

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

DÉBORA CRISTINE SCHVADE

**PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO A PARTIR DE BIOMASSA DE BABAÇU VISANDO
A APLICAÇÃO AGRÍCOLA**

São Leopoldo

2023

DÉBORA CRISTINE SCHVADE

**PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO A PARTIR DE BIOMASSA DE BABAÇU VISANDO
A APLICAÇÃO AGRÍCOLA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Regina Célia Espinosa Modolo

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

São Leopoldo

2023

S397p Schvade, Débora Cristine.
Produção de biocarvão a partir de biomassa de babaçu visando a aplicação agrícola / Débora Cristine Schvade. – 2023.
102 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2023.
“Orientadora: Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes”

1. Aplicação agrícola. 2. Babaçu. 3. Biocarvão. 4. Biomassa. 5. Pirólise lenta. I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

DÉBORA CRISTINE SCHVADE

**PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO A PARTIR DE BIOMASSA DE BABAÇU VISANDO
A APLICAÇÃO AGRÍCOLA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

Janice da Silva – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Paulo Roberto Wander – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Luís Antônio Da Luz Tarelho – Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS À CAPES

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

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho não seria possível sem a ajuda e o apoio de pessoas importantes que merecem os meus sinceros agradecimentos.

À Prof^ª. Dr^ª. Regina Célia Espinosa Modolo por ter aceitado a missão de me orientar e por contribuir com valiosas discussões. Obrigada por confiar no meu trabalho e por toda a atenção, suporte e motivação ao longo deste período desafiador. Seguirei minha jornada feliz pela oportunidade de tê-la conhecido e inspirada pela pessoa e profissional sensacional que és.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes por aceitar o convite em participar deste estudo como coorientador e estar sempre disposto a contribuir na construção de um trabalho de qualidade. Suas provocações e importantes discussões nos motivaram a pensar além.

Ao doutorando Bruno Leite, colega do PPGEM, pela disposição em contribuir com o material precursor deste estudo, se responsabilizando pela coleta, envio e por nos apresentar esta rica matéria-prima que é o babaçu.

Ao pessoal do Laboratório de Química e Farmácia da universidade, pela ajuda na realização de ensaios importantes para este estudo.

Ao pessoal do Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat), em especial à Marlucci Souza, pelo auxílio fundamental prestado durante as atividades de pirólise e demais análises fundamentais ao estudo.

À minha família e amigos que prestaram apoio e contribuíram para que este período desafiador se tornasse mais leve.

RESUMO

A cadeia produtiva do babaçu é uma das mais representativas do extrativismo vegetal no Brasil, mas resulta em elevada geração de resíduos com potencial para aproveitamento. O presente estudo tem por objetivo produzir biocarvão a partir de biomassa de babaçu por meio do processo de pirólise visando a aplicação agrícola. O material precursor era composto pelo epicarpo, mesocarpo e endocarpo do babaçu e foi caracterizado na forma limpa e bruta. A produção do biocarvão foi procedida com a biomassa bruta em quatro condições de operação e os biocarvões obtidos foram submetidos a ensaios de caracterização prévia. A produção do biocarvão em maior escala foi procedida em reator de leito fixo a temperatura de 350°C, taxa de 10°C/min, tempo de residência de 20 minutos e fluxo de N₂ de 1mL/min. A aplicação agrícola consistiu em submeter sementes de *L. sativa* a dois tratamentos contendo biocarvão (Bio25% e Bio50%), tratamentos esses a serem comparados a um tratamento testemunha (Bio0%), cujo crescimento foi avaliado por 28 dias. A caracterização das biomassas resultou em 0,98% (m/m) de partículas aderidas à biomassa, maior fração de partículas com diâmetro médio de 3,57mm para ambas as biomassas, teores (m/m) de umidade de 16,66% e 17,43%, teor de cinzas de 1,76% e 2,04%, matéria volátil de 82,27% e 82,48%, carbono fixo de 15,65% e 16,38%, pH de 6,29 e 6,47, condutividade elétrica de 445,0 μS/cm e 436,6 μS/cm, massa específica real de 1,3950 g/cm³ e 1,3989 g/cm³, área superficial de 0,3422 m²/g e 0,5431 m²/g e poder calorífico superior de 18,326 MJ/kg e 18,674 MJ/kg para as biomassas limpa e bruta, respectivamente. Os elementos K, Si, Ca, Fe, S, P, Cu foram identificados nas biomassas, além do elemento Al para a biomassa bruta. O biocarvão de babaçu produzido em maior escala apresentou rendimento de 33,26% (m/m), maior fração de partículas de 3,57 mm, teor (m/m) de cinzas de 4,71%, 29,20% de matéria volátil, 66,09% de carbono fixo, pH de 8,98, condutividade elétrica de 138,1 μS/cm, massa específica real de 1,3804 g/cm³, poder calorífico superior de 27,94 MJ/kg, elementos K, Si, Ca, Fe, Mg, S, P, Cu e Rb e CTC de 34,77 mmol/kg. Na aplicação agrícola foi observado que os tratamentos com biocarvão resultaram em plântulas com maior altura e coloração mais viva, indicando que o biocarvão de babaçu pode ter potencial de ser utilizado para melhorar as características do solo visando a aplicação agrícola.

Palavras-chave: biomassa; babaçu, pirólise lenta; biocarvão, aplicação agrícola.

ABSTRACT

The babassu production chain is one of the most representative of vegetal extractivism in Brazil, but results in high generation of waste with potential for utilization. The present study aims to produce biochar from babassu biomass through pyrolysis process aiming at agricultural application. The precursor material was composed of babassu epicarp, mesocarp and endocarp and was characterized in clean and raw form. The production of biochar was carried out with the raw biomass in four operating conditions, and the obtained biochars were submitted to prior characterization tests. The production of biochar on a larger scale was carried out in a fixed bed reactor at a temperature of 350°C, rate of 10°C/min, residence time of 20 minutes and N₂ flow of 1mL/min. The agricultural application consisted in subjecting *L. sativa* seeds to two treatments containing biochar (Bio25% and Bio50%), these treatments were compared to a control treatment (Bio0%), whose growth was evaluated for 28 days. The characterization of the biomasses resulted in 0.98 wt% of particles adhered to the biomass, higher fraction of particles with an average diameter of 3.57 mm for both biomasses, moisture content of 16.66 and 17.43 wt%, ash content of 1.76 and 2.04 wt%, volatile matter of 82.27 and 82.48 wt%, fixed carbon of 15.65 and 16.38 wt%, pH of 6.29 and 6.47, electrical conductivity of 445.0μS/cm and 436.6μS/cm, real specific mass of 1.3950 g/cm³ and 1.3989 g/cm³, surface area of 0.3422 m²/g and 0.5431 m²/g and higher calorific value of 18.326 MJ/kg and 18.674 MJ/kg for the clean and raw biomass, respectively. The elements K, Si, Ca, Fe, S, P, Cu were identified in the biomasses, besides the element Al for the crude biomass. The babassu biochar produced on a larger scale showed yield of 33.26 wt%, higher particle fraction of 3.57mm, 4.71 wt% ash, 29.20 wt% volatile matter, 66.09 wt% fixed carbon, pH of 8.98, electrical conductivity of 138.1μS/cm, real specific mass of 1.3804 g/cm³, higher calorific value of 27.94 MJ/kg, elements K, Si, Ca, Fe, Mg, S, P, Cu and Rb and CEC of 34.77mmol/kg. In agricultural application it was observed that the treatments with biochar resulted in seedlings with greater height and more vivid coloration, indicating that babassu biochar may have potential to be used to improve soil characteristics for agricultural application.

Keywords: biomass; babassu, slow pyrolysis; biochar, agricultural application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem (a) de um cacho de babaçu e (b) dos frutos	22
Figura 2 - Partes que compõem o fruto do babaçu.....	24
Figura 3 - Produtos resultantes dos diferentes processos de pirólise.....	31
Figura 4 - Fluxograma do programa experimental	40
Figura 5 - Biomassa de babaçu <i>in natura</i>	43
Figura 6 - Reator de leito fixo (a) em operação e (b) após produção do biocarvão proveniente de biomassa de babaçu	45
Figura 7 - Cadinho inserido no tubo do reator para a produção dos biocarvões de babaçu em menor escala	46
Figura 8 - Inserção da biomassa no tubo do reator para a produção do biocarvão de babaçu em maior escala	47
Figura 9 - Biocarvão produzido a partir de biomassa de babaçu via processo de pirólise lenta sob as condições de 350°C por 20 minutos.....	48
Figura 10 - Bandeja para a germinação de <i>L. sativa</i> com os tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50% (da esquerda para direita)	49
Figura 11 - Condições submetidas ao plantio das sementes de <i>L. sativa</i>	50
Figura 12 - Biomassa de babaçu (a) bruta e (b) limpa.....	58
Figura 13 - Partículas removidas da biomassa no processo de limpeza	59
Figura 14 - Biomassa de babaçu (a) limpa e (b) bruta.....	59
Figura 15 - Distribuição granulométrica das biomassas de babaçu após cominuição	60
Figura 16 - Distribuição granulométrica das partículas removidas da biomassa no processo de limpeza	61
Figura 17 - Gráfico Temperatura <i>versus</i> Tempo de cada batelada de produção do biocarvão de babaçu	71
Figura 18 - Gráfico Temperatura do Tubo <i>versus</i> Tempo das bateladas de produção do biocarvão de babaçu	72
Figura 19 - Gráfico Temperatura do Forno <i>versus</i> Tempo das bateladas de produção do biocarvão de babaçu	73
Figura 20 - Distribuição granulométrica do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos	75

Figura 21 - Distribuição granulométrica da areia utilizada nos tratamentos da semeadura de <i>L. sativa</i>	83
Figura 22 – Germinação das sementes de alface submetidas aos tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50%	84
Figura 23 - Altura máxima das plântulas submetidas aos tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50%	85
Figura 24 – Altura média das plântulas submetidas aos tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50%	86
Figura 25 - Fotografia registrada no 10º dia de monitoramento das plântulas submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%	88
Figura 26 - Fotografia 1 registrada no 12º dia de monitoramento das plântulas de <i>L.</i> <i>sativa</i> submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%.....	89
Figura 27 - Fotografia 2 registrada no 12º dia de monitoramento das plântulas de <i>L.</i> <i>sativa</i> submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%.....	90
Figura 28 - Fotografia registrada no 16º dia de monitoramento das plântulas de <i>L.</i> <i>sativa</i> submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%.....	91
Figura 29 - Fotografia registrada no 19º dia de monitoramento das plântulas de <i>L.</i> <i>sativa</i> submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos condicionadores de solo	38
Quadro 2 - Especificações de condicionadores de solo	38
Quadro 3 - Relação das análises de caracterização da biomassa/biocarvão e do método aplicado	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características operacionais dos diferentes tipos de pirólise	28
Tabela 2 - Resumo de pesquisas anteriores sobre conversão de biomassa.....	30
Tabela 3 - Condições de operação propostas para a produção do biocarvão de babaçu em menor escala	46
Tabela 4 - Tratamentos testados na semeadura de <i>L. sativa</i>	49
Tabela 5 - Análise imediata das biomassas de babaçu	61
Tabela 6 - Resultados de pH e CE das biomassas de babaçu.....	64
Tabela 7 - Resultados da massa específica real e área superficial das biomassas de babaçu.....	65
Tabela 8 - Resultado do poder calorífico superior das biomassas de babaçu.....	65
Tabela 9 – Elementos químicos encontrados na análise de fluorescência de raios X das biomassas de babaçu.....	66
Tabela 10 – Resultados da caracterização preliminar dos biocarvões de babaçu ...	68
Tabela 11 - Rendimento do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos	74
Tabela 12 - Análise imediata do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos	76
Tabela 13 - Resultados de pH e CE do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos	78
Tabela 14 - Fluorescência de raios X do biocarvão de babaçu	81

LISTA DE SIGLAS

BET	Área superficial
CE	Condutividade elétrica
CRA	Capacidade de retenção de água
CTC	Capacidade de troca catiônica
FRX	Fluorescência de raios X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Instrução Normativa
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ME	Massa específica
MO	Matéria orgânica
PCS	Poder calorífico superior
PFNM	Produtos florestais não madeireiros
pH	Potencial hidrogeniônico
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SDA	Secretaria de Defesa Agropecuária
SP	Set point

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 BIOMASSA.....	19
2.1.1 Fontes de biomassa	19
2.1.2 Características e propriedades da biomassa	19
2.1.2.1 Babaçu – Aspectos gerais.....	21
2.1.2.2 Babaçu – Produtos e subprodutos	22
2.1.3 Fatores que influenciam na qualidade da biomassa	25
2.2 PROCESSO DE PIRÓLISE DE BIOMASSA.....	26
2.2.1 Tecnologias de pirólise – Reatores	28
2.2.2 Produtos da pirólise	30
2.2.2.1 Biocarvão	32
2.2.2.2 Bio-óleo	33
2.2.2.3 Gás	34
2.2.3 Influência da qualidade da biomassa nos produtos da pirólise	34
2.3 APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO COMO CONDICIONADOR DE SOLO	36
2.3.1 Biocarvão como condicionador de solo	36
2.3.2 Condicionadores de solo – Legislação e características	37
3 METODOLOGIA	40
3.1 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	43
3.1.1 Etapa 1 – Tratamento e caracterização da biomassa	43
3.1.2 Etapa 2 – Produção do biocarvão	45
3.1.3 Etapa 3 – Caracterização do biocarvão	48
3.1.4 Etapa 4 – Aplicação do biocarvão na produção vegetal	48
3.2 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO.....	51
3.2.1 Análise granulométrica	52
3.2.2 Análise Imediata	52

3.2.2.1 Teor de umidade	52
3.2.2.2 Teor de cinzas	53
3.2.2.3 Matéria volátil	54
3.2.2.4 Carbono fixo	54
3.2.3 pH e condutividade elétrica.....	54
3.2.4 Massa específica real.....	55
3.2.5 Área superficial	55
3.2.6 Poder calorífico superior.....	56
3.2.7 Fluorescência de raios X.....	56
3.2.8 Capacidade de troca catiônica.....	56
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
4.1 TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	58
4.1.1 Distribuição granulométrica.....	60
4.1.2 Análise imediata	61
4.1.2.1 Teor de umidade	61
4.1.2.2 Teor de cinzas.....	62
4.1.2.3 Matéria volátil	63
4.1.2.4 Carbono fixo	63
4.1.3 pH e condutividade elétrica.....	64
4.1.4 Massa específica real e área superficial	65
4.1.5 Poder calorífico superior.....	65
4.1.6 Fluorescência de raios X.....	66
4.2 PRODUÇÃO DO BIOCARVÃO	67
4.2.1 Produção em menor escala – Caracterização preliminar.....	67
4.2.2 Produção em maior escala.....	70
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCARVÃO	74
4.3.1 Rendimento.....	74
4.3.2 Análise granulométrica.....	75
4.3.3 Análise imediata	75
4.3.3.1 Cinzas	76
4.3.3.2 Matéria volátil	76
4.3.3.3 Carbono fixo	77
4.3.4 pH e condutividade elétrica.....	78
4.3.5 Massa específica real.....	80

4.3.6 Poder calorífico superior.....	80
4.3.7 Fluorescência de raios X.....	80
4.3.8 Capacidade de Troca Catiônica	82
4.4 APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO	83
5 CONCLUSÃO	93
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

As atividades florestais e agrícolas estão difundidas nas diferentes regiões do Brasil e geram elevadas quantidades de matérias-primas e resíduos. Ainda que estas atividades apresentem planos de gestão ambiental e aproveitamento integrado de seus subprodutos, muitos resíduos são descartados de maneira incorreta e contribuem para a geração de passivos ambientais (VEIGA *et al.*, 2017).

A valorização de recursos naturais renováveis ou não e das práticas tradicionais a eles associados mostra-se relevante em um contexto de economia globalizada e de crescentes pressões sobre o meio natural, social e econômico. Neste contexto se encontra o babaçu, produto do extrativismo vegetal encontrado em nove estados das regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste do Brasil, cuja produção alcançou 32.076 toneladas de amêndoas no ano de 2021 (IBGE, 2022).

A cadeia produtiva do babaçu apresenta uma estrutura bem estabelecida e antiga no Brasil, sendo uma das mais representativas do extrativismo vegetal no país. As razões para tal importância são decorrentes da grande área de abrangência da palmeira babaçu no país, das potencialidades e atividades econômicas desenvolvidas a partir dela, das famílias que sobrevivem a partir da sua exploração e da intensa mobilização social e políticas em benefício ao livre acesso aos babaçuais (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

O principal produto da planta babaçu são os frutos, que são pequenos cocos cujos caroços/amêndoas são utilizados(as) para a produção de óleo. Contudo, a baixa eficiência dos modos de produção, principalmente devido as tecnologias de aproveitamento integral do babaçu, é um dos gargalos desta cadeia produtiva que gera um resíduo rico em carbono decorrente do alto teor lignocelulósico do material (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

De acordo com Loo e Koppejan (2008), as biomassas podem ser oriundas de matéria vegetal e derivados, combustíveis de madeira e derivados de madeira e subprodutos agrícolas e agroindustriais, como por exemplo, os resíduos da produção de babaçu. O aproveitamento deste resíduo com potencial para a produção de biocarvão como biomassa é uma alternativa e apresenta oportunidade de geração de benefícios econômicos, ambientais e sociais. Dessa forma, pesquisas relacionadas ao seu uso adequado são fundamentais, visto a grande oferta destes resíduos no

território brasileiro e a importância social deste fruto para as comunidades extrativistas (DIAS *et al.*, 2012; TEIXEIRA, 2008).

A utilização da biomassa de babaçu para a produção de biocarvão por meio do processo de pirólise é uma das tecnologias existentes para a transformação de biomassa e resíduos em produtos de maior valor agregado, visando contribuir de forma mais sustentável para as questões ambientais e energéticas. Esta conversão pode permitir a obtenção de estruturas de biocarvão com propriedades específicas e que sejam passíveis de aplicação em solos pobres (VEIGA *et al.*, 2017).

As propriedades do biocarvão produzido no processo de pirólise dependem de forma direta da qualidade da biomassa de origem e das condições do processo de pirólise. Muitos estudos avaliaram a influência de diferentes parâmetros como temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, entre outros, no rendimento e nas propriedades dos produtos formados, mas poucos relatam a influência da qualidade da biomassa no biocarvão produzido (CAVALCANTE *et al.*, 2021; NASCIMENTO; OLIVEIRA; LEITE, 2019; TEIXEIRA, 2008). Este número é ainda reduzido quando a biomassa de origem é limitada aos resíduos da produção de babaçu.

