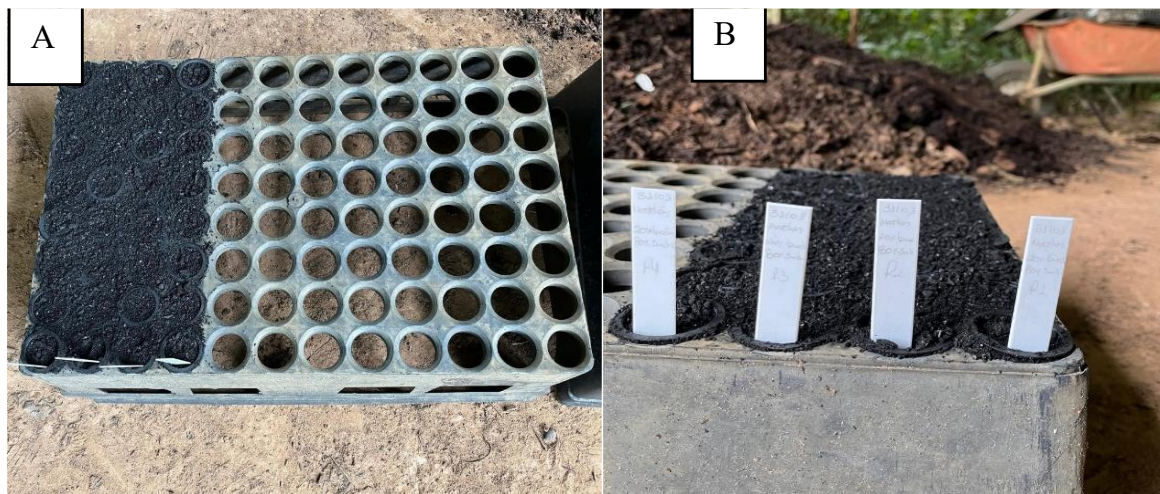
Tabela 1 - Composição dos tratamentos experimentais utilizados na produção de mudas de *Corymbia citriodora* sob diferentes proporções de biocarvão de ouricuri (*Syagrus coronata*)

Resíduos	Tratamentos	Descrição dos tratamentos
Biocarvão de <i>Syagrus coronata</i>	B1	20% de biocarvão + 80% substrato comercial
	B2	40% de biocarvão + 60% substrato comercial
	B3	60% de biocarvão + 40% substrato comercial
Testemunha	Controle	100% de substrato comercial

Fonte: Autor, 2026.

Os tratamentos foram distribuídos em quatro blocos, sendo cada bloco composto por 32 plantas, totalizando 128 mudas no experimento.

Figura 3- Instalação dos blocos experimentais em viveiro. A: tubetes preenchidos com os substratos formulados contendo diferentes proporções de biocarvão; B: fileiras de tubetes identificadas de acordo com os respectivos tratamentos experimentais.



Fonte: Autor, 2026.

2.2.3 Instalação do Experimento

As bandejas contendo os tubetes devidamente randomizados e as sementes de *Corymbia citriodora* foram posicionadas dentro da estufa, tendo sua irrigação realizada de forma automática ao longo do dia. Foi realizada a inspeção e o cuidado individual de cada planta, visando eliminar possíveis espécies invasoras que possam prejudicar o desenvolvimento das plântulas.

Figura 4 - Distribuição dos tratamentos nos blocos experimentais em delineamento de blocos casualizados.



Fonte: Autor, 2026.

Foram realizadas análises semanais das características morfofisiológicas da planta desde o momento da repicagem até os 120 dias do experimento, quando este foi encerrado. Foram analisadas as seguintes variáveis:

- Altura (H);
- Diâmetro do coleto (DC);
- Massa seca da parte aérea (MSPA);
- Massa seca do sistema radicular (MSR);
- Massa seca total (MST);
- Relações entre H/DC;
- MSPA/MSR;
- Índice de robustez;
- Índice de Qualidade Dickson (IQD).

Equação 1: Índice de Qualidade Dickson

$$IQD = MST \frac{(g)}{H \frac{(cm)}{DC} (mm) + MSPA \frac{(g)}{MSR} (g)}$$

Equação 2: Índice de robustez

$$IR = H \frac{(cm)}{DC} (mm)$$

Em que:

IR = Índice de Robustez

H = altura (cm)

DC = diâmetro de coleto (mm)

IQD = Índice de Qualidade de Dickson

MST = massa de matéria seca total

MSPA = massa de matéria seca da parte aérea

MSR = massa de matéria seca do sistema radicular

As medições da altura da parte aérea e do diâmetro do coleto das plantas foram conduzidas utilizando uma régua graduada e um paquímetro digital. As plantas foram cuidadosamente separadas em parte aérea e sistema radicular por meio de uma tesoura de poda

pequena. Para limpar o sistema radicular do substrato, as raízes foram lavadas em água corrente. Em seguida, ambos os materiais foram colocados em uma estufa de circulação forçada a 70 °C por 72 horas, até a obtenção de pesos constantes.

As pesagens foram realizadas após o resfriamento, utilizando uma balança semi-analítica com três casas decimais. A determinação da massa seca da parte aérea e das raízes foi obtida individualmente para cada muda, e os valores foram somados para obter a biomassa total (MST). A relação entre a massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca das raízes (MSR) foi utilizada para determinar um dos índices de qualidade. Adicionalmente, as características morfológicas foram submetidas à análise de variância (ANOVA), seguida pela comparação das médias pelo teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 VISÃO GERAL DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados coletados para cada variável foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças significativas entre os tratamentos. Para as variáveis em que a ANOVA indicou um efeito significativo ($p \leq 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas duas a duas pelo teste de Tukey, com um nível de significância de 5%. Esta abordagem permite identificar quais tratamentos se destacam e como as diferentes proporções de biocarvão influenciam o crescimento das mudas em comparação com o Substrato comercial Carolina puro. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Após a verificação do atendimento aos pressupostos ($p > 0,05$), os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

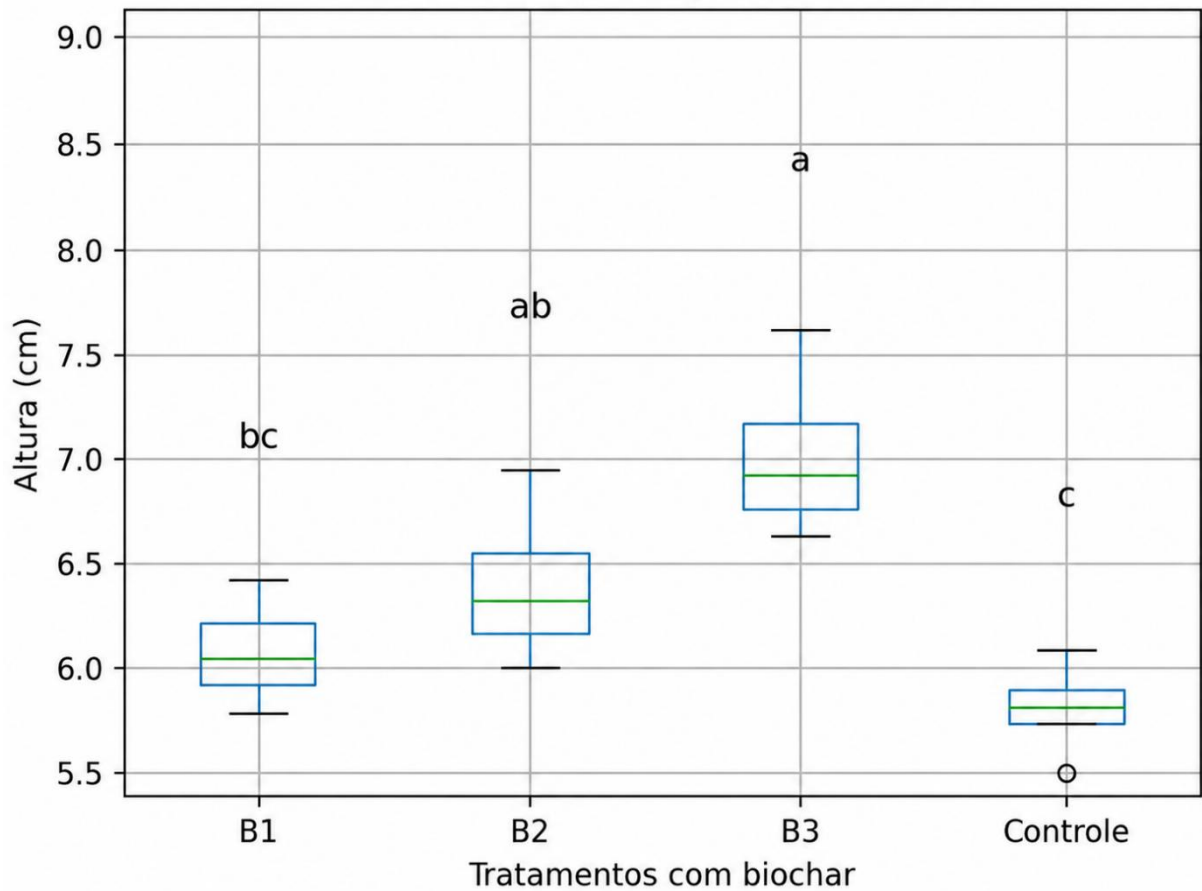
3.2 DINÂMICA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (30, 60, 90, 120 DIAS)

O monitoramento da altura das mudas de *Corymbia citriodora* ao longo de 120 dias resultou em diferenciação entre os tratamentos, com o tratamento B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) consistentemente apresentando as maiores médias de altura desde os 30 dias até o final do experimento, enquanto o tratamento Controle (100% substrato comercial) registrou os menores valores.