Os componentes presentes no biocarvão remanescentes da biomassa conferem ao biocarvão o potencial de uso como condicionador, fertilizante e corretivos de solos. O biocarvão para aplicações em solos agrícolas vem sendo estudado e relatado, e já se mostrou ser um adequado condicionador solo (LAGHARI *et al.*, 2016), pois quando devolvido ao solo pode trazer potenciais benefícios como a menor aplicação de fertilizantes, menores emissões de carbono (potencial no sequestro de carbono) e reduzidas demandas de irrigação (melhora da capacidade de retenção de umidade do solo). Com isso, o biocarvão se encontra entre as principais preocupações na gestão agrícola, considerado como uma abordagem com potencial no desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis (RALEBITSO-SENIOR; ORR, 2016).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo geral produzir biocarvão a partir de biomassa de babaçu em processo de pirólise visando a aplicação agrícola.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos deste estudo destacam-se:

- a) avaliar a qualidade da biomassa de babaçu com base em parâmetros físicos, químicos e morfológicos;
- b) analisar as características do biocarvão produzido a partir de biomassa de babaçu; e
- c) avaliar o potencial do biocarvão como condicionador de solo para fins agrícolas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Estratégias alinhadas ao modelo de economia circular que visam a exploração consciente dos recursos e aproveitamento de resíduos estão despertando maior interesse e são de extrema importância em meio ao modelo econômico tradicional de produção, consumo e descarte. Muitos processos produtivos consideram seus resíduos somente como rejeitos, desconsiderando a necessidade de soluções ou alternativas em substituição ao descarte definitivo e resultam em exploração não sustentável de recursos naturais, descarte irregular e desperdício da energia associada a estes resíduos.

O presente estudo apresenta relevância diante da elevada quantidade de resíduos oriundos da produção de coco babaçu que apresentam potencial para aproveitamento e que, em muitos casos, são descartados de maneira inadequada.

Considerando que a conversão dos resíduos do coco babaçu em biocarvão por meio dos processos de pirólise podem resultar em um produto com potencial para aplicação em solos agrícolas, essa pesquisa visa fomentar iniciativas que têm por

objetivo avaliar o potencial dos recursos naturais renováveis como alternativa mais sustentável para esse fim.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este estudo se atentará a avaliar as características de biocarvão produzido pelo processo de pirólise lenta, em escala laboratorial, a partir de biomassa de babaçu cujo uso se destine a agricultura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BIOMASSA

2.1.1 Fontes de biomassa

A biomassa pode ser definida como todo material orgânico, não fóssil, de origem vegetal, animal ou microbiana. As biomassas podem ser plantas cultivadas ou nativas, florestas nativas ou cultivadas, resíduos florestais ou de madeira, rejeitos de animais, esgotos urbanos, resíduos domésticos de origem animal ou vegetal, formações orgânicas, descarte de lavouras, resíduos das indústrias de processamento agrícola, entre outras (DIAS *et al.*, 2012; VASSILEV *et al.*, 2010).

Segundo Loo e Koppejan (2008), biomassa são todos os tipos de materiais derivados direta ou indiretamente de reações de fotossíntese, como matéria vegetal e derivados, combustíveis de madeira e derivados de madeira, subprodutos agrícolas e agroindustriais. A biomassa é definida de duas formas por Novotny *et al.* (2015). A biomassa vegetal é definida como o produto fotossintético resultante de CO₂, água e energia solar, enquanto o produto da biomassa vegetal consumida pelos animais é definido como biomassa animal.

A biomassa é a principal fonte de energia renovável no Brasil, contudo, em muitos casos, a energia contida na biomassa residual não é aproveitada, uma vez que esta é simplesmente destinada à decomposição natural. Como um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo, o Brasil dispõe de um importante depósito de energia decorrente da quantidade de biomassa residual que gera (DIAS *et al.*, 2012).

2.1.2 Características e propriedades da biomassa

As características e a qualidade da biomassa são muito variadas e dependem, principalmente, da espécie de biomassa e da tecnologia de pré-tratamento aplicada. O teor de umidade, a temperatura de sinterização, as formas e o tamanho das partículas de biomassa podem ser muito variados. Além da variabilidade em suas propriedades físicas, também variam amplamente em suas propriedades químicas, visto que a composição e as necessidades fisiológicas (capacidade de absorção de

nutrientes e oligoelementos, por exemplo) são específicas para cada planta (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Segundo Kelley *et al.* (2004), a estrutura e as propriedades físicas e químicas da madeira e de outros recursos agrícolas utilizados como biomassa apresentam muitas diferenças. Dentre as diferenças físicas destacam-se o volume livre, sorção de água, permeabilidade e força. Quimicamente estes materiais se diferem em conteúdo e composição de lignina, celulose, hemicelulose e em relação aos componentes inorgânicos.

Para Carpenter *et al.* (2014), as biomassas são complexas física e quimicamente devido à diversidade das fontes de biomassa e suas condições de produção, resultando em composição e propriedades da matéria-prima consideravelmente diferentes. Considerando o escopo deste estudo, serão abordadas propriedades intrínsecas da biomassa ou resultantes de seu manejo e cultivo que venham a influenciar nas características do biocarvão produzido.

Ainda segundo Carpenter *et al.* (2014), a biomassa nativa apresenta baixas densidades de massa, pode apresentar ampla faixa de umidade (25% a 60%) e diferentes formas e tamanhos de partícula. Para Loo e Koppejan (2008), as biomassas podem apresentar partículas que variam de alguns milímetros a cerca de 50 cm e a distribuição destas pode ser homogênea ou heterogênea em relação ao tamanho, forma e densidade.

A biomassa vegetal é estruturalmente composta por três macromoléculas: celulose, hemicelulose e lignina, além de outras espécies menores como compostos alifáticos e fenólicos. O agrupamento da celulose e a hemicelulose é caracterizado pela formação da holocelulose que compõe as paredes das fibras da madeira. A celulose é a parede e a hemicelulose é o composto que ocupa os espaços vazios. Já a lignina é um polímero tridimensional e tem a finalidade de manter estas fibras unidas (RENDEIRO *et al.*, 2008).

A biomassa é composta, em massa, por aproximadamente 50% de carbono, cerca de 40% de oxigênio, 5% de hidrogênio, 1% de nitrogênio e oligoelementos como enxofre, cloro e outros elementos minoritários, tais como Mg, K, P, entre outros. Algumas biomassas podem conter espécies inorgânicas em concentrações significativas (NOVOTNY *et al.*, 2015; UDDIN *et al.*, 2018). Na escala molecular a biomassa é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, e por meio

da decomposição térmica destes componentes são produzidos o carvão, gás e outros produtos (CARPENTER *et al.*, 2014).

2.1.2.1 Babaçu – Aspectos gerais

A palmeira de babaçu (*Attalea speciosa* ou *Orbignya speciosa*) é típica das regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste do Brasil e também está presente na Colômbia (SWERTS, 2009; IBGE, 2022). Esta palmeira é frequentemente encontrada em grande quantidade em áreas degradadas e nestes ambientes é considerada como espécie pioneira e dominante (MAPA, 2012).

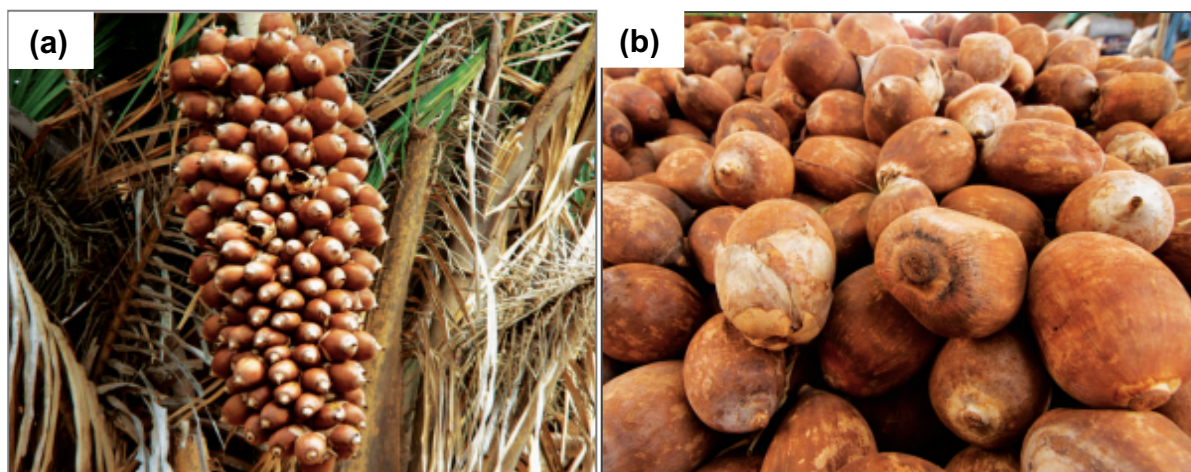
O principal produto da palmeira de babaçu são pequenos cocos, também chamados de amêndoas. Segundo dados do IBGE (2022), o Brasil produziu 32.076 toneladas de amêndoas de babaçu no ano de 2021 se somadas a produção dos nove estados em que a palmeira é encontrada, o que representa mais de R\$ 67 milhões em termos de valor de produção.

O fruto do babaçu é constituído por diferentes partes e o percentual de cada componente pode variar, mas de forma geral, o endocarpo é o constituinte em maior percentual, seguido do mesocarpo, epicarpo e núcleo. A produção do babaçu resulta em grande quantidade de resíduos que correspondem a aproximadamente 93% do total dos frutos. Estes resíduos contam com alto teor lignocelulósico e, por isso, apresentam potencial para uso como fonte de carbono para a produção de biocarvão, oportunizando benefícios econômicos, ambientais e sociais (TEIXEIRA, 2008).

A palmeira atinge cerca de 20 metros de altura e aos 15 anos alcança plena produção do fruto. Anualmente a palmeira produz de 3 a 6 cachos, podendo cada cacho apresentar de 150 a 300 cocos (SWERTS, 2009), conforme a Figura 1.

A produção dos cocos é variável, mas em geral o máximo florescimento ocorre entre janeiro e abril, e os frutos amadurecem entre agosto e dezembro. A safra se concentra do período seco até o início do período chuvoso da região, podendo variar de acordo com cada região e com as condições naturais (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Figura 1 - Imagem (a) de um cacho de babaçu e (b) dos frutos



Fonte: Santos; Muniz (2017).

A palmeira de babaçu ocorre naturalmente e em abundância, mas também é comum o plantio e o manejo do babaçu nas áreas de produção, sendo o período de chuvas a época ideal para o plantio. Visto que as raízes do babaçu contribuem para firmar o solo e evitar a erosão, o plantio desta palmeira com outras culturas anuais como arroz, milho, soja, entre outras, como também pastagens animais é extremamente viável e é denominada como sistemas agroflorestais, silvipastoris ou agrosilvipastoris (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

A cadeia produtiva do babaçu tem como base o extrativismo primário, sendo a coleta dos cocos realizada, em sua maioria, por povos e comunidades tradicionais e pequenos agricultores familiares após a queda dos frutos. A coleta do coco babaçu é realizada de maneira manual, assim que os frutos maduros começam a cair no chão ou com o auxílio de uma vara para cutucar o cacho na palmeira para derrubar os cocos maduros que ainda não caíram (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012; MAPA, 2012).

2.1.2.2 Babaçu – Produtos e subprodutos

Após a coleta é realizada a “quebra” do coco, sendo o método tradicional mais difundido para a extração das amêndoas, realizada no chão do próprio babaçal principalmente por mulheres chamadas de quebradeiras de coco babaçu. Assim, juntamente com o coco babaçu são coletados resíduos oriundos do solo que permanecem retidos no fruto quando recolhidos do chão (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012). Esta quebra artesanal é realizada com ferramentas rústicas como machado ou

pedra de forma a separar as amêndoas da casca, destinando as amêndoas para a produção de azeite e borra e da casca é produzido o carvão e a biomassa. Já a quebra mecanizada promove a separação do fruto em diferentes partes e permite o aproveitamento do coco em separado, como a utilização do epicarpo para a obtenção do subproduto xaxim e de combustível a partir da queima dos resíduos; utilização do mesocarpo para alimentação humana ou animal; produção de óleo e torta (resíduo) a partir da amêndoa; e produção do carvão ou artigos de artesanato a partir do endocarpo (MAPA, 2012).

O coco do babaçu é constituído por quatro componentes: epicarpo, mesocarpo, endocarpo e amêndoa, conforme a Figura 2. Externamente o coco apresenta uma casca rígida fina fibrosa chamada epicarpo, correspondendo de 12% a 18% do fruto e é considerado um excelente combustível primário. O epicarpo envolve o mesocarpo, que corresponde de 17% a 23% do fruto e é rico em amido, além de apresentar sais minerais, taninos e pequena quantidade de proteínas, o que possibilita sua aplicação em ração animal. Abaixo do mesocarpo se encontra o endocarpo que representa quase 60% do fruto, composto por cerca de $\frac{1}{4}$ de carbono fixo com o qual é produzido carvão vegetal com alta qualidade. A amêndoa, em média 3 por coco, representa de 6% a 8% do fruto inteiro e é composta por mais de 60% de óleo, utilizado para fins industriais ou comestíveis (SILVA *et al.*, 2019; SWERTS, 2009).

Teixeira (2008) avaliou cada componente da fruta e observou que cada um apresenta comportamento específico considerando a produção de energia:

- a) epicarpo: apresenta alto teor de voláteis, 8% maior do que eucalipto e 19% maior do que cana-de-açúcar, e alto teor de cinzas, mas em quantidade normal para biomassa. É um combustível adequado para caldeiras, mas devido ao alto teor de voláteis, apresenta baixo potencial de carbonização;
- b) mesocarpo: apresenta maior teor de voláteis, 16% maior do que eucalipto e 28% maior do que cana-de-açúcar, e teor de cinzas menor do que 1%. É um componente que resulta em queima rápida e, por consequência, baixo rendimento de carbonização;
- c) endocarpo: apresenta maior teor de carbono fixo, 1,5% maior do que cana-de-açúcar, mas 15% menor do que eucalipto, e apresenta teor médio de cinzas, dentro dos 2% esperados para biomassa. Componente adequado para queima e carbonização, confirmando a eficiência de utilizá-lo para produção de carvão vegetal;

d) núcleo (amêndoa): apresenta alto teor de voláteis e baixo teor de cinzas.

Figura 2 - Partes que compõem o fruto do babaçu



Fonte: Santos; Muniz (2017).

O óleo é o principal produto extraído da amêndoa do babaçu e é de grande interesse industrial, o restante do fruto pode ser destinado à produção de excelente carvão (SILVA *et al.*, 2019; SWERTS, 2009).

De acordo com Carrazza, Ávila e Silva (2012), o carvão de babaçu é obtido por meio de duas rotas: 1) por meio da queima de toda a casca do fruto ou 2) por meio do endocarpo. Na primeira rota é realizada a coleta do babaçu, seguida de seleção, lavagem e descasque. A casca do fruto é separada das amêndoas e então é submetida à queima, resultando em carvão. A segunda rota segue as mesmas etapas iniciais da primeira, como coleta, seleção, lavagem e descasque, porém, neste caso é realizada a quebra do endocarpo para retirada das amêndoas e, na sequência, o endocarpo é submetido à queima para conversão em carvão.

A técnica para produção de carvão pelos próprios extrativistas do fruto é chamado de “caieira”, cuja casca do fruto é colocada sobre as brasas resultantes da combustão de madeira em um buraco no chão. O material é então coberto com terra para que o calor seja totalmente conservado para a queima. Outra técnica de produção de carvão é realizada em um forno de folhas de ferro, sem a necessidade do buraco feito na terra (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Para a produção de carvão, a coleta não requer que seja realizada de maneira seletiva, comumente o coco utilizado para esta finalidade é um subproduto de outros processos, como por exemplo, o resíduo da quebra do coco para extração de amêndoas (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012). De acordo com o MAPA (2012), para a produção de carvão a partir do coco inteiro recomenda-se utilizar apenas os frutos não coletados na safra anterior.

2.1.3 Fatores que influenciam na qualidade da biomassa

A colheita é um dos fatores importantes que influenciam na qualidade da biomassa, visto que esta etapa do processo pode introduzir contaminantes como o solo, podendo ocasionar problemas operacionais durante o processamento e o rendimento dos produtos de pirólise. A contaminação da biomassa colhida pelo solo e outros detritos pode ocasionar impactos negativos em outras propriedades da biomassa durante o seu tratamento ou subsequente processamento. Tais contaminações afetam parâmetros como o teor de cinzas e de metais alcalinos na biomassa (MCKENDRY, 2002).

Para Carpenter *et al.* (2014), a biomassa apresenta diferentes faixas de umidade, tamanhos de partículas e distribuição de forma dependendo das condições de pré-processamento. Além dessas, outras características da biomassa impõem desafios para os processos de conversão e manuseio. Parâmetros importantes no processamento de biomassa incluem moagem (tempo e energia necessários para reduzir o material à especificação de tamanho necessário), fluidez (facilidade com que o sólido é induzido a se deformar para fluir pelos sistemas de manuseio), higroscopicidade (capacidade de absorver umidade), condutividade térmica e reatividade (susceptibilidade ao ataque químico ou térmico).

As propriedades inerentes da biomassa são determinantes na escolha do processo de conversão e nas possíveis dificuldades do subsequente processamento. Conforme o processo de conversão de energia utilizado, algumas propriedades específicas da biomassa tornam-se importantes durante o processamento subsequente (MCKENDRY, 2002).

O teor de umidade é uma propriedade importante da biomassa, a qual pode ser intrínseca ou extrínseca. A umidade intrínseca corresponde ao teor de umidade da biomassa sem a influência de efeitos climáticos, enquanto na umidade extrínseca as

condições climáticas predominantes durante a colheita influenciam no teor geral de umidade da biomassa (MCKENDRY, 2002).

O teor de umidade também é relevante sob o aspecto econômico e determina o processo mais provável de conversão da biomassa. Para o processo de pirólise é economicamente adequado utilizar biomassas com baixo teor de umidade, visto que a energia necessária para a secagem seria excessivamente alta se comparada ao teor de energia do produto formado (MCKENDRY, 2002).

O teor de cinzas também é uma característica que pode variar significativamente se considerado diferentes tipos de biomassa. As cinzas são normalmente oriundas de materiais como areia e sais e sua composição elementar é composta principalmente por silício, potássio, cálcio, magnésio, sódio, fósforo e cloro. A sílica presente nas cinzas pode reagir com metais alcalinos da biomassa (sódio, potássio, magnésio, fósforo e cálcio), gerando uma fase líquida pegajosa e móvel que pode acarretar o bloqueio das vias aéreas do forno e da caldeira (MCKENDRY, 2002).

As cinzas, também chamadas de conteúdo mineral da biomassa, são conhecidas inclusive por apresentar efeitos catalíticos no processo de pirólise. Até mesmo níveis traços de cinzas podem ter influência na taxa de degradação térmica e nas vias químicas durante a pirólise, devido aos metais alcalinos potássio e sódio e, em menor grau, os metais alcalinos terrosos como cálcio e magnésio. Já o silício, que é relativamente inerte em reações de pirólise, normalmente se acumula na fração de carvão produzido na pirólise (CARPENTER *et al.*, 2014).

2.2 PROCESSO DE PIRÓLISE DE BIOMASSA

A pirólise apresenta flexibilidade de operação, versatilidade de tecnologia e variedade de matérias-primas empregadas e de produtos obtidos, características que a tornaram um processo de grande interesse industrial. Neste processo geralmente o calor é fornecido externamente e os constituintes da matéria-prima sofrem decomposição térmica na ausência de oxigênio. Esta tecnologia apresenta considerável flexibilidade visto que algumas mudanças nas condições do processo como temperatura, tempo de residência, presença de aditivos e catalisadores e pressão resultam em diferentes distribuições dos produtos obtidos (ADAMS *et al.*, 2018; BRIDGWATER, 2013).

A conversão da matéria-prima resulta em frações sólidas (carvão), líquidas (geralmente chamadas de bio-óleo) e gasosas. Estes três produtos sempre são produzidos, entretanto as proporções podem variar consideravelmente por meio do ajuste dos parâmetros do processo (ADAMS *et al.*, 2018).

Para Novotny *et al.* (2015), o rendimento dos produtos de pirólise é variável e depende principalmente das condições do processo. De modo geral, os processos de pirólise se diferenciam em relação à velocidade com que o calor é transferido para as partículas da biomassa, à temperatura máxima e ao tempo de residência. De acordo com estas características os processos de pirólise podem ser classificados como:

- a) pirólise lenta ou convencional: a biomassa é pirolisada em baixas taxas de aquecimento (5 a 7°C/min), temperatura relativamente baixa (300 a 600°C) e longo tempo de residência (minutos a horas). A pirólise lenta é indicada para a produção de sólidos com fração de 20 a 40% (carvão ou biocarvão), visto que outros produtos como gás e óleo são minimizados em decorrência das condições operacionais;
- b) pirólise rápida: caracterizada pela decomposição da biomassa a altas temperaturas (acima de 500°C) e tempos de residência mais curtos (segundos) do que a pirólise lenta. Ainda que o rendimento de bio-óleo seja alto, o rendimento de sólidos pode ser de 10 a 15% (biocarvão ou carvão); e
- c) pirólise ultrarrápida: processo realizado a altas temperaturas (400 a 950°C) e caracterizado por taxas de aquecimento muito altas e tempos de residência muito baixos (alguns segundos).

As diferenças operacionais dos diferentes processos de pirólise são apresentadas de forma resumida na Tabela 1.

O processo de pirólise de biomassa pode ser dividido em dois mecanismos. O mecanismo primário e mecanismo secundário. No mecanismo primário, durante o processo de aquecimento da biomassa, as ligações químicas dentro dos polímeros que a constituem são rompidas, liberando compostos voláteis. As reações de rearranjo dentro da matriz do resíduo e reações adicionais de alguns compostos voláteis instáveis caracterizam o mecanismo secundário da pirólise de biomassa (HOSOYA; KAWAMOTO; SAKA, 2007; VAN DE VELDEN *et al.*, 2010; VENDERBOSCH; PRINS, 2010).

Tabela 1 - Características operacionais dos diferentes tipos de pirólise

Processo	Tempo de residência	Taxa de Aquecimento	Tamanho de partícula	Temperatura
Lento	Longo	Baixa	*	Moderada (350 – 750°C)
Rápido	Curto (0,5 - 2s)	*	<3 mm	Moderada (400 – 550°C)
Ultrarrápido	Curto (<0,5s)	Rápido	<0,5 mm	Alta (400 – 1000°C)

* Não informado.

Fonte: Adams *et al.* (2018).

2.2.1 Tecnologias de pirólise – Reatores

O processo de pirólise é realizado em um reator no qual ocorrem todas as reações de conversão. Os reatores pirolíticos podem ser classificados em dois sistemas gerais, em batelada (descontínuo) ou contínuo, sendo os principais os de leito fixo, leito fluidizado (borbulhante e circulante), leito de jorro, cilindro rotativo, reator ciclônico, cone rotativo, entre outros (MOTA *et al.*, 2015; UDDIN *et al.*, 2018).

O reator de leito fixo é simples e adequado para combustíveis de tamanho relativamente uniforme, operando geralmente com alta preservação de carbono, baixa velocidade do gás, temperaturas finais de pirólise entre 450 e 750°C, com taxas de aquecimento que oscilam entre 5 e 100°C/min. Este sistema é geralmente utilizado para a produção de carvão vegetal (MARTINI, 2009; UDDIN *et al.*, 2018).

Os reatores de leito fluidizado empregam um elemento inerte, geralmente areia, para dar estabilidade fluidodinâmica ao processo e auxiliar no aquecimento da biomassa, sendo muito empregados em projetos que visam maximizar o produto líquido produzido na pirólise (UDDIN *et al.*, 2018). Estes sistemas operam com baixo teor de oxigênio, temperaturas finais de processo que variam entre 500 e 900°C e taxas de aquecimento entre 100 e 500°C/min (MARTINI, 2009).

Os reatores de leito fluidizado apresentam uma tecnologia bastante conhecida, destacando-se o reator de leito fluidizado borbulhante e o reator de leito fluidizado circulante. O primeiro tipo de reator resulta em alto rendimento do produto líquido,

geralmente de 70 a 75% (em massa) em base seca e o carvão produzido neste sistema é considerado um subproduto e apresenta, em geral, rendimento de 10 a 15% (em massa). Este tipo de reator também exige pequenos tamanhos de partículas de biomassa (2 a 3 mm) para que altas taxas de aquecimento sejam alcançadas, sendo a taxa de aquecimento tipicamente considerada como a etapa limitante do processo. Os reatores de leito fluidizado circulante apresentam muitas das características dos reatores de leito fluidizado borbulhante, contudo este sistema pode ser alimentado com partículas maiores de biomassa (BRIDGWATER, 2013).

Os reatores a vácuo, se comparados aos reatores de leito fluidizado, apresentam o processo mais lento e taxas de transferência de calor mais baixas. Este é um processo de pirólise que demanda maior tempo de residência e produz partículas maiores se comparado a maioria dos reatores de pirólise rápida (UDDIN *et al.*, 2018).

Os reatores de cone rotativo operam com rotação de alta velocidade que resulta em uma mistura dinâmica de areia quente e biomassa na base do cone rotativo e, a centrifugação leva esta mistura até a parte interna do cone aquecido rotativo. Vários tipos de biomassa podem ser moídos no reator de cone rotativo, entretanto, este sistema resulta em pequena formação de carvão (BRIDGWATER, 2013; UDDIN *et al.*, 2018).

Outro tipo de reator, os helicoidais, realizam a troca de matéria-prima de biomassa sobre um tubo cilíndrico livre de oxigênio. Este sistema está recebendo maior atenção por indústrias de médio porte (UDDIN *et al.*, 2018).

A Tabela 2 apresenta algumas matérias-primas de biomassa com os respectivos tipos de reatores utilizados para a conversão térmica, com base em pesquisas anteriores.

Tabela 2 - Resumo de pesquisas anteriores sobre conversão de biomassa

Biomassa	Tipo de reator	Temperatura (°C)	Rendimento (% em peso)		
			Carvão	Bio-óleo	Gás
Casca de arroz	Leito fixo	100-500	42-48	28-35	-
Lascas de pinho	Leito fixo	500	31	15	18
Palha de milho	Leito fluidizado	450-600	28-46	35-50	11-14
Casca de arroz	Leito fluidizado	450	29	56	15
Espiga de milho	Leito fluidizado	500	20	62	17
Bagaço de cana-de-açúcar	Leito fluidizado	500	23	73	4
Palha de trigo	Leito fluidizado	550	24	54	24
Casca de girassol	Leito fluidizado	500	23	57	20
Madeira	Ablativo	650	6	60	64
Palha de cevada	Ablativo	549	32	50	12
Bagaço de cana-de-açúcar	Vácuo	530	26	51	22
Palha de arroz	Vácuo	500	35	47	18
Oliveira	Fornos rotativos	500	26	38	55
Palha de arroz	Helicoidal	500	45	26	13

Fonte: Adaptado de Uddin *et al.* (2018).

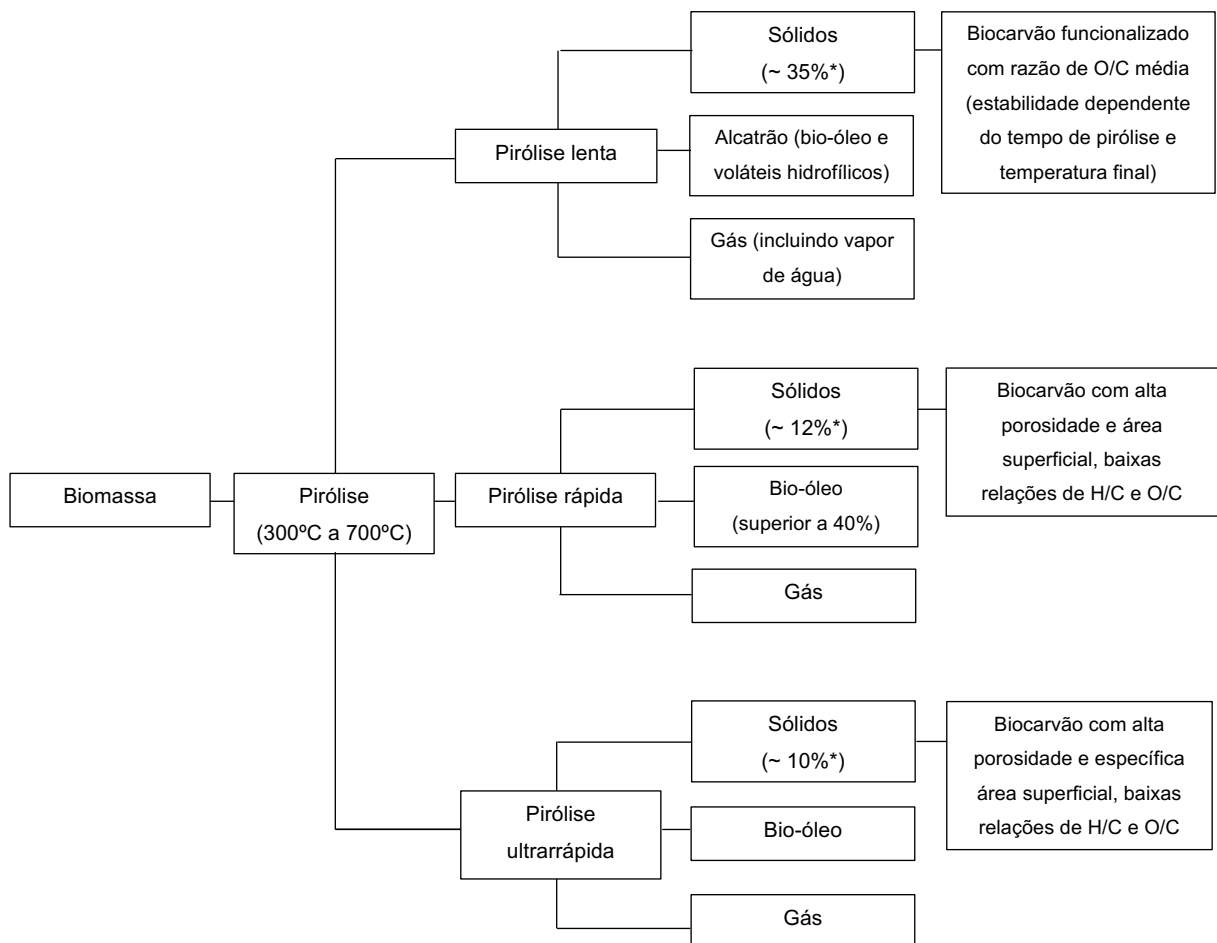
2.2.2 Produtos da pirólise

Os produtos primários gerados pela pirólise de biomassa são: carvão, gases e vapores que condensam formando um líquido viscoso em temperatura ambiente, conhecido como bio-óleo. Os rendimentos de cada produto dependem das condições operacionais e do tipo de matéria-prima utilizada como combustível (UDDIN *et al.*, 2018).

De acordo com Bridgwater (2013), a produção de carvão pode ser favorecida por meio de temperaturas de processo mais baixas e tempos de residência mais longos. A produção de líquidos pode ser favorecida com temperaturas moderadas e tempos de residência curtos, enquanto altas temperaturas e tempos de residência mais longos são ótimos para a conversão de biomassa em gás.

Em relação aos rendimentos dos produtos no processo de pirólise, Uddin *et al.* (2018), afirmam que a produção de carvão é favorecida pela pirólise lenta ou carbonização, realizada em baixas temperaturas e longos tempos de residência. Em altas temperaturas e longos tempos de residência é favorecida a formação de gases. Já a obtenção de líquidos ou bio-óleos é favorecida em temperaturas moderadas e baixo tempo de residência. A Figura 3 apresenta os diferentes processos de pirólise e os respectivos produtos obtidos em cada condição.

Figura 3 - Produtos resultantes dos diferentes processos de pirólise



Fonte: Adaptado de Novotny *et al.* (2015) (*BRIDGWATER, 2003).

2.2.2.1 Biocarvão

O biocarvão é um material sólido poroso, rico em carbono, produzido geralmente por conversão termoquímica de uma ampla variedade de biomassa em uma atmosfera limitada em oxigênio. Segundo a International Biochar Initiative (IBI), o biocarvão é um carvão com a finalidade de uso agropecuário ou florestal e deve atender características físico-químicas específicas (IBI, 2015).

O processo de pirólise provoca a degradação térmica da celulose, hemicelulose e lignina provenientes da biomassa, resultando em considerável perda de massa na forma de voláteis, o que implica em uma matriz rígida de carbono amorfo conhecido como biocarvão (JAHIRUL *et al.*, 2012). Sendo o biocarvão um produto/subproduto da conversão termoquímica da biomassa, o seu rendimento e qualidade dependem da matéria-prima de origem e do processo de produção, bem como o seu desempenho como condicionador de solo (JAMES *et al.*, 2022). A composição do biocarvão também é variável de acordo com o tipo de matéria-prima, uma vez que apresenta algumas de suas propriedades (LAGHARI *et al.*, 2016). As biomassas mais adequadas para a produção de biocarvão são as provenientes de resíduos florestais, animais e de colheita (IBI, 2013; LAGHARI *et al.*, 2016).

Para Ralebitso-Senior e Orr (2016), a matéria-prima de origem do biocarvão determina qual a sua composição química final, enquanto a área superficial, o tamanho, volume, distribuição de poros, sorção e partição do biocarvão são determinados, em particular, pelas condições do processo de pirólise.

O biocarvão apresenta potenciais benefícios principalmente em virtude de sua resistência à degradação biológica e física quando aplicado em solos, o que reflete em outras propriedades como a retenção de nutrientes e água, ativação microbiana e calagem que proporcionam a melhoria das funções do solo ao longo de décadas e séculos. Ainda assim, a utilização de biocarvão deve ser realizada de forma comedida devido à possível presença de metais pesados e poluentes orgânicos na matéria-prima precursora, o que pode acarretar em emissões atmosféricas nocivas durante o processo de conversão termoquímica e no acúmulo destes tóxicos no biocarvão (IBI, 2013).

Alguns métodos de caracterização do biocarvão foram propostos pela IBI (2015), que também definiu os parâmetros requeridos pelos biocarvão de acordo com três categorias:

- a) categoria A (necessária para todos os biocarvões): considera as propriedades básicas do biocarvão para avaliar a sua utilidade. Nesta categoria é avaliado o tamanho de partícula, umidade, proporções elementares de H, C e N, cinzas, condutividade elétrica, pH e teor de carbono orgânico;
- b) categoria B (necessária para todos os biocarvões): considera os limites de toxicidade do solo. Os compostos tóxicos do biocarvão podem ser provenientes da matéria-prima precursora (metais e bifenilos policlorados) e resultantes do processo de conversão termoquímica (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e dioxinas/furanos). Este ensaio indica os níveis acima dos quais o material não seria considerado aceitável para utilização no solo com base em valores de várias jurisdições;
- c) categoria C (opcional): análises avançadas e propriedades de melhoria do solo. As características avançadas incluem o conteúdo de matéria volátil e a área superficial dos biocarvões, enquanto as propriedades de aprimoramento do solo identificam os nutrientes das plantas contidos no biocarvão.

2.2.2.2 Bio-óleo

O bio-óleo é um líquido de cor marrom escuro obtido pelo resfriamento dos produtos intermediários da degradação térmica da celulose, hemicelulose e lignina no processo de pirólise. O bio-óleo apresenta composição elementar semelhante ao da biomassa de origem e é composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos oxigenados com uma proporção alta de água (BRIDGWATER, 2013; UDDIN *et al.*, 2018).

Para Shackley *et al.* (2012) o bio-óleo é um produto orgânico que contém muitos compostos oxigenados, podendo se apresentar em uma única fase aquosa ou em mais de uma fase, juntamente com a água remanescente da matéria-prima ou produzida na pirólise.

2.2.2.3 Gás

O gás produzido na pirólise é formado por uma mistura de monóxido de carbono – CO, dióxido de carbono – CO₂, hidrogênio – H₂, metano – CH₄ e pequenas quantidades de hidrocarbonetos (BRIDGWATER, 2013; SHACKLEY *et al.*, 2012).

Assim como os demais produtos, o rendimento do gás é influenciado pelas condições de operação da pirólise. A temperatura de pirólise é altamente influente no seu rendimento, sendo possível obter maiores quantidades de gás com altas temperaturas na pirólise rápida. Este fato pode ser explicado em virtude de altas temperaturas favorecerem a decomposição e o craqueamento térmico do bio-óleo para formar componentes do gás, aumentando seu rendimento e conseqüentemente, reduzindo o rendimento de bio-óleo e carvão (UDDIN *et al.*, 2018).

2.2.3 Influência da qualidade da biomassa nos produtos da pirólise

A composição e a distribuição dos produtos de pirólise são fortemente influenciadas pela natureza e pelo preparo da matéria-prima, bem como as condições operacionais do processo de pirólise (SHACKLEY *et al.*, 2012). Matérias-primas celulósicas, por exemplo, resultam em baixo rendimento de bio-óleo, enquanto altos rendimentos de bio-óleo podem ser alcançados com matérias-primas com alto teor de lignina. Esta última característica também resulta em maiores rendimentos do biocarvão, juntamente com gases e produtos líquidos (RO; CANTRELL; HUNT, 2010).