Observou-se aumento progressivo da altura das mudas ao longo do período experimental em todos os tratamentos avaliados. O tratamento B3 apresentou os maiores valores médios de altura em todas as épocas de avaliação, seguido pelos tratamentos B2, B1 e Controle (100% substrato comercial).

Aos 30 dias após o plantio, as mudas submetidas ao tratamento B3 apresentaram altura média de 7,01 cm, enquanto B2, B1 e Controle (100% substrato comercial) registraram 6,38 cm, 6,07 cm e 5,80 cm, respectivamente. Aos 60 dias, as médias passaram para 8,94 cm (B3), 7,80 cm (B2), 7,65 cm (B1) e 6,98 cm (Controle (100% substrato comercial)). Aos 90 dias, os valores observados foram de 10,26 cm para B3, 9,15 cm para B2, 8,78 cm para B1 e 8,70 cm para Controle (100% substrato comercial). Já aos 120 dias, as alturas médias atingiram 11,47 cm no tratamento B3, 10,47 cm em B2, 9,69 cm em B1 e 9,43 cm em Controle (100% substrato comercial).

Figura 5 - Distribuição da altura (cm) das mudas de *Corymbia citriodora* aos 30 dias após o plantio nos tratamentos.



Em que: B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial). Fonte: Autor, 2026.

A Figura 5 apresenta o crescimento em altura das mudas aos 30 dias após o plantio nos diferentes tratamentos, evidenciando o comportamento inicial dos tratamentos com biocarvão sobre o crescimento vegetativo. Observa-se que o tratamento B3 apresentou os maiores valores medianos de altura, além de menor dispersão dos dados, indicando maior uniformidade no desenvolvimento das mudas sob essa condição. Em contraste, o tratamento Controle (100% substrato comercial) apresentou os menores valores e maior variabilidade, sugerindo menor eficiência na promoção do crescimento inicial.

Embora as diferenças absolutas fossem relativamente pequenas nesta fase, a tendência de superioridade do tratamento B3 já se manifestava, indicando um efeito precoce da incorporação de biocarvão em proporções mais elevadas. Este achado sugere que, desde as

primeiras semanas de desenvolvimento, o biocarvão começa a exercer sua influência sobre o ambiente radicular, promovendo condições mais favoráveis para o estabelecimento da muda.

A análise estatística, conforme o teste de Tukey, revelou que o tratamento B3 já se destacava significativamente em relação ao Controle (100% substrato comercial) enquanto os tratamentos B1 e B2 apresentavam um desempenho intermediário, mas com uma clara inclinação positiva em comparação ao substrato sem biocarvão. Os tratamentos B1 e B2 exibiram comportamento intermediário, com distribuição relativamente homogênea, porém sem alcançar os níveis de crescimento observados em B3.

Esse padrão inicial indica que o biocarvão, dependendo de sua formulação ou dose, pode influenciar precocemente o desenvolvimento das mudas, possivelmente por melhorias nas propriedades físicas e químicas do substrato, como aumento da retenção de água, maior disponibilidade de nutrientes e estímulo à atividade microbiana benéfica. Ainda que as diferenças neste estágio inicial sejam moderadas, o destaque do tratamento B3 sugere um efeito promissor que tende a se intensificar ao longo do ciclo de crescimento, tornando-se relevante para a qualidade final das mudas.

A interpretação fisiológica do crescimento inicial observado aos 30 dias aponta para a rápida resposta das mudas às condições otimizadas do substrato proporcionadas pelo biocarvão. A estrutura porosa do biocarvão, conforme descrito por (LEHMANN; JOSEPH, 2015), contribui para uma melhor aeração e capacidade de retenção de água no substrato, fatores cruciais para o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes nos estágios iniciais.

Um sistema radicular bem estabelecido é fundamental para o suporte físico da planta e para a eficiência na captação de água e minerais, o que se reflete diretamente no crescimento da parte aérea. A maior disponibilidade de oxigênio para as raízes e a manutenção de umidade adequada, mesmo em períodos de menor irrigação, podem ter favorecido a atividade metabólica e a divisão celular, impulsionando o alongamento caulinar.

Além disso, a potencial capacidade do biocarvão de adsorver e liberar nutrientes de forma gradual pode ter garantido um suprimento constante para as jovens plântulas, evitando deficiências nutricionais que poderiam comprometer o crescimento precoce. Esses mecanismos combinados sugerem a superioridade inicial dos tratamentos com biocarvão, especialmente o B3.

A fase de estabelecimento, que compreende os primeiros 30 a 60 dias após o plantio, é um período crítico para a sobrevivência e o desenvolvimento futuro das mudas florestais. Durante este tempo, as plantas estão se adaptando a um novo ambiente, desenvolvendo seu sistema radicular e iniciando a fotossíntese de forma autônoma. Qualquer fator que otimize este

processo, como a melhoria das condições do substrato, pode ter um impacto significativo na qualidade final da muda e no seu desempenho em campo.

A capacidade de uma muda estabelecer-se rapidamente e de forma vigorosa após o transplântio é reconhecida como um dos principais preditores de sucesso no campo, pois reduz a mortalidade inicial e favorece o crescimento subsequente das plantas (Carneiro, 1995; Gomes & Paiva, 2013).

A intervenção com biocarvão, ao promover melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do substrato, cria um ambiente radicular mais favorável ao desenvolvimento inicial, aumentando a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana benéfica (LEHMANN; JOSEPH, 2015; STEINER ET AL., 2007). Essas melhorias contribuem para a formação de mudas mais vigorosas e resilientes, capazes de tolerar estresses ambientais e bióticos comuns tanto em viveiros quanto após o plantio definitivo (Glaser et al., 2002).

A importância dessa fase inicial é amplamente reconhecida na literatura, que aponta forte correlação entre o vigor de mudas jovens e o desempenho em estágios posteriores de desenvolvimento, incluindo maior sobrevivência, crescimento acelerado e melhor adaptação às condições edafoclimáticas (Grossnickle, 2012; Villar-Salvador et al., 2013).

A comparação dos resultados iniciais com a literatura corrobora a observação de que o biocarvão pode influenciar positivamente o crescimento de mudas em estágios precoces. Petter et al. (2012), ao avaliarem o uso de biochar produzido a partir de resíduos vegetais na produção de mudas de *Eucalyptus urograndis*, observaram que a incorporação desse material ao substrato promoveu melhorias no crescimento das plantas, embora os efeitos tenham variado conforme a proporção utilizada. Os autores destacam que doses moderadas de biochar podem favorecer o desenvolvimento das mudas, enquanto proporções excessivas podem limitar o crescimento.

A estrutura altamente porosa do biochar também é apontada como um dos principais fatores responsáveis por seus efeitos positivos no substrato. Segundo Lehmann e Joseph (2015), biochars produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa apresentam elevada porosidade e grande área superficial, características que contribuem para melhorar a aeração do substrato, aumentar a retenção de água e favorecer o desenvolvimento radicular das plantas, especialmente nas fases iniciais de crescimento.

De forma semelhante, Rezende et al. (2016), ao estudarem o uso de biochar ativado na composição de substratos para produção de mudas florestais, observaram que a adição desse material promoveu melhorias no crescimento das plantas e nas propriedades físicas do

substrato. No entanto, os autores destacam que biochars submetidos a processos de ativação apresentaram efeitos mais pronunciados sobre o desenvolvimento das mudas, possivelmente devido ao aumento da área superficial e da capacidade de adsorção de nutrientes do material.

Esses resultados reforçam que o uso de biochar na formulação de substratos pode contribuir para a melhoria das condições físicas e químicas do meio de cultivo, favorecendo o crescimento inicial das mudas, embora os efeitos observados dependam de fatores como o tipo de biomassa utilizada na produção do biochar, as condições de pirólise e a proporção do material incorporada ao substrato.