De acordo com UDDIN *et al.* (2018), as razões de carbono fixo, umidade, matéria volátil e teor de cinzas são indicadores de rendimentos de produtos de pirólise. Enquanto o teor significativo de matéria volátil favorece a produção de gás e bio-óleo, o carbono fixo aumenta a produção de biocarvão. Para Jahirul *et al.* (2012), as propriedades indicadoras de rendimento são o teor de lignina, matéria volátil, carbono fixo, teor de cinzas e umidade da biomassa. Matérias-primas que apresentam alto teor de lignina resultam em maiores rendimentos de biocarvão quando pirolisadas em temperaturas moderadas, aproximadamente 500°C. Biomassa com elevada quantidade de matéria volátil produz, geralmente, grandes quantidades de bio-óleo e gás, enquanto a produção de biocarvão é favorecida com elevado teor de carbono fixo. O rendimento de bio-óleo também é favorecido com o aumento do teor de umidade da biomassa, diminuindo o rendimento dos sólidos e gases. Por fim, a

proporção elementar de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e teor de cinzas também exerce influência no rendimento dos produtos de pirólise, sendo que baixos teores de minerais e nitrogênio favorecem a produção de bio-óleo e gás.

A origem da matéria-prima também tem impacto na composição e no rendimento do biocarvão produzido. Biocarvão rico em potássio (K), por exemplo, pode ser obtido a partir de esterco animal, enquanto biocarvão rico em carbono (C) pode ser produzido a partir de biomassa lenhosa. O rendimento do carvão também pode ser afetado pelos componentes minerais presentes nas cinzas uma vez que estes podem apresentar efeito catalítico, aumentando a produção do carvão (LAGHARI *et al.*, 2016; RO; CANTRELL; HUNT, 2010; SHACKLEY *et al.*, 2012).

São muitas as variáveis que influenciam nas propriedades do biocarvão como, por exemplo, a matéria-prima, a temperatura de reação e a taxa de aquecimento. Propriedades como pH, teor de nutrientes, carbono fixo e capacidade de troca catiônica podem variar entre diferentes biocarvões (JAMES *et al.*, 2022). Dependendo das condições de produção, as propriedades do biocarvão incluem características como estrutura porosa, alta área superficial específica e alta densidade de grupos funcionais em superfícies enriquecidas com componentes minerais (MATOS *et al.*, 2021).

O rendimento do carvão também pode ser afetado pelo teor de umidade e o tamanho das partículas da matéria-prima. A umidade pode exercer influência positiva ou negativa sobre o rendimento, dependendo das condições de processo. Para a produção de biocarvão de alta qualidade é indicado que a biomassa apresente teor de umidade inferior a 10%. Partículas grandes de biomassa atingem rendimentos mais altos por meio da restrição do desprendimento de vapor que favorecem as reações secundárias de formação do carvão (RO; CANTRELL; HUNT, 2010; SHACKLEY *et al.*, 2012).

Para Bridgwater (2003), é desafiador submeter a partícula de biomassa à temperatura ideal do processo de pirólise rápida para evitar a exposição com temperaturas intermediárias (mais baixas) que favorecem a produção de carvão. Um modo de alcançar este objetivo é por meio de partículas pequenas, como nos processos de leito fluidizado. Este pode ser um indicativo de que partículas maiores favorecem a produção de carvão em processos de pirólise rápida, sendo interessante avaliar a influência do tamanho de partícula nos produtos de pirólise.

Embora a maioria dos biocarvões apresente pH alcalino, há relatos de biocarvão com pH neutro a levemente ácido produzido com madeira de alfarroba preta e pinus. Da mesma forma que outras propriedades, o pH é mais uma influenciada pelas condições operacionais e pela matéria-prima geradora e está relacionado ao teor de cinzas. Biocarvões com maiores valores de pH estão associados a altos teores de cinzas (LAGHARI *et al.*, 2016).

O pH do biocarvão também tem impacto na sua capacidade de troca catiônica (CTC), sendo que valores altos de pH elevam a CTC e valores baixos de pH diminuem a CTC do biocarvão (SHACKLEY *et al.*, 2012).

Assim como a qualidade da matéria-prima impacta no rendimento dos produtos de pirólise, também pode impactar na qualidade destes. De acordo com a origem e natureza da matéria-prima da pirólise, o biocarvão produzido pode conter contaminantes como metais pesados e compostos orgânicos (SHACKLEY *et al.*, 2012).

2.3 APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO COMO CONDICIONADOR DE SOLO

2.3.1 Biocarvão como condicionador de solo

Vários problemas são causados ao solo quando se tem uma demanda muito elevada de cultivo, como a redução da matéria orgânica (MO), baixa capacidade de retenção de água, perda de nutrientes, compactação, encharcamento e erosão. Características como o baixo teor de MO, alta compactação e natureza argilosa podem resultar em solos com alta resistência à tração e, por consequência, podem afetar os processos do solo, o crescimento das sementes e a lavrabilidade do solo (LAGHARI *et al.*, 2016).

O biocarvão apresenta em sua composição muitos componentes orgânicos remanescentes da biomassa como consequência de sua degradação térmica incompleta. Estes componentes conferem ao biocarvão o potencial de uso como fertilizantes e corretivos de solos. A característica de não ser facilmente degradável pelos micro-organismos também favorece o uso de biocarvão em solos agrícolas, contribuindo para a melhora da estrutura do solo, retenção de água, propriedades químicas e mobilidade de nutrientes para as plantas. Além disso, o biocarvão sendo um material carbonáceo, tem a capacidade de reduzir a resistência à tração através

do enfraquecimento da ligação entre partículas, resultando na redução da densidade e da coesão do solo (LAGHARI *et al.*, 2016).

O uso de biocarvão para aplicações em solos agrícolas vem sendo bem relatado e já demonstrou ser um ótimo condicionador. As suas características porosas tornam o biocarvão um bom agente retentor de água quando aplicado no solo e os minerais inorgânicos e o conteúdo orgânico em sua composição fornecem nutrientes essenciais para as plantas. Entretanto, a principal característica do biocarvão é a alta estabilidade do agregado, apresentando taxas de decomposição muito baixas no solo (KAMBO; DUTTA, 2015; WAQAS *et al.*, 2021).

A aplicação de biocarvão no solo tem sido associada ao aumento da eficiência no uso dos nutrientes contidos no próprio biocarvão ou ainda, por meio de processos físico-químicos que permitem o melhor aproveitamento dos nutrientes inerentes ao solo ou provenientes de fertilizantes (SOHI *et al.*, 2009).

A estrutura altamente porosa do biocarvão que varia de menos de 0,9 nm a mais de 50 nm é a sua principal qualidade, tornando-o atraente como suplemento do solo. Esta característica tem a capacidade de melhorar a retenção de água e aumentar a área superficial do solo. O biocarvão também apresentou contribuição direta na absorção de nutrientes, diminuindo a lixiviação e aumentando a eficiência do uso destes nutrientes, tendo como resultado maiores rendimentos das culturas. (RALEBITSO-SENIOR; ORR, 2016).

A matéria-prima é o fator determinante das propriedades químicas e físicas do biocarvão. De acordo com Kuwagaki (1990 *apud* SOHI *et al.*, 2009), são sete as propriedades que deveriam ser medidas para a avaliação de biocarvão para uso agrônomo, são elas: pH, teor de compostos voláteis, teor de cinzas, capacidade de retenção de água, densidade aparente, volume de poros e área superficial específica.

2.3.2 Condicionadores de solo – Legislação e características

A Instrução Normativa SDA nº 35 de 4 de julho de 2006 dispõe sobre as especificações e garantias, tolerância, registro, embalagem e rotulagem de corretivos de acidez, alcalinidade e sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. Esta mesma instrução normativa define condicionador de solo como um produto que promove a melhoria de propriedades físicas, físico-químicas ou atividade biológica do solo, podendo ser eficiente na recuperação de solos degradados ou

desequilibrados nutricionalmente (BRASIL, 2006). Os condicionadores de solo podem ser classificados de acordo com as matérias-primas das quais são oriundos, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos condicionadores de solo

Classe	Origem da matéria-prima
A	Vegetal, animal ou de processamento da agroindústria (sem uso de sódio, metais pesados, elementos/compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos).
B	Processamento da agroindústria ou da atividade industrial (com uso de sódio, metais pesados, elementos/compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos).
C	Qualquer quantidade de matéria-prima oriunda de lixo domiciliar.
D	Qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários.
E	Exclusivamente matéria-prima de origem mineral ou química.
F	Qualquer proporção da mistura das matérias-primas que resultam nas Classes “A” e “E”.

Fonte: Brasil (2006).

Com base na Instrução Normativa nº 35 é possível classificar o biocarvão proveniente de biomassa de babaçu como sendo um condicionador de solo Classe “A”.

Os condicionadores de solo podem apresentar especificações diferentes conforme as suas intenções de uso. Propriedades como a capacidade de retenção de água (CRA) e a capacidade de troca catiônica (CTC) são de interesse quando o condicionador for destinado à melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas do solo, por exemplo, e devem seguir as especificações do Quadro 2.

Quadro 2 - Especificações de condicionadores de solo

Propriedade	Especificação
Capacidade de Retenção de Água (CRA)	> 60%
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	> 200 mmol c/kg

Fonte: Brasil (2006).

Para a declaração do teor de nutrientes, carbono orgânico e relação de C/N, o condicionador deve atender às mesmas especificações estabelecidas para fertilizantes minerais ou orgânicos, conforme disposto no decreto nº 4.954 de 2004 e em atos normativos próprios. Outras propriedades também podem ser declaradas, desde que sejam passíveis de medições quantitativas e os referidos métodos de determinação sejam indicados, assim como comprovada a sua eficiência agronômica (BRASIL, 2006).

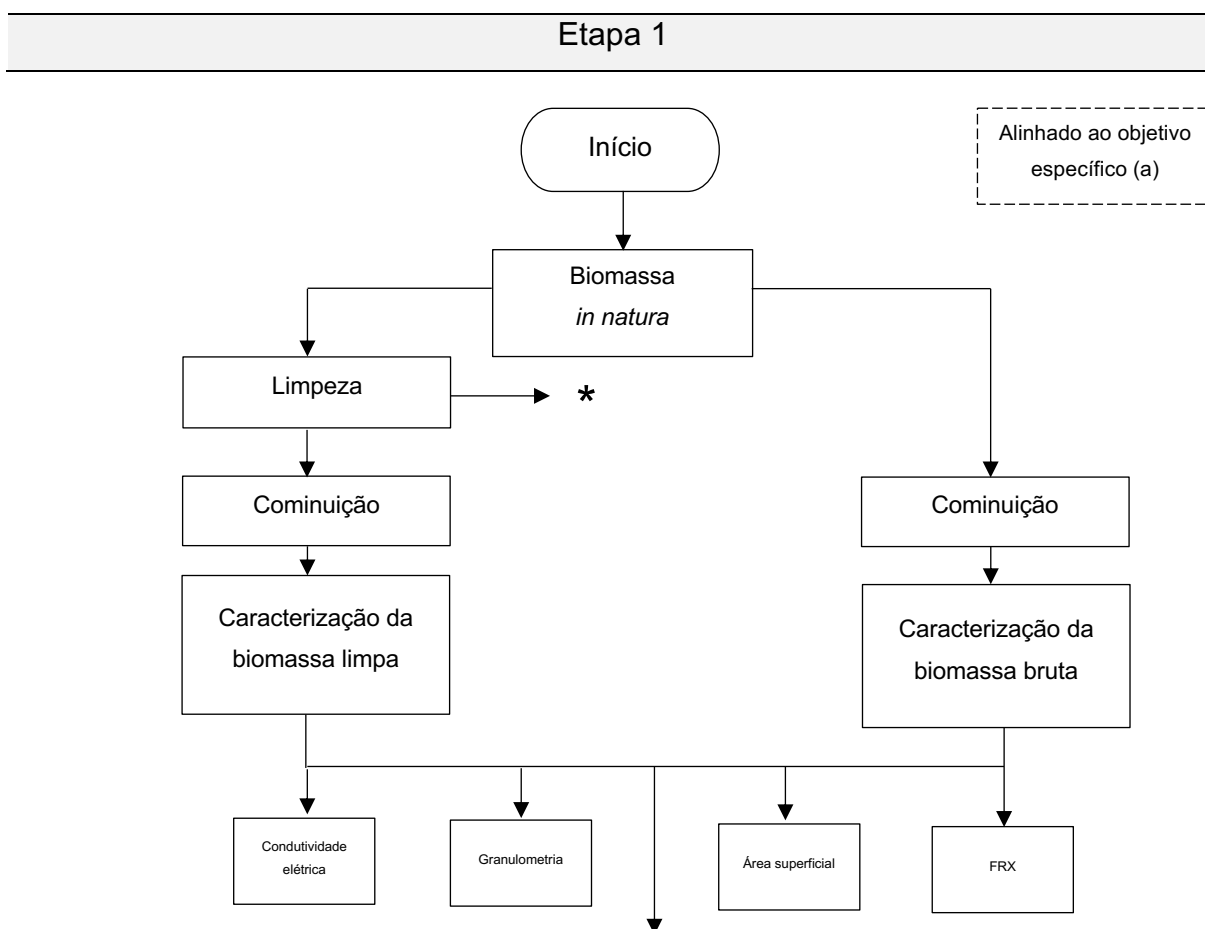
3 METODOLOGIA

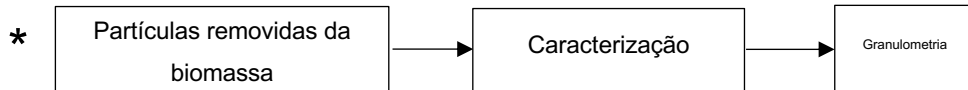
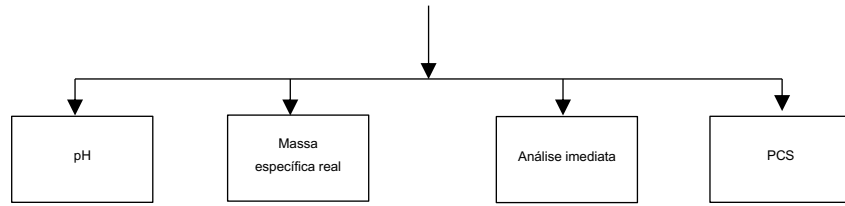
Este capítulo contempla os diferentes processos que foram empregados para a execução do programa experimental e está dividido em quatro etapas que compreendem, em geral: 1) a caracterização da biomassa; 2) a produção do biocarvão; 3) a caracterização do biocarvão e 4) a aplicação do biocarvão.

As atividades experimentais do presente estudo foram realizadas nos laboratórios da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos. Os ensaios de pirólise e as análises de caracterização como área superficial, massa específica real, fluorescência de raios X e poder calorífico superior foram realizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais e os demais ensaios foram realizados nos Laboratórios de Química e Farmácia da universidade. As etapas do programa experimental deste estudo são apresentadas na Figura 4.

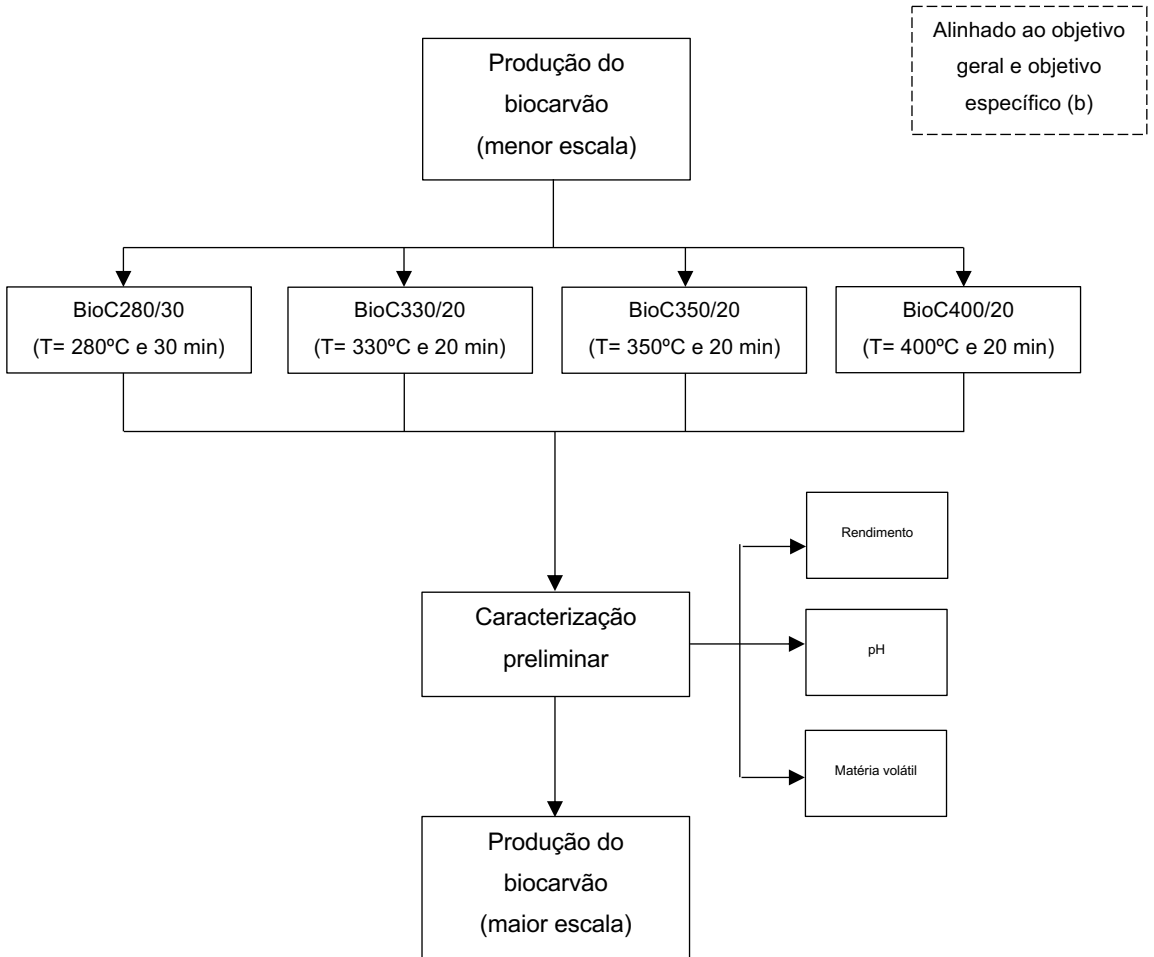
Figura 4 - Fluxograma do programa experimental

(continua)

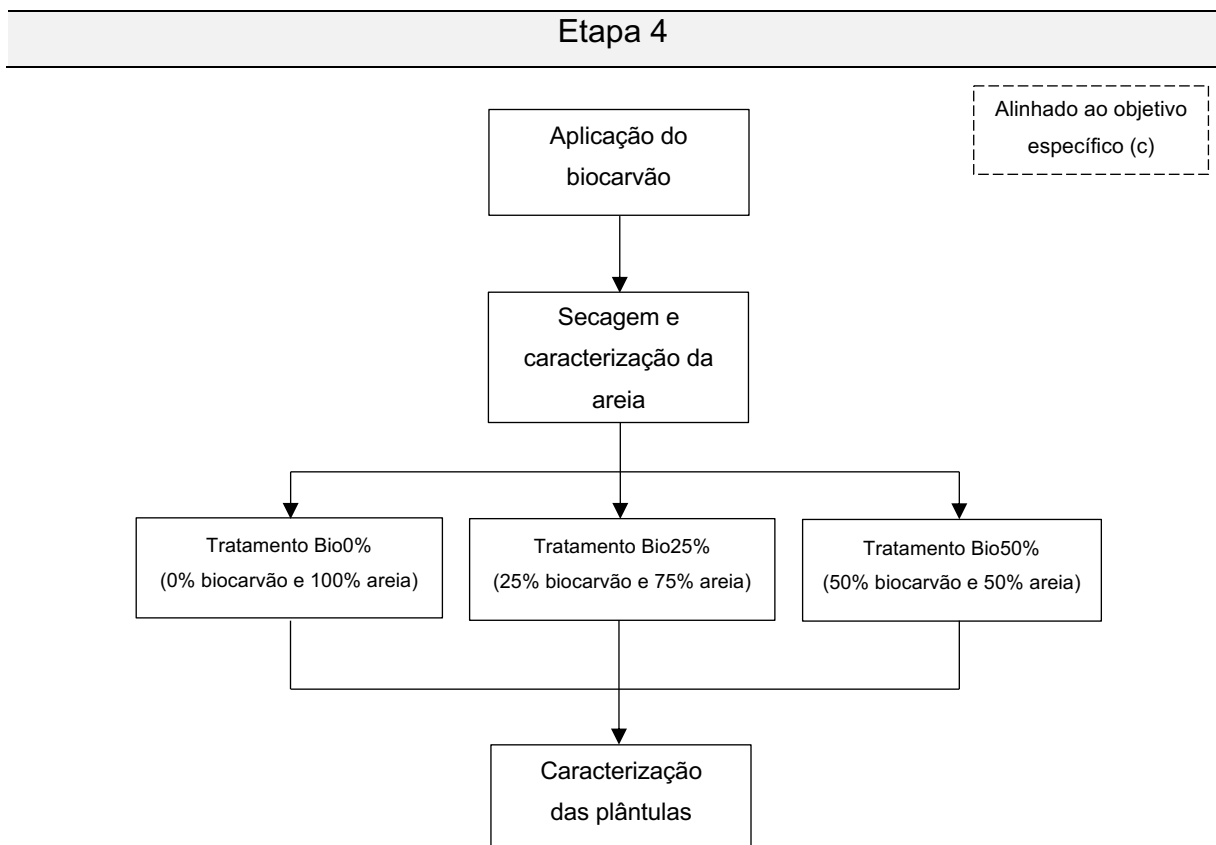
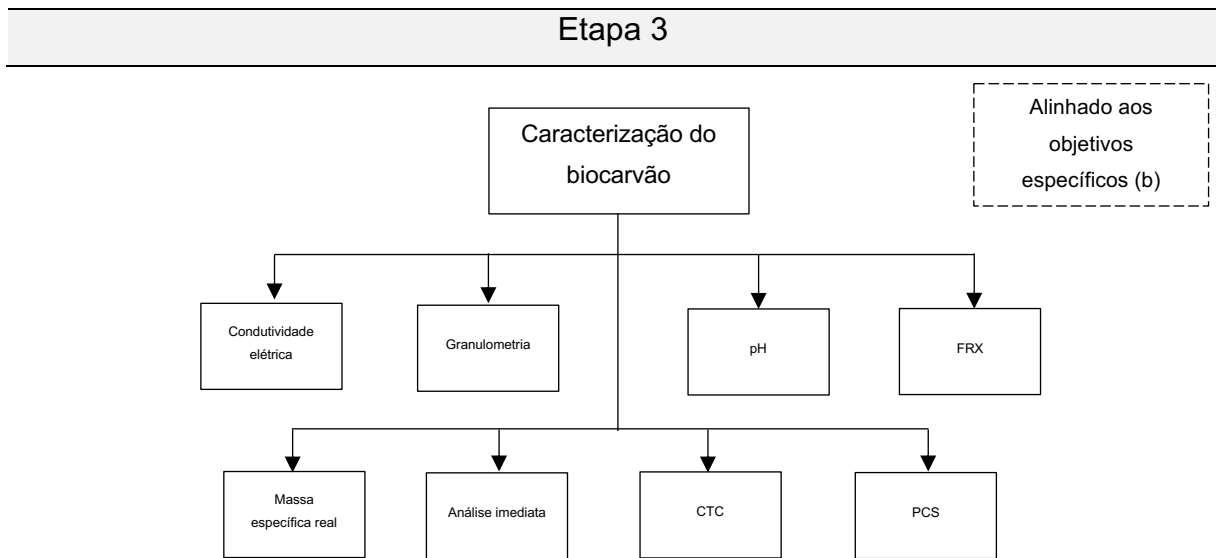




Etapa 2



(conclusão)



Fonte: Autora.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este subitem apresenta a descrição detalhada das quatro etapas que compuseram o programa experimental desta pesquisa.

3.1.1 Etapa 1 – Tratamento e caracterização da biomassa

A biomassa de babaçu utilizada como material precursor deste estudo era proveniente do povoado Raimundo Su, cidade de Alcântara, no estado do Maranhão. A biomassa era composta por partes como o epicarpo, mesocarpo e endocarpo da fruta, conforme Figura 5.

Figura 5 - Biomassa de babaçu *in natura*



Fonte: Autora.

A Etapa 1 do programa experimental contemplou a caracterização da biomassa, sendo esta inicialmente dividida em dois lotes. O lote de biomassa que foi diretamente submetido ao processo de cominuição foi denominado como biomassa bruta. A cominuição foi realizada em moinho de facas da marca SEIBT modelo MGHS270A por 10 minutos. Considerando que a Instrução Normativa SDA nº 17 aprova métodos analíticos para a análise de substratos e condicionadores de solo e exige que a totalidade da amostra passe através de uma peneira de malha 19 x 19mm

(ASTM 3/4”), este foi o tamanho máximo de partícula da biomassa adotado após cominuição para o processo de produção do biocarvão.

O segundo lote foi submetido a uma limpeza com pincel para remoção de partículas aderidas a biomassa em função da forma de coleta do babaçu. Visto que este estudo buscava avaliar as características do biocarvão e os fatores que podem influenciar nas suas características, conhecer as partículas aderidas à biomassa também se tornou relevante. A quantidade de partículas presentes em determinada massa de biomassa corresponde a diferença da massa entre as pesagens antes e após a limpeza. Assim, as partículas aderidas à biomassa podem ser estimadas com base na equação 1.

$$\% \text{ partículas} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

m_1 é massa em gramas do recipiente vazio;

m_2 é massa em gramas do recipiente com a biomassa antes da limpeza;

m_3 é massa em gramas do recipiente com a biomassa após a limpeza.

Após a remoção das partículas, o lote de biomassa submetido ao processo de limpeza foi submetido a cominuição em moinho de facas nas mesmas condições do primeiro lote e foi denominado como biomassa limpa. Para esta biomassa também foram consideradas as partículas de biomassa que passaram pela peneira de malha 19 x 19 mm, conforme preconiza a Instrução Normativa SDA nº 17.

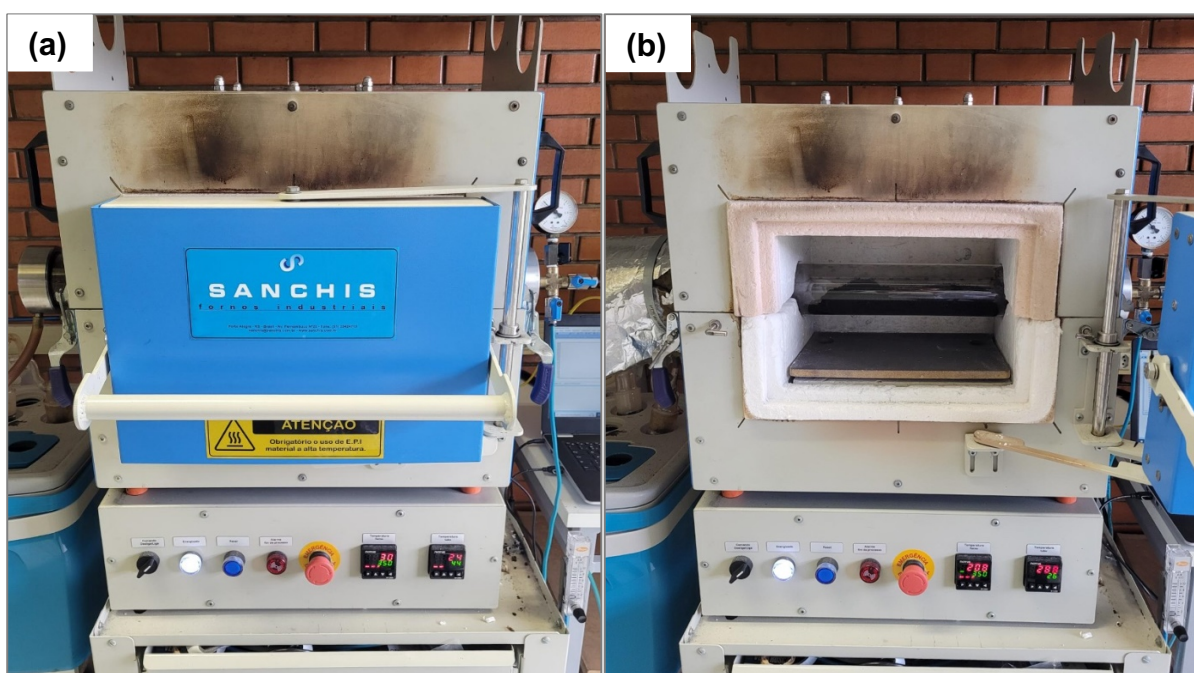
As biomassas e as partículas removidas do segundo lote de biomassa foram posteriormente submetidas aos ensaios de caracterização, conforme o Quadro 4. A partir da caracterização das biomassas foi possível observar que as partículas aderidas não acarretaram diferenças consideráveis entre estas biomassas e, considerando a viabilidade industrial, optou-se por seguir as demais etapas deste estudo com a biomassa que não foi submetida ao processo de limpeza, ou seja, a biomassa bruta.

3.1.2 Etapa 2 – Produção do biocarvão

A Etapa 2 do programa metodológico foi procedida com a biomassa bruta e consistiu na produção do biocarvão por meio do processo de pirólise. Esta etapa foi realizada em reator de leito fixo sob condição de pirólise lenta, visto que essas condições favorecem a produção e o maior rendimento do biocarvão em comparação aos demais métodos, conforme descrito nos itens 2.2 e 2.2.1.

Inicialmente foram propostas quatro condições de operação do reator para a produção do biocarvão, assumindo temperaturas e tempos de residência diferentes. A taxa de aquecimento e o fluxo de N_2 adotados foram os mesmos para todas as condições, $10^\circ\text{C}/\text{min}$ e $1 \text{ mL}/\text{min}$, respectivamente. A produção do biocarvão foi inicialmente realizada em menor escala em bateladas distintas sob as diferentes condições de operação, resultando em diferentes amostras de biocarvões. A Figura 6 apresenta o reator de leito fixo que foi utilizado para a produção do biocarvão e a Tabela 3 apresenta de forma simplificada as diferentes temperaturas e tempos de residência assumidos, juntamente com a identificação da amostra de biocarvão obtida em cada condição.

Figura 6 - Reator de leito fixo (a) em operação e (b) após produção do biocarvão proveniente de biomassa de babaçu



Fonte: Autora.

Tabela 3 - Condições de operação propostas para a produção do biocarvão de babaçu em menor escala

Condições de operação		Identificação da amostra produzida*
Temperatura (°C)	Tempo de residência (min)	
280	30	BioC280/30
330	20	BioC330/20
350	20	BioC350/20
400	20	BioC400/20

* Adotou-se a nomenclatura BioCX/Y para as amostras de biocarvão, onde X corresponde a temperatura de produção e Y corresponde ao tempo de residência da pirólise.

Fonte: Autora.

As condições operacionais adotadas nessa pesquisa visavam favorecer a produção e o rendimento de biocarvão, como mencionado no item 2.2. A temperatura do processo de pirólise foi controlada por meio de dois termopares tipo K cujos dados foram registrados por dois controladores N1200 da NOVUS. O primeiro termopar estava posicionado no tubo interno do reator, no sentido radial, e o segundo estava posicionado no forno. O controle da temperatura de pirólise ocorreu pelo termopar do tubo interno, o qual era ligado ao controle da taxa de aquecimento, uma vez que indicava com maior aproximação a temperatura da biomassa. Nesta etapa de produção em menor escala foi utilizado um cadinho para a inserção da biomassa no tubo do reator, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Cadinho inserido no tubo do reator para a produção dos biocarvões de babaçu em menor escala



Fonte: Autora.

Os biocarvões obtidos foram submetidos a ensaios de caracterização para a obtenção de dados preliminares como o rendimento, pH e matéria volátil. Ao final da caracterização preliminar a amostra de biocarvão BioC350/20 foi definida como a que apresentou propriedades intermediárias e desejadas entre as amostras de biocarvão produzidas (rendimento de 32,42%, pH 8,07 e matéria volátil de 29,92%). Desta forma foram adotadas a temperatura de 350°C e tempo de residência de 20 minutos para a produção do biocarvão em maior escala.

A produção em maior escala foi realizada em três bateladas e foi procedida com a inserção da biomassa diretamente no tubo do reator, conforme Figura 8. Nesta etapa o termopar interno estava imerso na biomassa, o qual foi ligado ao controle da taxa de aquecimento e era responsável pela leitura da temperatura da biomassa. A aquisição dos dados ao longo do processo de conversão termoquímica foi realizada por meio dos controladores e registrada a cada 30 segundos pelo software FieldChart.

Figura 8 - Inserção da biomassa no tubo do reator para a produção do biocarvão de babaçu em maior escala



Fonte: Autora.

O rendimento do biocarvão foi estimado por meio da pesagem da massa da biomassa inserida no reator e da respectiva massa do biocarvão obtido ao final de cada batelada. Para a batelada 1 foram utilizados aproximadamente 330g de biomassa, 250g para batelada 2 e 310g para a batelada 3. O cálculo do rendimento

de cada produção foi realizado conforme a equação 2 e o rendimento global do processo foi estimado considerando a média dos valores obtidos nas três bateladas.

$$\eta (\% \text{ b. u.}) = \frac{\text{massa do biocarvão obtido}}{\text{massa da biomassa inserida no reator}} \times 100 \quad (2)$$

A Figura 9 apresenta o biocarvão final obtido a partir da mistura dos produtos obtidos nestas três bateladas.

Figura 9 - Biocarvão produzido a partir de biomassa de babaçu via processo de pirólise lenta sob as condições de 350°C por 20 minutos



Fonte: Autora.

3.1.3 Etapa 3 – Caracterização do biocarvão

O biocarvão produzido em maior escala na Etapa 2 foi posteriormente submetido a caracterização sob aspectos gerais de biocarvões e de condicionadores de solo, visto que esta é a aplicação sugerida e avaliada neste estudo. Os ensaios de caracterização pelo qual o biocarvão foi submetido estão dispostos no Quadro 4.

3.1.4 Etapa 4 – Aplicação do biocarvão na produção vegetal

Visando a aplicação do biocarvão na semeadura de *L. sativa* foram preparados três tratamentos com diferentes proporções de areia:biocarvão. A areia utilizada nesta etapa foi previamente esterilizada em estufa a 200°C por 4h e posteriormente

submetida a análise granulométrica descrita no item 3.2.1. A Tabela 4 apresenta o percentual em volume da areia inerte e do biocarvão utilizados em cada tratamento.

Tabela 4 - Tratamentos testados na semeadura de *L. sativa*

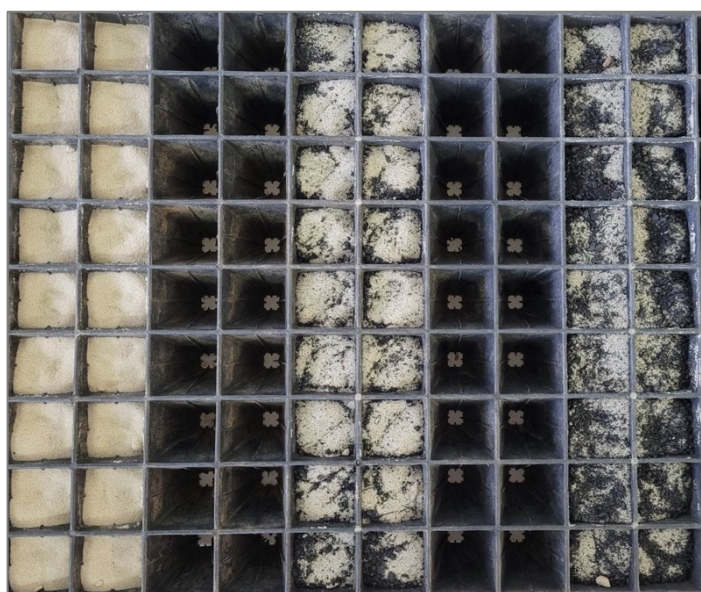
Identificação do tratamento*	Biocarvão (% volume)	Areia inerte (% volume)
Bio0%**	0	100
Bio25%	25	75
Bio50%	50	50

* Adotou-se a nomenclatura BioZ para os tratamentos, onde Z corresponde ao % v/v de biocarvão utilizado. ** Tratamento isento de biocarvão, utilizado como referência (tratamento testemunha).

Fonte: Autora.

Para a fase de semeadura foi utilizada uma bandeja para germinação e desenvolvimento das plântulas. Considerando o preparo de 18 células por tratamento e que a bandeja era composta por células de 25 cm³, os respectivos volumes de areia e biocarvão para cada tratamento foram medidos, separadamente, em provetas e, posteriormente misturados em recipiente apropriado e distribuídos nas 18 células referentes a cada tratamento. A Figura 10 apresenta a bandeja para germinação com o preparo dos três tratamentos.