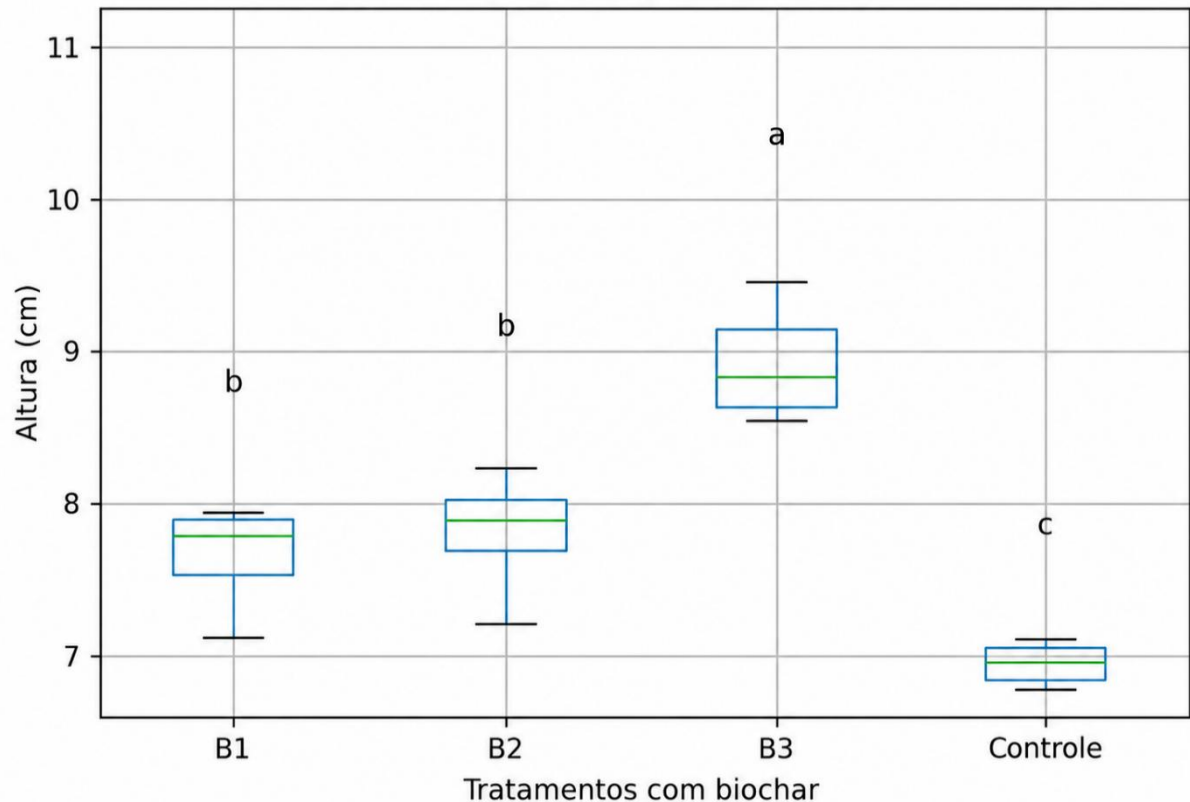
A consistência das evidências reportadas na literatura reforça a validade dos resultados obtidos neste estudo, indicando que o biocarvão de *Syagrus coronata* possui características semelhantes a outros biocarvões estudados, promovendo um ambiente mais propício para o crescimento inicial das mudas de eucalipto.

A Figura 6 apresenta a distribuição da altura das mudas aos 60 dias após o plantio, permitindo observar a evolução do crescimento em relação à avaliação anterior e evidenciando com maior clareza os efeitos dos tratamentos com biocarvão. Nota-se que o tratamento B3 apresentou desempenho superior, com valores de altura variando aproximadamente entre 8,6 e 9,5 cm, e mediana próxima de 8,9 cm, indicando crescimento mais elevado e relativamente uniforme das mudas.

Os tratamentos B1 e B2 apresentaram comportamento intermediário, com valores concentrados entre aproximadamente 7,1 e 7,9 cm para B1 e 7,2 e 8,2 cm para B2, com medianas próximas de 7,7 cm e 7,9 cm, respectivamente. Esses resultados indicam que esses tratamentos promoveram desenvolvimento satisfatório, porém inferior ao observado no tratamento B3.

Por outro lado, o tratamento Controle (100% substrato comercial) apresentou os menores valores de altura, variando aproximadamente entre 6,8 e 7,1 cm, com mediana próxima de 7,0 cm, evidenciando menor eficiência na promoção do crescimento vegetativo das mudas.

Figura 6 - Distribuição da altura (cm) das mudas de *Corymbia citriodora* aos 60 dias após o plantio nos tratamentos.



Em que: B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial). Fonte: Autor, 2026.

As médias de altura foram de 8,94 cm para o tratamento B3 (60% de biocarvão), 7,80 cm para B2 (40% de biocarvão), 7,65 cm para B1 (20% de biocarvão) e 6,98 cm para Controle (Substrato comercial). A análise estatística, utilizando o teste de Tukey, confirmou que o tratamento B3 manteve-se significativamente superior aos demais, enquanto B1 e B2 apresentaram um agrupamento distinto do Controle (100% substrato comercial), indicando que o efeito benéfico do biocarvão se tornou mais pronunciado com o avanço do tempo. Este padrão de crescimento sugere que os mecanismos de ação do biocarvão no substrato, como a melhoria da estrutura física e a otimização da disponibilidade de nutrientes, continuaram a influenciar positivamente o desenvolvimento das mudas. A consistência na performance superior do B3 ressalta a importância da proporção de biocarvão para maximizar o crescimento em altura neste estágio intermediário do ciclo de viveiro.

A consolidação do efeito do biocarvão observada aos 60 dias pode ser atribuída a uma série de mecanismos que se intensificam com o tempo de contato entre o biocarvão e o substrato. A melhoria da porosidade do substrato, proporcionada pela estrutura do biocarvão, otimiza a aeração e a drenagem, enquanto sua alta capacidade de retenção de água garante um suprimento hídrico mais estável para as mudas (LEHMANN; JOSEPH, 2015). Esses fatores são cruciais para o desenvolvimento contínuo do sistema radicular, que, por sua vez, sustenta o crescimento da parte aérea. Além disso, o biocarvão pode atuar como um reservatório de nutrientes, adsorvendo íons e liberando-os gradualmente, o que minimiza perdas por lixiviação e assegura uma nutrição mais equilibrada para as plantas (Petter et al., 2012).

A interação entre o biocarvão e a microbiota do solo também pode desempenhar um papel importante, promovendo um ambiente mais favorável para a atividade microbiana benéfica, que auxilia na ciclagem de nutrientes e na proteção contra patógenos. A sinergia desses efeitos contribui para a robustez das mudas, permitindo que elas mantenham um ritmo de crescimento acelerado e se tornem mais resilientes a estresses ambientais, o que é evidenciado pela superioridade contínua do tratamento B3.

A relação entre o crescimento em altura e o desenvolvimento radicular é intrínseca e fundamental para a saúde e o vigor das mudas. Aos 60 dias, a superioridade no crescimento da parte aérea nos tratamentos com biocarvão, especialmente no B3, sugere um sistema radicular igualmente mais desenvolvido e eficiente. O biocarvão, ao modificar a estrutura física do substrato, como o aumento da macroporosidade funcional e a redução de impedimentos físicos, cria um ambiente mais propício para a emissão e o alongamento radicular (REZENDE, F. A. et al. 2016).

Um sistema radicular robusto é essencial para a absorção de água e nutrientes, bem como para a ancoragem da planta, fatores que impactam diretamente o crescimento da parte aérea. A maior retenção de água proporcionada pelo biocarvão também contribui para reduzir o estresse hídrico entre as irrigações, permitindo que as raízes funcionem de forma mais eficiente. Essa interconexão entre o desenvolvimento radicular e o crescimento da parte aérea é um dos pilares para a produção de mudas de alta qualidade, com maior capacidade de sobrevivência e crescimento após o transplante para o campo. A otimização do ambiente radicular pelo biocarvão, portanto, é um mecanismo chave para explicar os resultados observados.

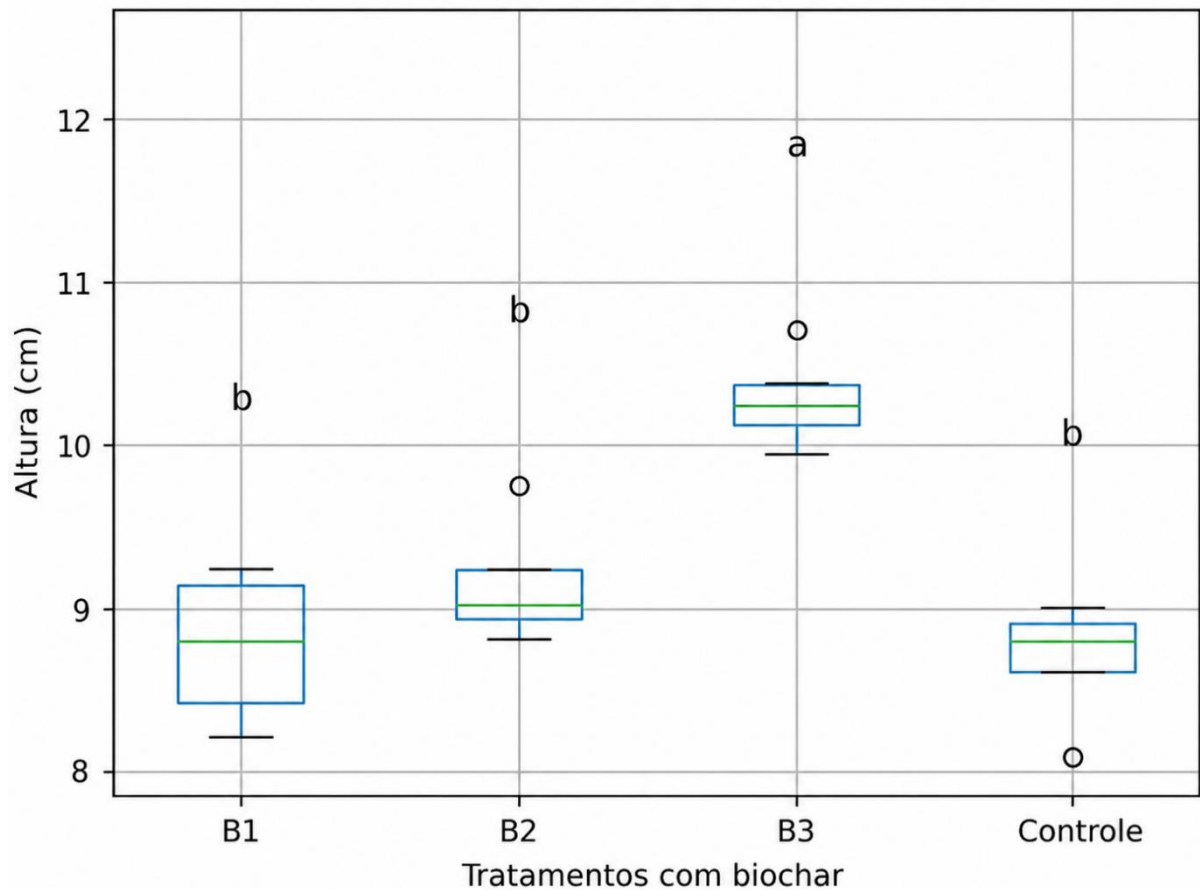
A literatura científica tem consistentemente demonstrado que o biocarvão pode influenciar positivamente o crescimento de mudas, e os resultados observados aos 60 dias neste estudo estão em consonância com esses achados. Petter et al. (2012) , em sua pesquisa sobre o

uso de biocarvão na produção de mudas de eucalipto, também verificaram que doses moderadas de biocarvão resultaram em melhor desempenho das mudas, com reflexos positivos em altura e diâmetro. Eles destacam que a resposta pode variar dependendo da concentração de biocarvão, sugerindo a existência de uma faixa ótima.

De forma similar, Rezende et al. (2016) observaram que a adição de biocarvão ativado em substratos para mudas de teca melhorou significativamente o desenvolvimento em altura e diâmetro do coleto. Esses estudos reforçam a ideia de que o biocarvão, ao modificar as propriedades físico-químicas do substrato, como a capacidade de retenção de água e a disponibilidade de nutrientes, cria um ambiente mais favorável para o crescimento vegetal. A consistência entre os resultados do presente estudo e a literatura existente valida a eficácia do biocarvão de *Syagrus coronata* como um condicionador de substrato, especialmente em doses que otimizam o desenvolvimento das mudas nos estágios iniciais e intermediários de crescimento.

A Figura 7 apresenta a distribuição da altura das mudas aos 90 dias após o plantio, etapa que corresponde a uma fase intermediária do desenvolvimento, na qual o crescimento vegetativo já se encontra mais consolidado e as plantas apresentam maior exigência por recursos hídricos e nutricionais. Nessa fase, torna-se possível observar com maior clareza a consistência do efeito dos tratamentos ao longo do tempo, bem como identificar possíveis tendências de estabilização ou intensificação das diferenças entre eles. A avaliação aos 90 dias é particularmente relevante por representar um momento de transição entre o crescimento inicial e a formação estrutural mais robusta das mudas, permitindo inferir sobre o equilíbrio fisiológico e a eficiência do substrato em sustentar o desenvolvimento vegetal.

Figura 7 - Distribuição da altura (cm) das mudas de *Corymbia citriodora* aos 90 dias após o plantio nos tratamentos.



Em que: B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial). Fonte: Autor, 2026.

As médias de altura foram de 10,26 cm para o tratamento B3 (60% de biocarvão), 9,15 cm para B2 (40% de biocarvão), 8,78 cm para B1 (20% de biocarvão) e 8,70 cm para Controle (100% substrato comercial). O teste de Tukey indicou que o tratamento B3 permaneceu estatisticamente superior, enquanto B1, B2 e Controle (100% substrato comercial) formaram um grupo mais homogêneo, com Controle (100% substrato comercial) ainda apresentando os menores valores. Aos 90 dias após o plantio, a superioridade do tratamento B3 (60% de biocarvão) torna-se evidente, apresentando média de altura de 10,26 cm, enquanto B2 (40%) atingiu 9,15 cm, B1 (20%) 8,78 cm e o Controle (100% substrato comercial) 8,70 cm.

O teste de Tukey indicou que apenas B3 diferiu estatisticamente dos demais, os quais formaram um grupo homogêneo, embora Controle (100% substrato comercial) tenha mantido

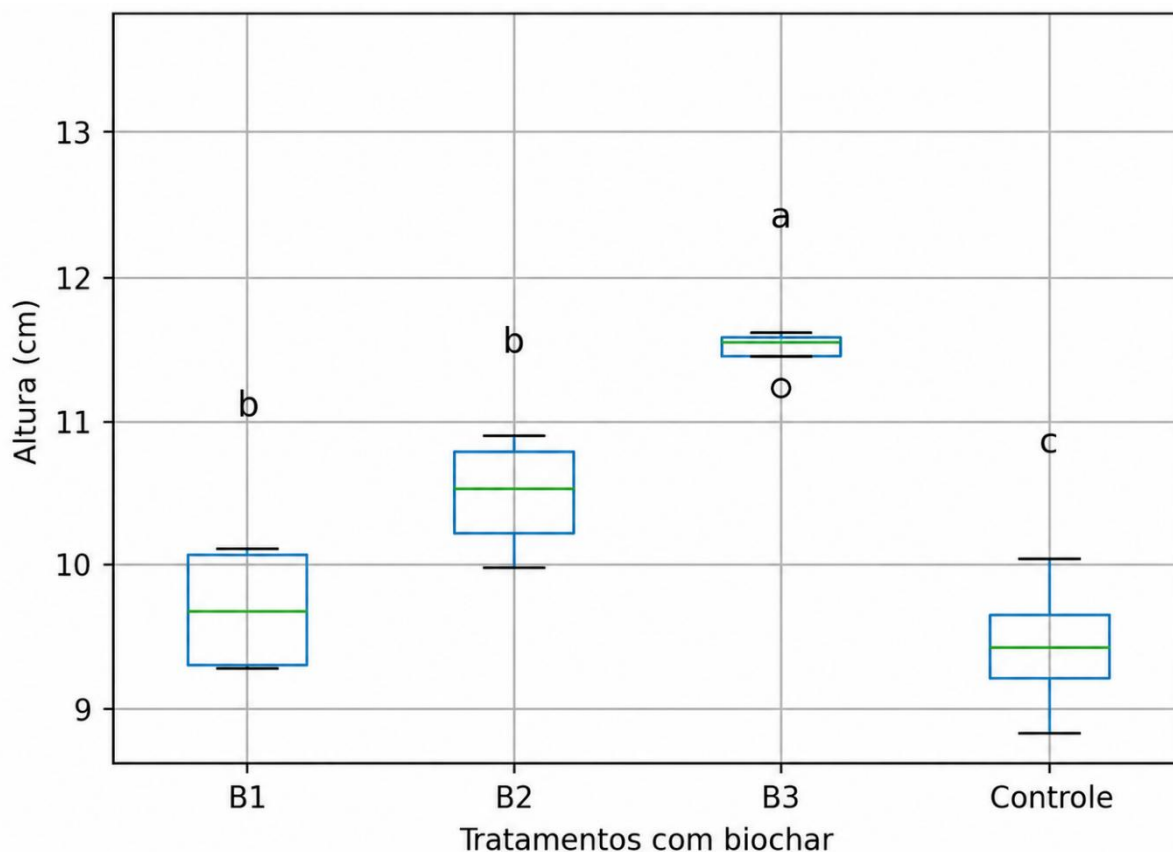
os menores valores. Esse comportamento indica que a incorporação de biocarvão em proporções adequadas melhora as condições físico-químicas do substrato, favorecendo a retenção de água, a aeração e a disponibilidade de nutrientes, fatores que se refletem diretamente no crescimento da parte aérea. Resultados semelhantes foram observados por Rezende et al. (2016), que verificaram aumento significativo na altura e no diâmetro de mudas cultivadas em substratos contendo biochar, atribuindo esse efeito à melhoria da estrutura física e à maior disponibilidade de nutrientes. De forma complementar, Soares et al. (2019) observaram que a adição de biochar ao substrato promoveu maior crescimento em mudas de *Moringa oleifera*, destacando o papel desse material na retenção hídrica e no estímulo à atividade microbiana benéfica.