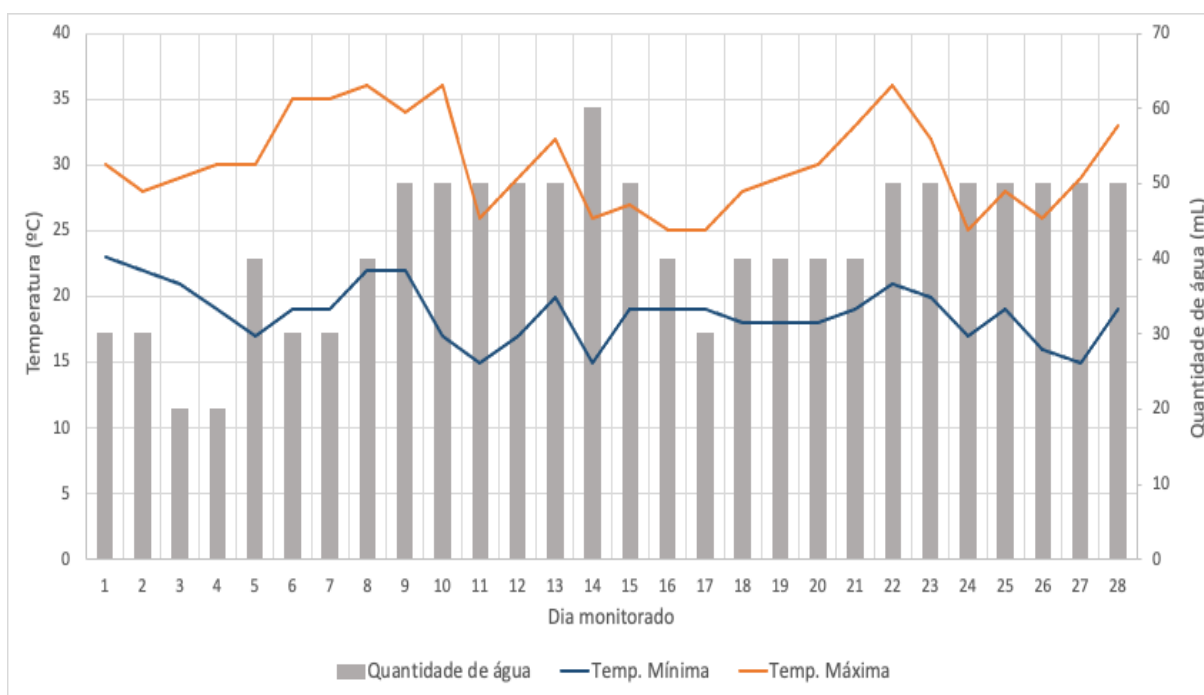
Figura 10 - Bandeja para a germinação de *L. sativa* com os tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50% (da esquerda para direita)



Fonte: Autora.

Foi realizado o plantio de 3 sementes por célula de *Lactuca sativa* L., da marca Feltrin Sementes, adquiridas em comércio local. As informações referentes ao manejo no decorrer do plantio estão dispostas na Figura 11.

Figura 11 - Condições submetidas ao plantio das sementes de *L. sativa*



Fonte: Autora.

A semeadura foi realizada no dia 1 do monitoramento para os três tratamentos e a germinação e o desenvolvimento das plântulas foram acompanhados por 28 dias, sendo que após o 19º dia de monitoramento foram retiradas as plântulas menores de cada célula, mantendo somente a maior para o acompanhamento final.

O crescimento das plântulas foi estimado com o auxílio de uma régua graduada, através da medição da altura da maior plântula por célula. A quantidade de água aplicada nas sementes apresentada da Figura 11 corresponde ao somatório dos volumes de água aplicados pela manhã e ao final da tarde, de forma a manter os tratamentos úmidos. A medição do volume foi realizada em proveta e aplicada com frasco borrifador de forma distribuída sobre as células de cada tratamento. A temperatura mínima e máxima de cada dia monitorado foi consultada através do software The Weather Channel.

3.2 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO

O Quadro 3 apresenta um resumo das análises de caracterização realizadas com base em características/propriedades importantes da biomassa e biocarvão, instruções normativas aplicadas a condicionadores de solo e conforme a literatura existente sobre o assunto.

Quadro 3 - Relação das análises de caracterização da biomassa/biocarvão e do método aplicado

Análise	Método/Instrumento	Amostra	
		Biomassa	Biocarvão
Distribuição granulométrica	Peneiras	✓	✓
Análise imediata	Teor de umidade/ CEN/TS 14774-1:2004	✓	✗
	Teor de cinzas/ CEN/TS 14775:2009	✓	✓
	Matéria volátil/ CEN/TS 15148:2005	✓	✓
	Carbono fixo/ CEMP 145:2015	✓	✓
pH	IN SDA Nº 17	✓	✓
Condutividade elétrica	IN SDA Nº 17	✓	✓
Massa específica real	Picnômetro (gás hélio)	✓	✓
Área superficial	Brunauer-Emmett-Teller (BET)	✓	✗
Poder calorífico superior (PCS)	Bomba calorimétrica	✓	✓
Fluorescência de raios X (FRX)	Espectrômetro de fluorescência de raio X	✓	✓
Capacidade de troca catiônica (CTC)	IN SDA nº 17	✗	✓

✓: Se refere a ensaios realizados; ✗: Se refere a ensaios não realizados.

Fonte: Autora.

Além dos ensaios descritos no Quadro 3 também foram realizadas a distribuição granulométrica das partículas removidas da biomassa na etapa de limpeza e o ensaio de área superficial do biocarvão. Em virtude de divergências na confirmação do resultado da área superficial do biocarvão, possivelmente em função da alta porosidade do material, o instrumento utilizado para a determinação da área superficial (BET) foi considerado inapropriado para a caracterização deste material.

Os ensaios de análise elementar (CHNS-O), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e capacidade de retenção de água (CRA) também foram considerados para este estudo, porém, não foram realizados em virtude de limitações técnicas e financeiras. Estes mesmos ensaios são citados no item 6 deste estudo (sugestão para trabalhos futuros).

3.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica é realizada por meio de um conjunto de peneiras com malhas de tamanhos variados acoplado a uma mesa vibratória. A caracterização granulométrica visa conhecer o tamanho das partículas da amostra analisada. O conjunto de peneiras, cujas malhas variam conforme a amostra, foi acoplado a uma mesa vibratória da marca Bertel e submetido ao ensaio por 20 minutos. Este ensaio foi realizado em única via para cada amostra analisada.

3.2.2 Análise Imediata

A análise imediata é bastante utilizada nas caracterizações quando se tem interesse em conhecer a quantidade de matéria volátil, cinzas, umidade e o conteúdo de carbono fixo de uma dada amostra.

3.2.2.1 Teor de umidade

O teor de umidade em base úmida é determinado de acordo com a norma CEN/TS 14774-1:2004. Para tanto, em torno de 1 g da amostra é pesado em cadinhos de porcelana previamente pesados. Os cadinhos com as amostras, assim como um cadinho de referência, são levados para estufa a 105°C até massa constante. De acordo com a norma, a variação de massa não superior a 0,2% após a primeira

pesagem evidencia constância da massa. O teor de umidade é determinado por meio da equação 3.

$$\% U_{bu} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5) + m_6}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

- m1 é a massa em gramas do cadinho vazio;
- m2 é a massa em gramas do cadinho com a amostra antes da estufa;
- m3 é a massa em gramas do cadinho com a amostra após a estufa
- m4 é a massa em gramas do cadinho de referência antes da estufa;
- m5 é a massa em gramas do cadinho de referência após a estufa;
- m6 é a massa em gramas da umidade associada à embalagem da amostra.

Visto que não é possível mensurar a umidade relacionada a embalagem da amostra, o valor de m6 será considerado zero para as amostras analisadas. O ensaio é realizado em triplicata.

3.2.2.2 Teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas em base seca é realizada com base na CEN/TS 14775:2009. Cerca de 1 g de amostra é pesada em cadinhos de porcelana previamente colocados em forno mufla a 550°C por 60 minutos. Os cadinhos com as amostras foram aquecidos a 250°C a taxa de 5°C/min e mantidos nesta temperatura por 60 minutos. Em seguida foram aquecidos a 550°C a taxa de 5°C/min e mantidos nesta temperatura por 120 minutos. O ensaio é realizado em triplicata e a equação 4 é utilizada para a determinação do teor de cinzas.

$$\% C_{Z_{bs}} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{(100 - U)} \quad (4)$$

Onde:

- m1 é a massa em gramas do cadinho vazio;
- m2 é a massa em gramas do cadinho com a amostra;
- m3 é a massa em gramas do cadinho com as cinzas;
- U é a umidade em base seca da amostra.

3.2.2.3 Matéria volátil

O matéria volátil em base seca é determinado com base na norma CEN/TS 15148:2005. Neste caso são pesadas cerca de 1g de amostra em cadinhos de porcelana com tampa, previamente calcinados em forno mufla a 900°C por 7 minutos e, resfriados. Os cadinhos com as amostras são encaminhados novamente ao forno mufla a 900°C e mantidos no forno por mais 7 minutos. Ao fim do tempo os cadinhos são resfriados e pesados novamente. O ensaio é uma adaptação da norma, visto que esta exige a imersão dos cadinhos com a amostra em forno mufla com atmosfera de nitrogênio, o que não foi possível reproduzir. O ensaio é realizado em triplicata e o teor de matéria volátil é calculado pela equação 5.

$$\% MV_{bs} = \left[\frac{100(m_2 - m_3) - U}{(m_2 - m_1)} \right] \times \left(\frac{100}{100 - U} \right) \quad (5)$$

Onde:

m_1 é a massa em gramas do cadinho vazio com tampa;

m_2 é a massa em gramas do cadinho com tampa e amostra;

m_3 é a massa em gramas do cadinho com tampa e amostra após o aquecimento;

U é a umidade do matéria em base seca.

3.2.2.4 Carbono fixo

Já o teor de carbono fixo pode ser determinado por diferença pela equação 6, a partir das médias dos demais resultados, conforme a norma CEMP 145 (ABIFA, 2015).

$$\% CF_{bs} = 100 - (Cz + MV)_{bs} \quad (6)$$

3.2.3 pH e condutividade elétrica

A análise de pH é baseada no procedimento descrito na Instrução Normativa SDA Nº 17, no qual a amostra é extraída com água (condutividade <0,2 mS/m a 25°C e pH >5,6) na proporção 1+5 (v/v). A suspensão deve ser submetida a agitação por 60 minutos, de forma a não causar ruptura da estrutura da amostra (rotação de 40rpm)

e, posteriormente, o pH da suspensão é determinado (BRASIL, 2007). Em virtude de limitações do equipamento de agitação, esta não pode ser controlada. O pH foi medido em pHmetro calibrado, sendo o equipamento da marca Digimed, modelo DM-20.

A condutividade elétrica é determinada a fim de avaliar o conteúdo de eletrólitos solúveis em água nas amostras e a técnica também é baseada no procedimento descrito na Instrução Normativa SDA Nº 17 e segue o mesmo procedimento inicial da análise de pH. Contudo, após a agitação, a suspensão é filtrada com papel filtro e mantida em repouso por 60 minutos (BRASIL, 2007). Após o tempo de repouso, a condutividade elétrica do filtrado é determinada em condutivímetro também calibrado, sendo o equipamento da marca Tecnal, modelo Tec-4MP.

As análises de pH e condutividade elétrica foram realizadas em triplicata para cada amostra analisada.

3.2.4 Massa específica real

A massa específica real das amostras é determinada pelo método de picnometria a gás Hélio. Esta análise é baseada na diferença do volume de gás Hélio contido em um picnômetro vazio comparada a um picnômetro contendo a amostra. Considerando a massa de amostra adicionada ao picnômetro o equipamento é capaz de fornecer o valor da massa específica real do sólido. Esta análise é realizada em equipamento da marca Micromeritics modelo AccuPyc II 1340, o qual realizada a repetição da leitura da amostra 10 vezes.

3.2.5 Área superficial

A determinação da área superficial das amostras é realizada pela técnica desenvolvida por Brunauer-Emmett-Teller, que se baseia na adsorção de nitrogênio na superfície do material e nos espaços vazios (poros abertos), na temperatura do nitrogênio líquido a várias pressões (BRUNAUER *et al.*, 1938). Esta análise é realizada em equipamento da marca Micromeritics modelo TriStar II Plus o qual realiza a leitura na amostra em via única.

3.2.6 Poder calorífico superior

O poder calorífico pode ser caracterizado como a quantidade de energia contida em um combustível (RAMBO *et al.*, 2015), ou como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa de um combustível (CORTEZ *et al.*, 2008). O poder calorífico superior (PCS) das amostras é determinado em equipamento calorímetro de combustão da marca IKA modelo C200. As biomassas foram submetidas a este ensaio em única via.

3.2.7 Fluorescência de raios X

Esta análise tem o objetivo de determinar os elementos químicos presentes em uma amostra por meio da incidência de raios X e foi realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Shimadzu e modelo EDX – 720. Este ensaio foi realizado em via única de forma qualitativa e os resultados são expressos em elementos majoritários (> 50%), menor quantidade (5% < x < 50%) e elementos traços (< 5%).

3.2.8 Capacidade de troca catiônica

O ensaio da capacidade de troca catiônica (CTC) foi realizado conforme descrito na Instrução Normativa SDA nº 17. A determinação da CTC é baseada na ocupação de sítios de troca do material pelos íons hidrogênio proveniente de uma solução de ácido clorídrico. Os íons hidrogênio são posteriormente deslocados com solução de acetato de cálcio em pH 7 e o ácido acético formado é titulado com solução padronizada de hidróxido de sódio. Neste método também é empregado carvão ativado para evitar perdas dos materiais orgânicos solúveis durante a lavagem, cujo volume é titulado em uma prova em branco utilizando somente o carvão (BRASIL, 2007). O ensaio foi realizado em triplicata e a CTC do biocarvão foi estimada pela média dos valores obtidos pela equação 7.

$$CTC (mmol/kg) = \frac{[(Va - Vb) \times C_{NaOH}] \times 1000}{m} \quad (7)$$

Onde:

V_a é o volume em mL da solução de NaOH gastos na titulação da amostra;

V_b é o volume em mL da solução de NaOH gastos na titulação da prova em branco;

C é a concentração em mol/L da NaOH utilizada na titulação da amostra e prova em branco;

m é a massa em gramas da amostra.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

A etapa de tratamento da biomassa promoveu a separação das partículas aderidas a uma porção da biomassa, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Biomassa de babaçu (a) bruta e (b) limpa



Fonte: Autora.

As partículas removidas no processo de limpeza representaram 0,98% da biomassa de babaçu e dentre elas foram observados resíduos de solo, pedras, insetos, entre outros, conforme a Figura 13.

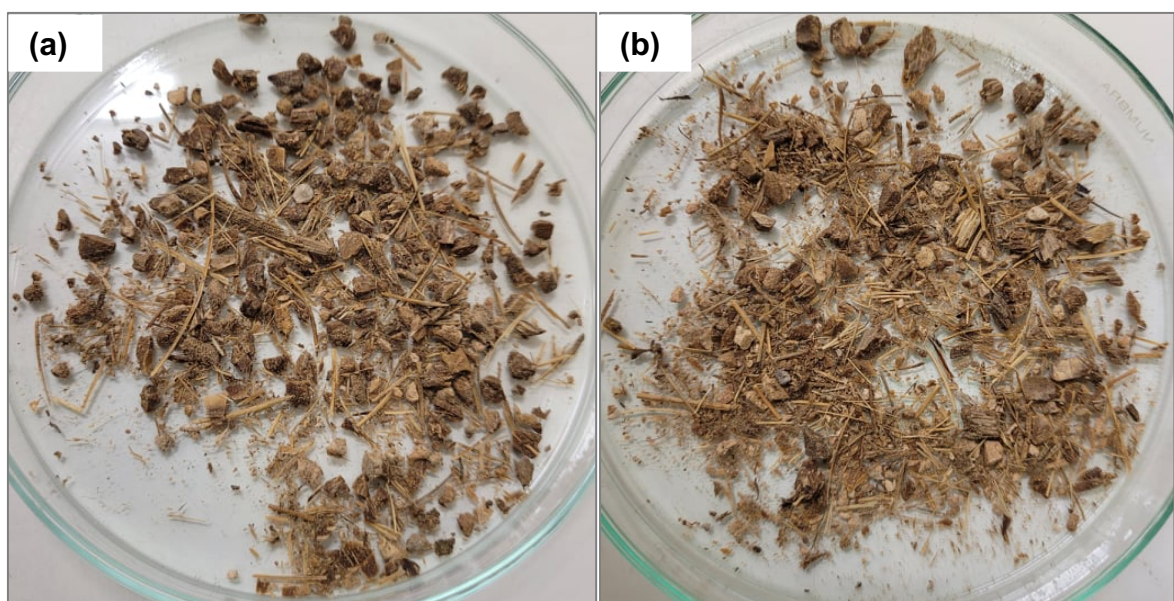
Figura 13 - Partículas removidas da biomassa no processo de limpeza



Fonte: Autora.

Após a cominuição, a biomassa limpa e a biomassa bruta apresentaram aspecto heterogêneo, com partículas de tamanhos e formas variados, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Biomassa de babaçu (a) limpa e (b) bruta

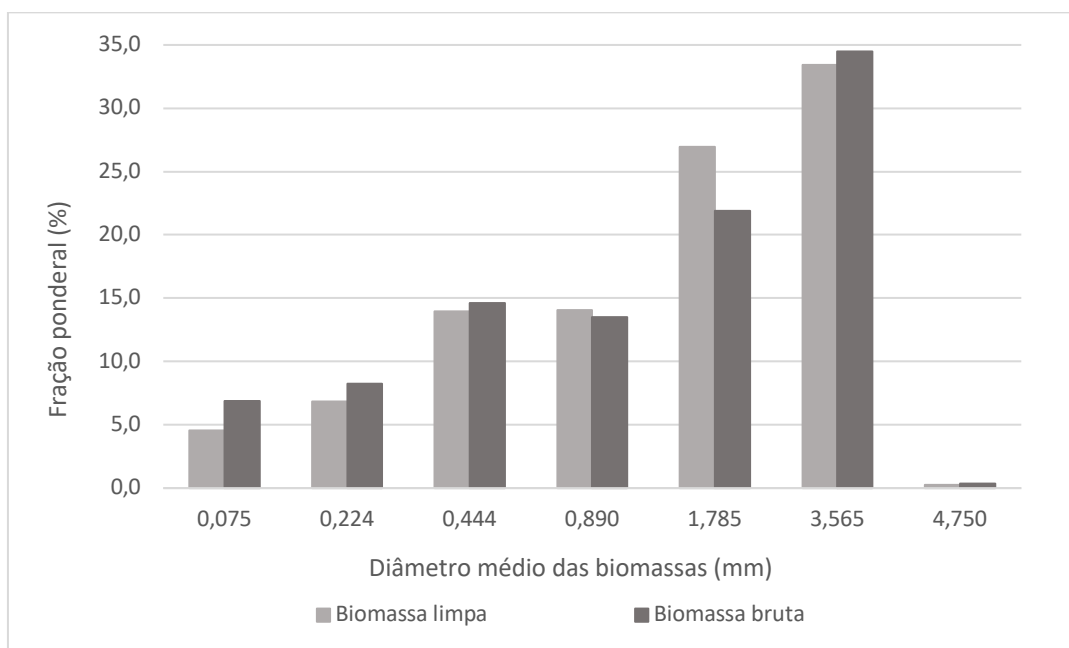


Fonte: Autora.

4.1.1 Distribuição granulométrica

A Figura 15 apresenta a fração ponderal das biomassas após cominuição retida em cada peneira *versus* o diâmetro médio das partículas.