Por outro lado, Frazão et al. (2021) alertam que proporções inadequadas podem comprometer o desenvolvimento das plantas devido a alterações químicas no substrato, reforçando que a dose aplicada é determinante para o sucesso do uso do biochar. Assim, a superioridade observada no tratamento B3 sugere que essa proporção proporcionou condições mais favoráveis ao crescimento das mudas, corroborando a literatura que destaca o biochar como um condicionador sustentável capaz de melhorar o desempenho morfológico durante a produção em viveiro.

A Figura 8 apresenta a distribuição da altura das mudas aos 120 dias após o plantio, etapa correspondente à avaliação final do experimento e considerada decisiva para a determinação da qualidade das mudas produzidas. Nesse momento, o crescimento vegetativo encontra-se mais consolidado, permitindo uma análise mais precisa do efeito acumulado dos tratamentos ao longo do ciclo de desenvolvimento.

A avaliação aos 120 dias é particularmente relevante por refletir o vigor final das plantas, o equilíbrio morfológico e o potencial de sobrevivência após o transplantio para condições de campo. Além disso, essa fase permite verificar se as diferenças observadas nas avaliações anteriores foram mantidas, intensificadas ou estabilizadas, evidenciando a eficiência dos tratamentos com biocarvão na promoção do crescimento vegetal.

Figura 8 - Distribuição da altura (cm) das mudas de *Corymbia citriodora* aos 120 dias após o plantio nos tratamentos.



Em que: B1 (20% de biocarvão + 80% de substrato comercial), B2 (40% de biocarvão + 60% de substrato comercial), B3 (60% de biocarvão + 40% de substrato comercial) e Controle (100% substrato comercial). Fonte: Autor, 2026.

Aos 120 dias após o plantio, observa-se a consolidação dos efeitos dos tratamentos sobre o crescimento das mudas, sendo este o momento mais representativo para avaliar o vigor e a qualidade final das plantas produzidas. Nessa fase, o tratamento B3 manteve superioridade em altura, indicando que a incorporação de 60% de biocarvão proporcionou condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal ao longo do ciclo. Os tratamentos B1 e B2 apresentaram valores intermediários, enquanto o Substrato comercial Carolina puro (Controle (100% substrato comercial) manteve os menores resultados, evidenciando menor eficiência na promoção do crescimento.

Resultados semelhantes foram relatados por Rezende et al. (2016), que verificaram aumento significativo na altura e no diâmetro de mudas cultivadas em substratos contendo biochar, atribuindo esse efeito à melhoria da estrutura física e à maior disponibilidade de

nutrientes. De forma complementar, Soares et al. (2019) observaram que a adição de biochar promoveu maior crescimento em mudas de *Moringa oleifera*, destacando a melhoria na retenção de água e no ambiente radicular como fatores determinantes.

Por outro lado, estudos indicam que proporções excessivas de biochar podem alterar a porosidade e o equilíbrio químico do substrato, podendo reduzir o crescimento vegetal quando há comprometimento da aeração e do desenvolvimento radicular (Frazão et al., 2021). Dessa forma, os resultados obtidos reforçam que a proporção utilizada no tratamento B3 proporcionou condições físicas e nutricionais mais equilibradas, corroborando a literatura que aponta o biochar como um condicionador sustentável capaz de melhorar o desempenho morfológico e a qualidade de mudas produzidas em viveiro.

Entre 30 e 60 dias, as diferenças entre os tratamentos começaram a se acentuar, com o tratamento B3 demonstrando um efeito inicial mais pronunciado no crescimento das mudas. Este período inicial de desenvolvimento é crucial, e a superioridade de B3 pode ser atribuída a mecanismos como a melhoria da porosidade do substrato e o aumento da capacidade de retenção de nutrientes proporcionados pelo biocarvão. A estrutura porosa do biocarvão pode otimizar a aeração e a disponibilidade de água, elementos essenciais para o estabelecimento e crescimento inicial das raízes, conforme discutido por Lehmann e Joseph (2015).

Nos estágios mais avançados, entre 90 e 120 dias, os efeitos dos tratamentos consolidaram-se, com o tratamento B3 mantendo uma clara superioridade em altura. A magnitude das diferenças foi mais evidente aos 120 dias, indicando que os benefícios do biocarvão se tornam mais expressivos com o tempo. A Tabela 2 resume as médias de altura dos tratamentos em cada período de avaliação, com as respectivas letras do teste de Tukey.

Tabela 2 - Altura média (cm) das mudas de *Corymbia citriodora* aos 30, 60, 90 e 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Tratamento	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
B1 - 20% Biocarvão + 80% Substrato comercial	6,07 bc	7,65 b	8,78 b	9,69 b
B2 - 40% Biocarvão + 60% Substrato comercial	6,38 ab	7,80 b	9,15 b	10,47 b
B3 - 60% Biocarvão + 40% Substrato comercial	7,01 a	8,94 a	10,26 a	11,47 a
Controle - 100% Substrato comercial	5,80 c	6,98 c	8,70 b	9,43 c

Fonte: Autor, 2026.

A Tabela 2 evidencia a evolução da altura das mudas ao longo do período de avaliação, demonstrando diferenças consistentes entre os tratamentos com biochar desde os estágios iniciais até os 120 dias após o plantio. Observa-se que o tratamento B3 apresentou as maiores médias em todos os períodos avaliados (7,01; 8,94; 10,26 e 11,47 cm), mantendo superioridade estatística e indicando efeito positivo contínuo do biocarvão a 60% sobre o crescimento vegetal. Os tratamentos B2 e B1 apresentaram valores intermediários e comportamento semelhante ao longo do tempo, enquanto o tratamento Controle (100% substrato comercial) apresentou os menores valores, especialmente nas fases iniciais, sugerindo menor eficiência na promoção do crescimento.

Esse padrão indicou que a incorporação de biocarvão melhorou as propriedades físicas e químicas do substrato, favorecendo a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular, fatores que se refletem diretamente no crescimento da parte aérea. Resultados semelhantes foram relatados por Steiner et al. (2007), que observaram aumento significativo no crescimento de plantas cultivadas em solos enriquecidos com carvão vegetal, atribuindo esse efeito à melhoria da fertilidade e da retenção hídrica. Glaser et al. (2002) também destacam que o biochar pode melhorar a estrutura do solo e aumentar a disponibilidade de nutrientes, promovendo crescimento vegetal mais eficiente.

Assim, os resultados observados reforçam que a proporção utilizada no tratamento B3 proporcionou condições mais favoráveis ao crescimento das mudas, corroborando a literatura que reconhece o biochar como um condicionador eficiente para melhorar o desenvolvimento inicial de plantas.

A interpretação biológica desses resultados sugere que o biocarvão, especialmente na proporção de 60% (B3), favoreceu a alocação de recursos para o crescimento em altura, possivelmente devido a uma melhor disponibilidade hídrica e nutricional no substrato. Estudos anteriores, como os de Petter et al. (2012) e Rezende et al. (2016), também observaram efeitos progressivos do biocarvão no crescimento de mudas, destacando a importância da interação entre o biocarvão e o substrato na otimização do desenvolvimento vegetal. A capacidade do biocarvão de modificar as propriedades físico-químicas do substrato, como a capacidade de troca catiônica e a retenção de água, pode ter contribuído para um ambiente mais propício ao desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, ao crescimento da parte aérea das mudas.