Figura 15 - Distribuição granulométrica das biomassas de babaçu após cominuição

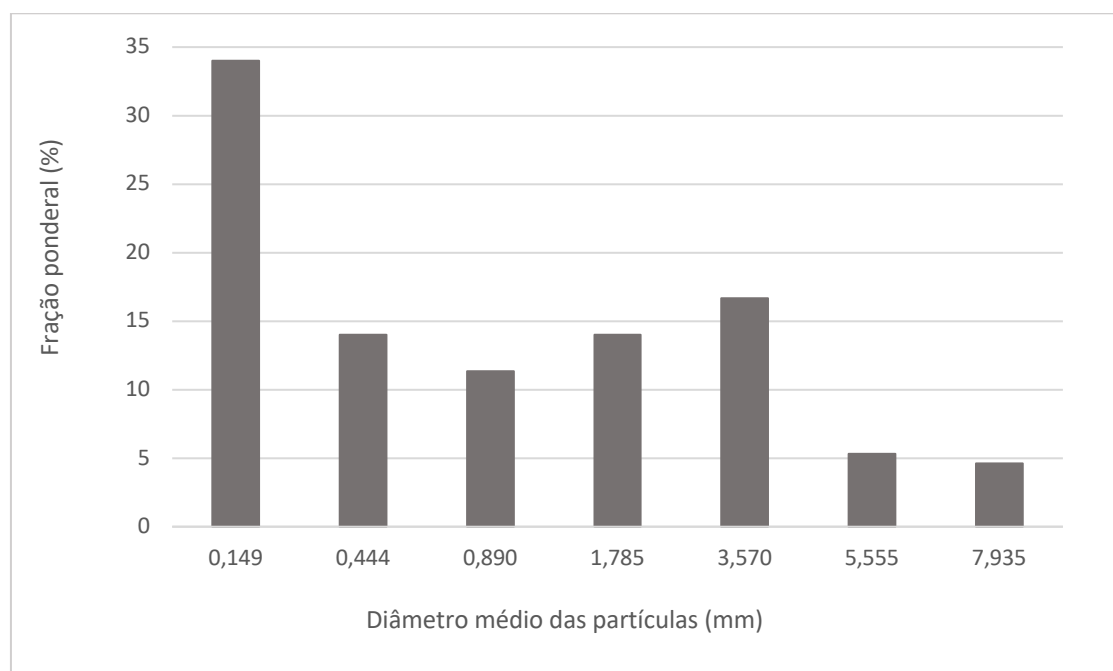


Fonte: Autora.

A maior quantidade (valores expressos em massa) de ambas as biomassas, limpa e bruta, apresentou diâmetro médio de partícula de 3,570 mm. Visto que todo o material após cominuição apresenta tamanho inferior ao que preconiza a IN SDA nº17 (tamanho de partícula inferior a 19 x 19mm), todo o material pode ser utilizado para a produção de biocarvão, aproveitando ao máximo o recurso da biomassa.

As partículas removidas da biomassa no processo de limpeza apresentaram diâmetro de partícula inferior a 9,520 mm uma vez que todo material passou pela peneira com a respectiva abertura de malha. Conforme a Figura 16, estas partículas apresentaram diâmetros médios que variaram de 0,149 mm a 7,935 mm, sendo que a maior fração representa 34,02% do total e apresenta diâmetro médio de 0,149 mm.

Figura 16 - Distribuição granulométrica das partículas removidas da biomassa no processo de limpeza



Fonte: Autora.

4.1.2 Análise imediata

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes a análise imediata da biomassa limpa e da biomassa bruta.

Tabela 5 - Análise imediata das biomassas de babaçu

Amostra	Umidade (% <i>b.u.</i>)	Cinzas (% <i>b.s.</i>)	Matéria volátil (% <i>b.s.</i>)	Carbono fixo (% <i>b.s.</i>)
Biomassa limpa	16,66 ± 0,11	1,76 ± 0,06	82,27 ± 1,62	15,65
Biomassa bruta	17,43 ± 0,35	2,04 ± 0,14	82,48 ± 0,93	16,38

Fonte: Autora.

4.1.2.1 Teor de umidade

O teor de umidade apresentado pelas biomassas de babaçu limpa e bruta foi de 16,66% e 17,43%, respectivamente, e está de acordo com o intervalo observado no estudo compreendendo 86 variedades de biomassa realizado por Vassilev *et al.* (2010), o qual encontraram teores de umidade que variaram 4,4% a 47,9% para

biomassas herbáceas e agrícolas. Estes resultados também estão próximos do estudo de Protásio *et al.* (2017), que obteve 14,05% de umidade em casca de coco de babaçu. Já Rambo *et al.* (2015) e Salgado *et al.* (2018), encontraram valores pouco inferiores de umidade. Rambo *et al.* (2015) encontraram 8,32% de umidade para endocarpo e 8,30% para mesocarpo de babaçu e, Salgado *et al.* (2018) encontraram teor de umidade de 8,60% para endocarpo de babaçu.

O teor de umidade pode ser definido como a massa de água contida na biomassa e pode variar bastante em decorrência de sua espécie (RENDEIRO *et al.*, 2008). O teor de umidade elevado tem efeito adverso no processo de pirólise e as biomassas analisadas apresentaram resultados próximos a faixa considerada adequada por Jahirul *et al.* (2012), entre 5% e 15% de umidade (em massa).

A umidade na biomassa é uma solução aquosa mineralizada e quando evaporação após a colheita ou durante a secagem da biomassa, pode resultar em precipitação mineral de espécies catiônicas, aniônicas ou não carregadas (VASSILEV *et al.*, 2010), contribuindo para a presença dessas espécies químicas nas demais análises de caracterização da biomassa.

4.1.2.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas obtido para as biomassas foi de 1,76% para a biomassa limpa e 2,04% para biomassa bruta, estando de acordo com o estudo de Vassilev *et al.* (2010) que avaliou o teor de cinzas das 86 espécies de biomassas e encontrou resultados entre 0,9% e 20,1% de cinzas.

Alguns estudos realizados com biomassa de babaçu obtiveram 2% de matéria inorgânica (cinzas) na casca de coco de babaçu por análise termogravimétrica e 1,73% por análise química (PROTÁSIO *et al.*, 2017). Salgado *et al.* (2018) avaliaram endocarpo de babaçu e encontraram 1,98% de cinzas. Já Rambo *et al.* (2015) encontraram 8,22% e 6,06% no endocarpo e mesocarpo de babaçu, respectivamente.

Segundo Vassilev *et al.* (2010), as cinzas correspondem ao resíduo inorgânico resultante de oxidação ou da completa combustão da biomassa, e altos rendimentos de cinzas de alguns combustíveis de madeira, por exemplo, são indicativos de grandes quantidades de impurezas minerais, metálicas e outros contaminantes. Logo, há concordância entre o observado por Vassilev *et al.* (2010) e o presente estudo que

obteve maior teor de cinzas na biomassa com impurezas em relação a biomassa limpa.

Assim como o teor de umidade, o teor de cinzas também pode afetar negativamente o poder calorífico, afetando negativamente a combustão da biomassa. As cinzas também podem ocasionar problemas devido a sua fusão e acumulação, como a formação de canais preferenciais de escoamento e o entupimento das grelhas no reator (RENDEIRO *et al.*, 2008).

4.1.2.3 Matéria volátil

Para a biomassa limpa foi obtido 82,27% de matéria volátil, enquanto a biomassa bruta apresentou 82,48%. Os resultados obtidos estão dentro do intervalo de 59,3% a 85,5% encontrado por Vassilev *et al.* (2010), em biomassa herbáceas e agrícolas e próximos dos valores encontrados por Rambo *et al.* (2015), 59,41% e 79,12%, em endocarpo e mesocarpo de babaçu, respectivamente. Salgado *et al.* (2018) encontraram teor de voláteis de 63,39%, pouco abaixo do presente estudo, no entanto avaliaram somente endocarpo de coco babaçu. O teor de matéria volátil está relacionado aos compostos químicos menos estáveis presentes na biomassa e que são liberados (volatilizam) no processo de pirólise.

4.1.2.4 Carbono fixo

O teor de carbono fixo encontrado foi de 15,65% e 16,38% para a biomassa limpa e bruta, respectivamente. Estes resultados também estão de acordo com o levantamento realizado por Vassilev *et al.* (2010), que obteve teores de carbono fixo de 12,4% a 37,9% em biomassa herbáceas e agrícolas. Rambo *et al.* (2015) encontraram teores de carbono fixo semelhantes, 14,80% em mesocarpo de babaçu e para endocarpo encontraram valores mais elevados, 32,36% de carbono fixo. Salgado *et al.* (2018) encontraram teor de carbono mais elevado, em torno de 26,03%, entretanto utilizaram somente o endocarpo do coco babaçu como matéria-prima do referido estudo.

O carbono fixo é a porção da biomassa que é convertida em biocarvão após a pirólise, por isso, este resultado é de suma importância para a avaliação da qualidade de biomassa.

A partir destes dois últimos parâmetros é possível obter a relação de matéria volátil/carbono fixo das biomassas analisadas. A biomassa limpa apresentou relação de 5,26 enquanto a biomassa bruta apresentou relação de 5,04. Os resultados encontrados estão de acordo com Vassilev *et al.* (2010), que encontraram valores maiores do que 3,5 para a relação matéria volátil/carbono fixo de diferentes biomassas. Já Protásio *et al.* (2017), afirmam que esta relação para a casca da amêndoa de babaçu é de 3,95, pouco abaixo dos valores encontrados no presente estudo.

4.1.3 pH e condutividade elétrica

Os valores de pH e condutividade elétrica (CE) da biomassa limpa e da biomassa bruta pode ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de pH e CE das biomassas de babaçu

Amostra	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Biomassa limpa	6,29 \pm 0,04	445,0 \pm 2,6
Biomassa bruta	6,47 \pm 0,03	436,6 \pm 2,2

Fonte: Autora.

Os valores de pH encontrados para a biomassa limpa e bruta foi de 6,29 e 6,47, respectivamente, caracterizando a biomassa de babaçu como levemente ácida. Segundo o estudo de Cavalcante *et al.* (2021), substratos contendo 100% de resíduo de biomassa decomposta de babaçu apresentam pH de 5,32 ou seja, de caráter ácido.

Os valores de condutividade elétrica obtidos foram de 445,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 436,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a biomassa limpa e biomassa bruta, respectivamente. Já Cavalcante *et al.* (2021), obtiveram para substrato de 100% de resíduos de babaçu condutividade elétrica de 4340,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

As diferenças entre os valores de pH e condutividade elétrica da literatura e do presente estudo podem ser decorrentes de vários fatores como diferentes velocidades de agitação da suspensão, características do fruto, maneira de cultivo, entre outros.

4.1.4 Massa específica real e área superficial

Os resultados obtidos nos ensaios de massa específica real (ME) e área superficial (BET) da biomassa limpa e da biomassa bruta se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da massa específica real e área superficial das biomassas de babaçu

Amostra	ME (g/cm³)	BET (m²/g)
Biomassa limpa	1,3950 ± 0,0008	0,3422 ± 0,0015
Biomassa bruta	1,3989 ± 0,0009	0,5431 ± 0,0081

Fonte: Autora.

A biomassa limpa apresentou massa específica de 1,3950 g/cm³ e a biomassa bruta apresentou 1,3989 g/cm³. De acordo com Rendeiro *et al.* (2008), a massa específica real de um sólido permite conhecer o real volume ocupado por este sólido, desconsiderando a sua porosidade. A maior massa específica da segunda biomassa pode estar associada justamente pela presença das partículas aderidas à biomassa que apresentam baixos diâmetros de partícula e podem ocupar espaços vazios entre a biomassa.

Em relação a área superficial das biomassas observa-se que a biomassa bruta apresentou área superficial superior a área superficial da biomassa limpa, possivelmente em decorrência da presença destas partículas que, devido ao menor diâmetro, proporcionam maior área de contato.

4.1.5 Poder calorífico superior

Os resultados obtidos nos ensaios de poder calorífico superior da biomassa limpa e da biomassa bruta se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado do poder calorífico superior das biomassas de babaçu

Amostra	PCS (MJ/kg)
Biomassa limpa	18,326
Biomassa bruta	18,674

Fonte: Autora.

O poder calorífico superior obtido no presente estudo foi de 18,326 MJ/kg para a biomassa limpa e 18,674 MJ/kg para a biomassa bruta. Ambos os resultados são próximos aos obtidos por Rambo *et al.* (2015) que encontraram 19,07 MJ/kg e 19,03 MJ/kg para mesocarpo e endocarpo de resíduos de babaçu, respectivamente.

Os resultados de PCS encontrados para a biomassa de babaçu também são semelhantes aos resultados encontrados para biomassas amazônicas como a Andiroba (19,76 MJ/kg), Bambu (18,98 MJ/kg), Cedro (20,21 MJ/kg) (RENDEIRO *et al.*, 2008). Já a casca de arroz, avaliada por Vieira (2018), apresentou PCS médio de 15,77 MJ/kg, pouco abaixo do PCS encontrado para a biomassa de babaçu. Rambo *et al.* (2015) obtiveram 18,71 MJ/kg para casca de coco, entre 17,2 e 17,8 MJ/kg para epicarpo de castanha-do-pará, pequi e agave e 12,5 MJ/kg para mesocarpo de castanha-do-brasil.

4.1.6 Fluorescência de raios X

Os resultados da análise de fluorescência de raios X realizadas com as biomassas limpa e bruta se encontram na Tabela 9.

Tabela 9 – Elementos químicos encontrados na análise de fluorescência de raios X das biomassas de babaçu

Amostra	Elementos majoritários (> 50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos traços (< 5%)
Biomassa limpa	K	Si, Ca, Fe	S, P, Cu
Biomassa bruta	-	K, Si, Ca, Fe	S, P, Cu, Al

Fonte: Autora.

Para a biomassa limpa foi detectado potássio (K) como elemento majoritário, ou seja, a composição química inorgânica da biomassa limpa é composta por mais de 50% de K. Já para a biomassa bruta este foi identificado como elemento em menor quantidade, apresentando valor entre 5% e 50%. Para ambas as biomassas os elementos silício (Si), cálcio (Ca) e Fe (ferro) apresentaram também valor entre 5% e 50%. Os elementos presentes abaixo de 5% em relação a composição inorgânica, a nível de traços, em ambas as amostras foram o enxofre (S), fósforo (P) e cobre (Cu), além do elemento alumínio (Al) para a biomassa bruta.

De acordo com Vassilev *et al.* (2010), os elementos comumente presentes na biomassa são C, O, H, N, Ca e K, em ordem decrescente de abundância, enquanto os elementos menores geralmente são Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl e Na. Além destes, ainda há os oligoelementos como Mn e Ti, entre outros. Contudo, devido às variedades de biomassas, há diversos casos em que esta ordem de elementos é diferenciada. Em geral, os elementos C, O, H, N e S são formadores orgânicos e os demais onze elementos citados são formadores inorgânicos. Contudo, alguns elementos formadores orgânicos podem ocorrer na matéria inorgânica e vice-versa, como é o caso dos dezesseis elementos acima que podem contribuir para a formação das cinzas na biomassa.

4.2 PRODUÇÃO DO BIOCARVÃO

4.2.1 Produção em menor escala – Caracterização preliminar

Os biocarvões produzidos nas quatro condições de operação inicialmente propostas apresentaram características variadas, conforme apresentado na Tabela 10.

Observa-se (Tabela 10) que o rendimento da produção do biocarvão de babaçu diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise. Ainda que o BioC280/30 tenha sido produzido em tempo de residência de 30 minutos, se comparados somente os biocarvões produzidos com tempo de residência de 20 minutos (BioC330/20, BioC350/20 e BioC400/20), a relação da temperatura de pirólise no rendimento do biocarvão se mantém inversa. Os resultados de rendimento deste estudo estão de acordo com o levantamento realizado por Luo *et al.* (2015), que avaliaram biocarvões produzidos a partir de biomassas florestais e agrícolas. Em geral, observaram que o aumento da temperatura de pirólise reduziu significativamente o rendimento dos biocarvões, enquanto o tempo de aquecimento apresentou pouco efeito sobre os rendimentos.

Outro estudo que observou a relação inversa entre rendimento do biocarvão e temperatura de produção foi o de Zhao *et al.* (2013). Avaliando os produtos obtidos a partir de palha de trigo encontraram rendimento de 99,3% quando o estudo foi procedido a 200°C, rendimento de 52,5% foi obtido para o biocarvão produzido a 350°C e para o biocarvão produzido a 500°C obtiveram rendimento de 29,8%.

Tabela 10 – Resultados da caracterização preliminar dos biocarvões de babaçu

Parâmetro	Amostra de biocarvão			
	BioC280/30	BioC330/20	BioC350/20	BioC400/20
Temperatura (°C)	280	330	350	400
Tempo (min)	30	20	20	20
Rendimento (%)	47,58	36,74	32,42	31,14
pH	5,33 ± 0,20	5,55 ± 0,13	8,07 ± 0,54	9,72 ± 0,34
Matéria volátil (%)	47,58 ± 1,62	34,86 ± 0,14	29,92 ± 0,47	23,39 ± 0,18

Fonte: Autora.

Em seu estudo Vilas-Boas *et al.* (2021) também observaram maior rendimento de biocarvão em função da diminuição da temperatura e taxa de aquecimento. Tal característica é atribuída ao aumento da decomposição termoquímica da biomassa com o aumento da temperatura e taxa de aquecimento, resultando em maior liberação de massa de compostos para a fase gasosa no processo de pirólise, resultando em menor fração do produto sólido, o biocarvão. Al-Wabel *et al.* (2013), relacionam o decréscimo no rendimento do biocarvão, principalmente em decorrência da destruição de compostos como a celulose e a hemicelulose, e devido à combustão de materiais orgânicos com o aumento da temperatura de pirólise.

Outra propriedade avaliada em função da temperatura de pirólise foi o pH do biocarvão. Conforme a Tabela 10 o aumento da temperatura de pirólise resultou em biocarvão com maior pH o que é devido a eliminação de parte dos grupos funcionais inorgânicos provenientes da biomassa precursora e da formação de cinzas que são de natureza básica (MATOS *et al.*, 2021).

Para Rendeiro *et al.* (2008) o processo que se desenvolve juntamente na fase endotérmica da pirólise, entre 250°C e 300°C é chamado de torrefação. A torrefação permite obter um produto com reduzido tempo de processamento, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, resultando em um material intermediário entre a biomassa e o biocarvão, retendo voláteis de maior poder calorífico no próprio produto. Desta forma, considerando o teor de voláteis e o baixo pH, foi descartada a produção em maior escala de biocarvão nas mesmas condições do BioC280/30 e BioC330/20.