Observa-se que as variações nos valores indicam respostas distintas das mudas aos tratamentos aplicados, sugerindo influência direta das condições do substrato e da disponibilidade de nutrientes no desenvolvimento vegetal. Resultados semelhantes são descritos por Steiner et al. (2007), que observaram aumento significativo no crescimento e na biomassa de plantas cultivadas em substratos enriquecidos com biochar, atribuídos à melhoria da retenção de água e da fertilidade do solo. Por outro lado, Lehmann e Joseph (2015) destacam que os efeitos podem variar conforme a matéria-prima e a dosagem do biochar, podendo não haver respostas positivas quando as condições químicas do substrato não são adequadas. Dessa forma, os dados apresentados corroboram parcialmente a literatura, evidenciando que a resposta das mudas depende da interação entre o tipo de substrato, a dose aplicada e as características químicas do material utilizado.

Em síntese, a consistência do efeito positivo do tratamento B3 ao longo de todo o período experimental, culminando nas maiores alturas aos 120 dias, ressalta o potencial do biocarvão de ouricuri como um componente eficaz em substratos para a produção de mudas florestais. Esses achados têm implicações diretas para o manejo em viveiros, sugerindo que a dosagem de 60% de biocarvão pode ser uma estratégia promissora para otimizar o crescimento inicial e a qualidade das mudas, contribuindo para a produção de material vegetal mais robusto e com maior probabilidade de sucesso no campo.

3.3 VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS AOS 120 DIAS (Nº DE FOLHAS, DIÂMETRO DO COLETO)

A avaliação das variáveis morfológicas finais aos 120 dias após o plantio constitui uma etapa fundamental para a determinação da qualidade das mudas produzidas, pois nesse período o crescimento vegetativo encontra-se consolidado e as plantas apresentam características

estruturais mais estáveis, permitindo inferências confiáveis sobre seu vigor e potencial de estabelecimento em campo (Carneiro, 1995; Gomes & Paiva, 2013).

Entre os parâmetros analisados, destacam-se o número de folhas e o diâmetro do coleto, indicadores amplamente utilizados na avaliação do vigor, da capacidade fotossintética e da resistência mecânica das mudas (Gomes et al., 2002). O número de folhas está diretamente relacionado à área fotossinteticamente ativa e ao potencial de produção de fotoassimilados, refletindo a capacidade da planta de sustentar seu crescimento e adaptação após o transplântio (Taiz et al., 2017).

Já o diâmetro do coleto é considerado um dos principais indicadores de qualidade, pois está associado à robustez estrutural, à capacidade de transporte de água e nutrientes e à maior resistência ao estresse hídrico e mecânico em condições de campo (Carneiro, 1995; Dutra et al., 2016). Dessa forma, a análise integrada dessas variáveis permite inferir sobre o equilíbrio morfológico das mudas e seu potencial de sobrevivência e estabelecimento após o plantio definitivo (Gomes & Paiva, 2013).

A Tabela 3 apresenta as médias do número de folhas aos 120 dias após o plantio, acompanhadas das letras do teste de Tukey a 5% de probabilidade, permitindo identificar diferenças estatísticas entre os tratamentos. Essa variável é particularmente relevante por refletir o potencial fotossintético das mudas e sua capacidade de interceptação luminosa, fatores determinantes para o acúmulo de biomassa e o crescimento contínuo.

Embora diferenças numéricas possam ser observadas entre os tratamentos, a análise estatística permite verificar se tais variações representam respostas reais às condições do substrato ou apenas oscilações naturais do crescimento vegetal. A interpretação dessa Tabela deve considerar não apenas os valores médios, mas também sua relação com o desenvolvimento estrutural das mudas, possibilitando compreender se os tratamentos com biocarvão influenciaram efetivamente a formação foliar ou se seus efeitos foram mais pronunciados em variáveis relacionadas à robustez e ao acúmulo de biomassa. Assim, a Tabela 3 fornece subsídios importantes para a análise do desempenho fisiológico das mudas e para a compreensão do papel dos tratamentos na promoção do crescimento equilibrado.

Tabela 3 - Número médio de folhas das mudas de *Corymbia citriodora* aos 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão.

Tratamento	Número de folhas
B1 - 20% biocarvão + 80% substrato comercial	10,72 a
B2 - 40% biocarvão + 60% substrato comercial	10,22 a
B3 - 60% biocarvão + 40% substrato comercial	10,38 a
Controle - 100% substrato comercial	9,84 a

Fonte: Autor, 2026.

Aos 120 dias, o número de folhas não apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos com biocarvão (Tukey, $p \leq 0,05$), com todas as médias agrupadas na mesma classe (“a”). Os valores variaram em faixa estreita (9,84 a 10,72 folhas por muda), indicando que, apesar das diferenças detectadas para variáveis de crescimento e acúmulo de biomassa, a emissão foliar permaneceu relativamente estável entre as composições de substrato avaliadas. Esse comportamento sugere que o biocarvão, nas condições do experimento, modulou mais intensamente atributos de vigor (massa e robustez) do que caracteres discretos de desenvolvimento como contagem de folhas, os quais podem responder com menor sensibilidade ao manejo do substrato ao final do ciclo de viveiro.

A ausência de resposta do número de folhas pode ser interpretada por três mecanismos complementares. Primeiro, a emissão foliar tende a apresentar controle genético e ontogenético relativamente forte, com plasticidade fenotípica mais evidente em atributos contínuos (área foliar, espessura, massa específica da folha, alongamento do caule e alocação de biomassa) do que na simples contagem de folhas, que é uma variável discreta e frequentemente “canalizada”.

Segundo, as adubações de cobertura semanais descritas no delineamento reduzem a limitação nutricional e podem equalizar o ambiente de crescimento, amortecendo contrastes entre tratamentos no que se refere à taxa de emissão de folhas, ao mesmo tempo em que ainda permitem diferenças na eficiência de uso e na alocação de fotoassimilados (massa seca) pela melhoria físico-química do substrato. Esse raciocínio é compatível com a discussão metodológica do próprio trabalho, ao mencionar que o biocarvão pode contribuir para retenção/adsorção de íons disponibilizados pelas adubações, atuando como componente de “condicionamento” sob fertilização recorrente (LEHMANN & JOSEPH; WEBER & QUICKER; PETTER ET AL.). Terceiro, é plausível que o biocarvão tenha alterado o tamanho e o desempenho fisiológico das folhas (e, portanto, a biomassa), sem necessariamente elevar o

número de unidades foliares.

Tabela 4 - Diâmetro médio das mudas de *Corymbia citriodora* aos 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão.

Tratamento	Diâmetro (mm)
B1 - 20% biocarvão + 80% substrato comercial	2,04 bc
B2 - 40% biocarvão + 60% substrato comercial	2,14 ab
B3 - 60% biocarvão + 40% substrato comercial	2,28 a
Controle - 100% substrato comercial	1,89 c

Fonte: Autor, 2026.

A tabela 4 apresenta o diâmetro do coleto aos 120 dias, verificou-se efeito de tratamento, com separação estatística indicando o menor desempenho no tratamento Controle (1,89 mm “c”). Os tratamentos B3 (2,28 mm; “a”) e B2 (2,14 mm; “ab”) compuseram os grupos superiores, enquanto B1 (2,04 mm; “bc”) apresentou comportamento intermediário, com sobreposição parcial aos grupos “b/c”. Em termos práticos, a resposta evidencia que o biocarvão (em dose/condição representada por B3 e B2) favoreceu o espessamento do colo quando comparado ao pior cenário Controle (100% substrato comercial), ainda que a hierarquia numérica das médias não se traduza integralmente em separação por letras, o que reforça a necessidade de interpretar o efeito prioritariamente pelo agrupamento de Tukey.

Em síntese, mudas com maiores diâmetros costumam manter melhor balanço entre demanda transpiratória e capacidade de suprimento (sistema radicular), especialmente no “choque de transplante”. Em literatura de qualidade de mudas, diâmetro é apontado como um dos melhores preditores de sobrevivência, enquanto a altura tende a predizer crescimento em altura (conceito de “target seedling”).

Assim, mesmo sem mudança no número de folhas, a melhora (ou manutenção em patamar superior) do diâmetro em B2/B3 e a queda em Controle (100% substrato comercial) têm implicação direta para a seleção de mudas aptas à expedição, por indicarem maior probabilidade de pegamento e menor mortalidade no campo.

Tabela 5 - Massas secas da parte aérea (MSPA), radicular (MSR) e total (MST) das mudas de *Corymbia citriodora* aos 120 dias após a semeadura em diferentes tratamentos com biocarvão.

Tratamento	MSPA (g)	MSR (g)	MST (g)
B1 - 20% biocarvão + 80% substrato comercial	7,11c	4,18 c	11,29 c
B2 - 40% biocarvão + 60% substrato comercial	8,35 b	4,61b	12,96 b
B3 - 60% biocarvão + 40% substrato comercial	9,65 a	5,41 a	15,06 a
Controle - 100% substrato comercial	5,93 d	3,32 d	9,25 d

Fonte: Autor, 2026.

A tabela 5 apresenta a massa seca aos 120 dias, observou-se efeito marcante dos tratamentos com biocarvão sobre o acúmulo de biomassa seca, com separação estatística completa entre todos os níveis (Tukey, $p \leq 0,05$). O tratamento B3 apresentou as maiores médias para MSPA (9,65 g), MSR (5,41 g) e MST (15,06 g), seguido por B2 (8,35; 4,61; 12,96 g), B1 (7,11; 4,18; 11,29 g) e Controle (100% substrato comercial) com os menores valores (5,93; 3,32; 9,25 g). A ordem geral $B3 > B2 > B1 > \text{Controle (100\% substrato comercial)}$ indica que a resposta ao biocarvão não foi apenas pontual em um compartimento, mas consistente tanto na parte aérea quanto no sistema radicular, refletindo incremento integrado de crescimento e alocação de fotoassimilados ao longo do ciclo de viveiro.

O ganho de MSPA em B3 pode ser explicado por mecanismos físico-químicos tipicamente atribuídos ao biocarvão em substratos: aumento de porosidade e rearranjo da distribuição de poros, melhoria de aeração e de retenção de água, além de maior capacidade de retenção/adsorção de íons provenientes da adubação (especialmente sob adubações de cobertura semanais), reduzindo perdas por lixiviação e aumentando a disponibilidade ao longo do tempo.

A literatura experimental com eucalipto em substrato também descreve respostas positivas a doses moderadas de biocarvão e efeitos negativos em doses elevadas, sugerindo existência de faixa ótima: Petter et al. observaram melhor desempenho de mudas com adição moderada (e queda em doses altas), com reflexos em altura, diâmetro, massas secas e IQD; esse padrão é coerente com o desempenho inferior de Controle (100% substrato comercial) no presente estudo, interpretável como condição menos favorável do ponto de vista físico-químico/nutricional do substrato. Além disso, estudos em produção de mudas destacam que o biocarvão tende a expressar maior benefício quando combinado com fertilização, por potencializar a eficiência de uso de nutrientes e a estabilidade do fornecimento no substrato.

Em experimentos com biocarvão associado a nutrientes, há indicação de ganhos em

qualidade e eficiência de uso de nutrientes, com implicações diretas para o estabelecimento em campo, especialmente em ambientes com baixa fertilidade e sazonalidade hídrica. Assim, a superioridade de B3 em MSR sugere maior “capacidade de arranque” no transplante, com maior chance de rápida retomada de crescimento após o plantio, reduzindo a janela crítica de mortalidade.

Tabela 6 - Índices morfológicos derivados das mudas de *Corymbia citriodora* aos 120 dias após a semeadura, calculados a partir dos valores médios dos tratamentos com biocarvão.

Tratamento	MSPA/MSR	H/DC	IQD*
B1 - 20% biocarvão + 80% substrato comercial	1,70	4,25	1,90
B2 - 40% biocarvão + 60% substrato comercial	1,81	4,89	1,93
B3 - 60% biocarvão + 40% substrato comercial	1,78	5,68	2,02
Controle - 100% substrato comercial	1,79	4,99	1,36

Fonte: Autor, 2026.

A MST sintetiza o desempenho global e, no presente estudo, confirmou a superioridade de B3 (15,06 g) e a inferioridade de Controle (100% substrato comercial) (9,25 g), coerente com a resposta simultânea de MSPA e MSR. Quando se analisa a alocação, a relação MSPA/MSR permaneceu em faixa relativamente próxima ($\approx 1,70$ – $1,81$), sugerindo que o biocarvão não “desequilíbrio” a partição de biomassa, mas ampliou o sistema como um todo, o que é desejável do ponto de vista de qualidade de muda. Já o IQD (índice integrativo) foi mais alto em B3 (2,02) e mais baixo em Controle (100% substrato comercial) (1,36), reforçando que o tratamento superior combinou maior biomassa com arquitetura mais favorável (considerando robustez e equilíbrio de massas). Como o IQD foi concebido justamente para integrar massa total, robustez (H/DC) e equilíbrio de alocação (MSPA/MSR), sua leitura é particularmente útil para justificar a escolha do tratamento B3 como o mais promissor para expedição, em consonância com o uso do IQD em avaliações de qualidade de mudas.

Os resultados corroboram achados recorrentes em estudos com biocarvão na produção de mudas, nos quais a melhoria do substrato frequentemente se traduz em aumento de massa seca e indicadores integrados de qualidade, sobretudo quando há fertilização associada. Em Petter et al. (2012), por exemplo, doses moderadas de biocarvão no substrato favoreceram variáveis morfológicas e massas secas, enquanto doses elevadas passaram a prejudicar o

crescimento e a qualidade, padrão compatível com a queda observada em Controle (100% substrato comercial) em comparação a B3. Em experimentos com biocarvão combinado com macronutrientes (N e P), também se descreve o potencial do biocarvão para elevar a qualidade (via relações alométricas e IQD), mesmo quando o efeito sobre crescimento pode depender da exigência nutricional e do contexto do substrato, destacando a importância de compatibilizar dose, fertilização e espécie.

Dessa forma, a ordem $B3 > B2 > B1 > \text{Controle}$ (100% substrato comercial) encontrada para MSPA, MSR e MST é consistente com a hipótese de faixa ótima de condicionamento do substrato por biocarvão: em um nível intermediário o material melhora retenção de água/nutrientes e ambiente físico; em níveis menos adequados (ou excessivos) pode ocorrer piora do desempenho, por alterações indesejáveis na porosidade efetiva, condutividade, relação C/N e/ou dinâmica de nutrientes.

4 CONCLUSÃO

A incorporação do biocarvão de *Syagrus coronata* ao substrato comercial promoveu melhorias nas condições de cultivo, refletindo diretamente no crescimento e na qualidade morfológica das mudas de *Corymbia citriodora*. De modo geral, observou-se que a adição do biocarvão favoreceu o desenvolvimento das plantas, evidenciando seu potencial como condicionador de substratos.

Entre os tratamentos avaliados, a proporção de 60% de biocarvão (B3) apresentou os melhores resultados, destacando-se pelo maior crescimento em altura e desempenho geral das mudas ao longo do ciclo, especialmente na avaliação final aos 120 dias. Esse comportamento indica que maiores proporções do material podem proporcionar condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal, possivelmente devido à melhoria das propriedades físico-químicas do substrato, como maior retenção de água e disponibilidade de nutrientes.

Os resultados obtidos corroboram a literatura, que aponta o biocarvão como um material capaz de otimizar o ambiente radicular e promover ganhos no crescimento de mudas, desde que utilizado em proporções adequadas. Nesse contexto, sua aplicação representa uma alternativa promissora para a produção de mudas florestais, contribuindo para a redução da dependência de insumos convencionais e para o uso sustentável de biomassa regional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biocarvão (biochar) destaca-se como um material de grande potencial para uso como condicionante de substratos, em função de suas propriedades físico-químicas, como alta porosidade, elevada capacidade de troca catiônica e estabilidade química. Nesse contexto, a produção de mudas florestais de qualidade torna-se peça-chave para o sucesso de programas de restauração, reflorestamento e manejo florestal, pois define o potencial de estabelecimento, sobrevivência e desempenho das plantas quando transferidas para o campo. No contexto amazônico, onde os desafios ambientais e logísticos impõem restrições à disponibilidade de insumos adequados, a busca por substratos mais eficientes e sustentáveis torna-se urgente; substratos convencionais frequentemente apresentam limitações quanto à retenção hídrica, aeração e estabilidade química, fatores que comprometem o desenvolvimento radicular e o vigor das mudas.

Nesse cenário, o biocarvão surge como uma alternativa promissora, por sua capacidade de melhorar propriedades físicas e químicas do meio de enraizamento, promover maior retenção de água, modular a disponibilidade de nutrientes e favorecer um microambiente radicular mais estável. Além do aspecto técnico, a utilização de biocarvão produzido a partir de biomassa regional, como a de *Syagrus coronata* (ouricuri), integra objetivos de economia circular e valorização de recursos locais, oferecendo uma solução que alia desempenho técnico a benefícios socioambientais.

O presente estudo teve como propósito central avaliar de forma integrada o potencial do biocarvão de *Syagrus coronata* como componente de substrato para a produção de mudas florestais, buscando identificar proporções de incorporação capazes de otimizar o crescimento e a qualidade morfológica das plantas em viveiro. Para tanto, foram conduzidas avaliações sistemáticas das variáveis de interesse, crescimento em altura ao longo do tempo, diâmetro do coleto, número de folhas e acúmulo de biomassa, em delineamento experimental apropriado.

Ao explicitar esse objetivo, o estudo pretendeu não apenas verificar a eficiência agrônômica do insumo regional, mas também gerar subsídios práticos e teóricos para a sua aplicação em viveiros, contribuindo para a formulação de recomendações de manejo que conciliem produtividade, sustentabilidade e aproveitamento de resíduos locais.

Os resultados obtidos evidenciaram diferenças consistentes no desempenho das mudas em função das proporções de biocarvão incorporadas ao substrato, destacando-se a superioridade do tratamento B3, que promoveu crescimento mais vigoroso e melhor qualidade morfológica das plantas. Esse tratamento proporcionou maior incremento em altura, formação

de mudas mais robustas e maior acúmulo de biomassa, indicando melhor aproveitamento dos recursos disponíveis no substrato e maior eficiência fisiológica no desenvolvimento vegetal.

Em contraste, o tratamento com substrato comercial Carolina puro apresentou desempenho inferior na maioria das variáveis avaliadas, sugerindo menor capacidade de suporte ao crescimento inicial das mudas. Os tratamentos intermediários apresentaram respostas também intermediárias, reforçando a existência de uma relação entre a proporção de biocarvão e o desempenho morfológico das plantas, e indicando que a incorporação adequada desse material pode elevar significativamente a qualidade final das mudas produzidas em viveiro.

A análise do crescimento ao longo do tempo revelou que os efeitos do biocarvão não se limitaram às avaliações finais, manifestando-se de forma progressiva durante o desenvolvimento das mudas. Observou-se uma diferenciação gradual entre os tratamentos, com maior evidência das respostas positivas à medida que as plantas avançaram em seu ciclo inicial de crescimento, o que demonstra que os benefícios promovidos pelo biocarvão se intensificam com o tempo.

Esse comportamento indica que a melhoria das condições físicas e químicas do substrato favorece a expansão radicular e a absorção de água e nutrientes de forma contínua, refletindo-se no crescimento da parte aérea. A avaliação em diferentes períodos mostrou-se, portanto, fundamental para compreender a dinâmica do desenvolvimento vegetal e evidenciar que os efeitos do biocarvão são cumulativos, contribuindo para a formação de mudas mais vigorosas e com maior potencial de estabelecimento após o transplântio.

A qualidade morfológica das mudas constitui um dos principais indicadores do seu potencial de sobrevivência e desempenho após o plantio definitivo, sendo o diâmetro do coleto e o acúmulo de biomassa parâmetros amplamente utilizados para essa avaliação.

O diâmetro do coleto reflete a robustez estrutural da muda, estando diretamente associado à resistência mecânica, à capacidade de condução de água e nutrientes e à tolerância a estresses ambientais, como déficit hídrico e ação do vento. Nesse sentido, mudas com maior diâmetro tendem a apresentar melhor estabilidade e maior capacidade de adaptação em campo. De forma complementar, a biomassa seca total expressa o equilíbrio entre o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, indicando eficiência fisiológica e maior capacidade de absorção de recursos.

O maior acúmulo de biomassa observado nos tratamentos com melhor desempenho sugere que o biocarvão favoreceu o ambiente radicular e a disponibilidade de nutrientes,

contribuindo para a formação de mudas mais vigorosas e com maior potencial de estabelecimento e crescimento inicial após o transplântio.

Por outro lado, o número de folhas não apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos, indicando que essa variável foi menos sensível às alterações promovidas pela incorporação do biocarvão ao substrato. Embora a emissão foliar esteja relacionada ao potencial fotossintético das plantas, sua relativa uniformidade sugere que as condições experimentais foram suficientes para sustentar a formação foliar básica em todos os tratamentos.

Esse resultado evidencia que variáveis estruturais, como altura, diâmetro do coleto e biomassa, são mais indicativas da qualidade das mudas do que o número de folhas isoladamente. Assim, a ausência de diferença significativa nessa variável não reduz a importância dos efeitos observados nas demais características morfológicas, mas reforça que o crescimento estrutural e o vigor fisiológico representam critérios mais consistentes para avaliar o potencial de sobrevivência e desempenho das mudas em condições de campo.

A eficiência observada do biocarvão em promover o crescimento mais vigoroso das mudas pode ser explicada por um conjunto de mecanismos fisiológicos e agrônômicos interligados. Primeiramente, a incorporação de biocarvão tende a melhorar a retenção de água do substrato sem, necessariamente, comprometer a aeração, criando um regime hídrico mais estável que reduz flutuações de tensão hídrica e sustenta atividade metabólica constante nas raízes.

Em segundo lugar, a elevada superfície específica e a capacidade de adsorção do biocarvão aumentam a reserva de íons e a capacidade de troca catiônica do substrato, o que melhora a disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo e reduz perdas por lixiviação, favorecendo taxas mais regulares de crescimento. Além disso, a presença de biocarvão modifica o microambiente rizosférico, estimulando processos microbianos benéficos à ciclagem de nutrientes e à solubilização de fósforo e outros nutrientes pouco móveis; esse efeito biológico, somado às melhorias físicas e químicas, cria um ambiente radicular mais favorável à emissão e ao alongamento de raízes, o que se traduz em maior aporte de água e solutos à parte aérea.

Do ponto de vista prático, os achados deste trabalho apontam para aplicações concretas em viveiros florestais e hortícolas, onde a incorporação de biocarvão pode ser adotada como estratégia para produzir mudas de maior vigor sem demandar mudanças drásticas na rotina operacional. A utilização de proporções otimizadas pode reduzir a necessidade de irrigação frequente, diminuir perdas de nutrientes por lixiviação e melhorar a uniformidade das mudas.

Em termos de sustentabilidade, o uso do biocarvão incorpora benefícios ambientais relevantes, ao transformar resíduos de biomassa regional em insumo de valor agregado e

contribuir para o sequestro estável de carbono, reforçando seu potencial como ferramenta de produção vegetal sustentável.

Apesar dos resultados promissores, reconhecem-se limitações relacionadas às condições controladas do experimento, sendo necessária a realização de estudos em campo, com diferentes espécies e condições ambientais, para validação e ampliação dos resultados.

De modo geral, o biocarvão de *Syagrus coronata*, quando aplicado em proporções adequadas, representa uma alternativa técnica viável e promissora para melhorar a qualidade de mudas florestais, conciliando benefícios agronômicos, ambientais e econômicos.

REFERÊNCIAS

- CALEGARI, L.; HSE, C. Y.; BALDWIN, B. S.; SHEPARD, S. R.; CHINNAN, M. S. *Biochar derived from pyrolysis of peanut hulls: Physical, chemical and adsorption properties*. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 2212-2218, 2011.
- CARNEIRO, J. G. A. *Produção e controle de qualidade de mudas florestais*. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1995.
- DUTRA, T. R. et al. Qualidade de mudas florestais: parâmetros morfológicos e fisiológicos. *Floresta e Ambiente*, v. 23, n. 3, 2016.
- FRAZÃO, L. A. et al. Biochar as an alternative substrate for seedling production. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2021.
- GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 35, p. 219-230, 2002.
- GOMES, J. M. et al. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 26, n. 6, p. 655-664, 2002.
- GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. *Viveiros florestais: propagação sexuada*. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013.
- GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELLI, E. G.; MORAES NETO, S. P.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Org.). *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 309-350.
- GROSSNICKLE, S. C. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests*, Dordrecht, v. 43, p. 711-738, 2012.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. 2. ed. London: Routledge, 2015.
- MARTINS, S. V. *Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração*. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2007.

- PETTER, F. A. et al. Biochar as a soil conditioner: effects on soil fertility and plant growth. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, p. 859-868, 2012.
- REZENDE, F. A. et al. Biochar na composição de substratos para a produção de mudas de teca. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1449-1457, 2016.
- RUFINO, M. U. L.; COSTA, J. T. M.; SILVA, V. A.; ANDRADE, L. H. C. Conhecimento e uso da palmeira ouricuri (*Syagrus coronata* (Mart.) Becc.) por comunidades rurais do semiárido baiano. *Acta Botanica Brasilica*, v. 22, n. 4, p. 1141-1149, 2008.
- SOARES, L. S. et al. Substrates formulated with biochar for seedling production of *Moringa oleifera* Lam. *Journal of Agricultural Science*, v. 11, n. 4, p. 515-523, 2019.
- STEINER, C. et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 291, p. 275-290, 2007.
- TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- VIANI, R. A. G.; DURIGAN, G.; MELO, A. C. G. A restauração florestal e a conservação da biodiversidade. *Revista do Instituto Florestal*, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 77-90, 2007.
- VIANI, R. A. G.; RODRIGUES, R. R. Sobrevivência de plântulas e regeneração natural em projetos de restauração florestal. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 73, p. 17-27, 2007.
- VILLAR-SALVADOR, P. et al. Plant quality and seedling performance in Mediterranean forests. *Forest Systems*, v. 21, n. 2, p. 226-250, 2013.
- WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. *Fuel*, London, v. 217, p. 240-261, 2018.