Para Mukherjee *et al.* (2011), que avaliaram biocarvões produzidos a 250°C, 400°C e 650°C, além de ser dependente das espécies de biomassas precursoras, o pH dos biocarvões aumenta com o aumento da temperatura de produção. O estudo de Luo *et al.* (2015) também avaliaram o pH de biocarvão produzido a partir de biomassas florestais e agrícolas e observou que este variou por matéria-prima e temperatura de produção, tendendo a aumentar com o aumento da temperatura de pirólise.

Esta relação entre o pH do biocarvão e a temperatura de pirólise também foi observada por Zhao *et al.* (2013). Para biocarvão de palha de trigo produzido a 200°C obtiveram pH de 5,43, para biocarvão produzido a 350°C obtiveram pH de 8,69 e para biocarvão produzido a 500°C obtiveram pH de 10,2. Vilas-Boas *et al.* (2021) observaram que, para a mesma taxa de aquecimento, o pH do biocarvão produzido a

partir de lodo biológico aumentou com o aumento da temperatura de pirólise, podendo ser devido ao aumento do teor de elementos inorgânicos e à decomposição da matriz orgânica.

A diminuição do pH seguido de aumento, característico de uma tendência parabólica, também foi observada por Mukherjee *et al.* (2011), com o aumento da temperatura, entretanto em condições de atmosfera limitada de oxigênio e não sob atmosfera de N₂, como é o caso da presente pesquisa.

Em relação ao conteúdo de matéria volátil Zhao *et al.* (2013) concluíram que quanto maior a temperatura de pirólise, menor será o conteúdo de matéria volátil do biocarvão. Em seu estudo obtiveram 70,2% de matéria volátil para biocarvão de palha de trigo produzido a 200°C, 31,3% de voláteis para biocarvão produzido a 350°C e 17,6% de voláteis para biocarvão produzido a 500°C.

Luo *et al.* (2015) e Mukherjee *et al.* (2011) também observaram que o conteúdo de voláteis reduziu consideravelmente com o aumento da temperatura de pirólise, indicando perda progressiva de componentes mais voláteis.

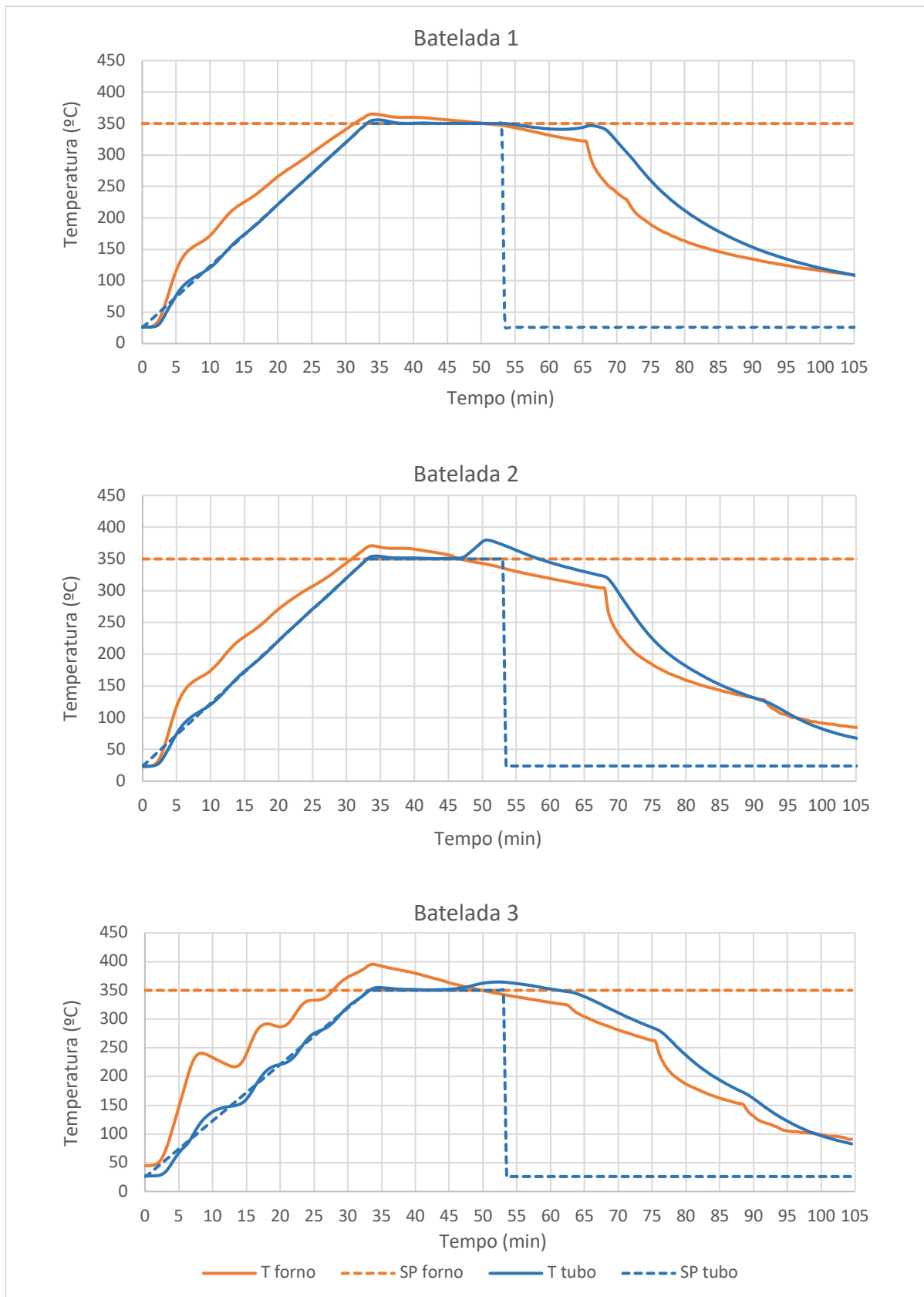
De acordo com Vilas-Boas *et al.* (2021), a influência da temperatura de pirólise no conteúdo de matéria volátil está relacionada ao aumento da decomposição termoquímica da biomassa induzido pelo aumento da temperatura e da taxa de aquecimento da pirólise. Dessa forma, há maior liberação de compostos orgânicos para a fase gasosa e menor quantidade de matéria volátil no biocarvão produzido.

Dessa forma, avaliando os resultados preliminares optou-se em produzir o biocarvão em maior escala na condição de operação do BioC350/20, ou seja, temperatura de 350°C e 20 minutos de tempo de residência. Excluindo-se as condições que produziram biocarvões com pHs ácidos e dentre as condições que resultaram em pHs alcalinos (influenciam positivamente na CTC do material), ainda adotou-se a condição com o maior rendimento e menor temperatura de processo (menor gasto energético).

4.2.2 Produção em maior escala

A partir da aquisição dos dados realizadas pelo software FieldChart foi possível construir os gráficos das temperaturas controladas pelo software e o tempo do processo de pirólise de cada batelada de produção do biocarvão, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Gráfico Temperatura versus Tempo de cada batelada de produção do biocarvão de babaçu



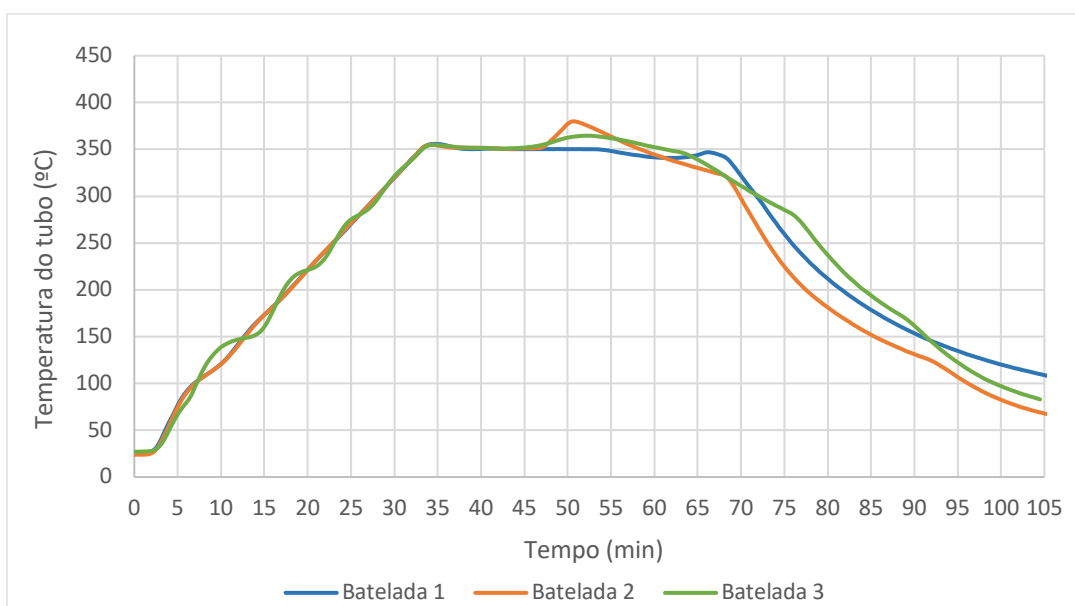
Fonte: Autora.

A Figura 17 permite visualizar a variação do set point da temperatura do tubo do reator (SP tubo) ao longo do processo de pirólise, considerando a taxa de aquecimento de 10°C/min para as três bateladas de produção do biocarvão. A temperatura do forno também pode ser vista para as três bateladas, sendo definida como 350°C do início ao fim da corrida, para proporcionar o aquecimento do tubo do reator e como forma de contribuir para o controle da temperatura do tubo.

A Figura 17 também apresenta a temperatura real do tubo do reator (T tubo) e a temperatura real do forno (T forno) ao longo do processo, apresentando algumas variações em relação aos valores definidos como set point.

A sobreposição das curvas de temperatura do tubo e do forno em função do tempo de pirólise permitiu a análise mais detalhada das bateladas, conforme Figura 18 e Figura 19.

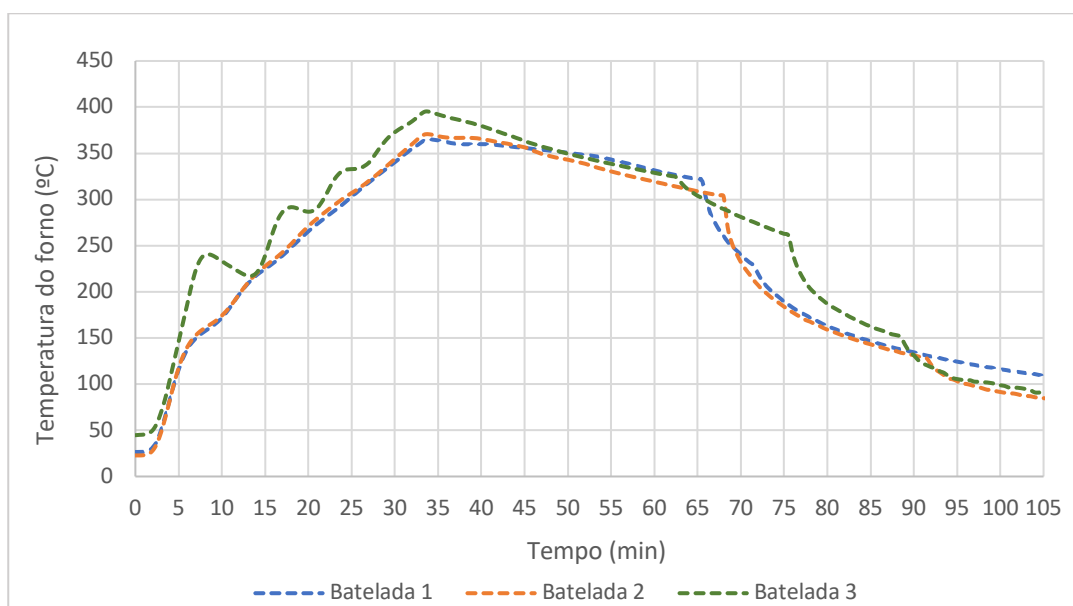
Figura 18 - Gráfico Temperatura do Tubo *versus* Tempo das bateladas de produção do biocarvão de babaçu



Fonte: Autora.

Observa-se na Figura 18 que as bateladas 1 e 2 apresentaram comportamento semelhante em relação a T tubo durante a fase de aquecimento, enquanto a batelada 3 apresentou comportamento distinto, com oscilação da temperatura durante o aquecimento.

Figura 19 - Gráfico Temperatura do Forno *versus* Tempo das bateladas de produção do biocarvão de babaçu



Fonte: Autora.

A característica oscilatória observada na T tubo (Figura 18) também foi observada na T forno da batelada 3, conforme a Figura 19. Em relação a temperatura durante o tempo de residência também se observa comportamento distinto entre as três bateladas.

A variação do perfil da curva de aquecimento na batelada 3 em relação ao perfil teórico (SP) também foi observada em quase todos os experimentos realizados por Kappler (2021). De acordo com seus estudos, a taxa de aquecimento exerce maior influência no perfil de temperatura da curva de aquecimento, diferenciando-se do perfil programado à medida que a taxa de aquecimento é elevada. Ainda de acordo com Kappler (2021), esta variação do perfil pode ser justificada pela baixa condutividade térmica da biomassa, resultando em lenta transferência de energia térmica da superfície do reator até o controlador situado no eixo do reator. A distribuição da biomassa no reator, o tamanho das partículas e a vazão de gás de arraste também podem exercer influência neste perfil de aquecimento. Considerando que a taxa de aquecimento e a vazão de gás de arraste foram os mesmos nas três bateladas e os tamanhos das partículas de biomassa eram semelhantes, pode-se atribuir estas diferenças nos perfis de temperatura do presente estudo devido à distribuição da biomassa ao longo do controlador e reator. As massas, ainda que diferentes, não

apresentaram influência direta uma vez que a batelada 1, com a maior massa de biomassa, apresentou perfil de temperatura de aquecimento próximo ao perfil teórico.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCARVÃO

Para a obtenção do biocarvão final foram misturados os biocarvões obtidos nas três bateladas de produção. Dessa forma, uma única amostra de biocarvão de babaçu foi analisada e os resultados estão descritos a seguir.

4.3.1 Rendimento

Visto que o biocarvão final é uma mistura dos biocarvões produzidos nas três bateladas, o rendimento médio do biocarvão de babaçu é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Rendimento do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos

Amostra	Rendimento (%)
Biocarvão de babaçu	33,26 ± 0,97

Fonte: Autora.

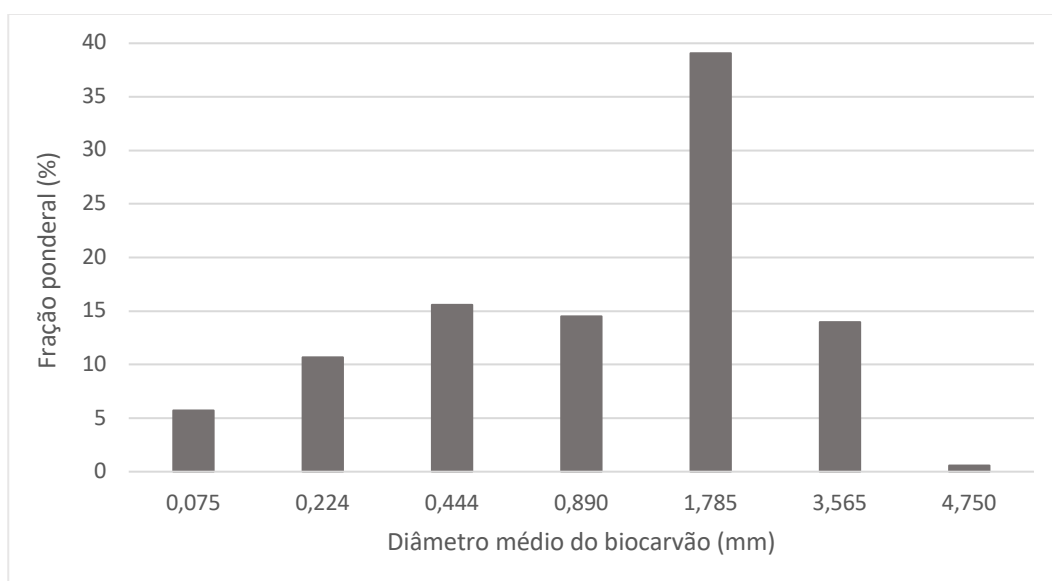
O biocarvão de babaçu apresentou rendimento médio de 33,26%, semelhante ao rendimento do biocarvão produzido previamente nas mesmas condições (32,42%). Este resultado reforça que, embora o perfil de temperatura das três bateladas de produção do biocarvão tenha apresentado diferenças, o rendimento das bateladas foi semelhante considerando o desvio padrão inferior a 1%.

Na literatura são encontrados rendimentos de outros biocarvões para fins comparativos. Os biocarvões de serragem de pinheiro e de palha de milho, por exemplo, alcançaram rendimentos próximos a 40% e o biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar atingiu rendimento entre 30% e 40% (LUO *et al.*, 2015). Já para biocarvão de palha de trigo produzido a 350°C, mesma temperatura de produção do biocarvão de babaçu, foi encontrado rendimento de 52,5%.

4.3.2 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica do biocarvão de babaçu está apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Distribuição granulométrica do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos



Fonte: Autora.

Observa-se que a maior fração do biocarvão (39,07%) apresenta diâmetro médio de partícula de 1,785 mm, inferior ao da biomassa precursora que apresentou maior fração de partículas (34,50%) com diâmetro médio de 3,570 mm.

A granulometria do biocarvão é um parâmetro relevante visto que afeta a granulometria do solo em que será aplicado e esta, em geral, determina as propriedades físicas e químicas (retenção e mobilidade de água, massa específica, porosidade, aeração, capacidade de troca catiônica, entre outras), de interesse agrônomo que influenciam na fertilidade deste solo (MAPA, 2012).

4.3.3 Análise imediata

A Tabela 12 apresenta os resultados referentes aos parâmetros que compõem a análise imediata do biocarvão.

Tabela 12 - Análise imediata do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos

Amostra	Cinzas (% b.s.)	Matéria volátil (% b.s.)	Carbono fixo (% b.s.)
Biocarvão de babaçu	4,71 ± 0,56	29,20 ± 0,53	66,09

Fonte: Autora.

4.3.3.1 Cinzas

O biocarvão de babaçu apresentou 4,71% de cinzas, resultado superior ao teor de cinzas da biomassa bruta (2,04%), precursora do biocarvão.

O estudo de Aguiar *et al.* (2020) avaliou o teor de cinzas de biocarvão produzido por pirólise a temperatura de 500°C a partir do ramo central da folha de babaçu e obteve 7,79% de cinzas. No estudo de Mukherjee *et al.* (2011), o teor de cinzas dos biocarvões produzidos a temperatura de 400°C foi de 13,2% para gramínea (família Poaceae), 2,6% para carvalho e 0,5% para pinho. Conforme os pesquisadores, o tipo de biomassa apresentou efeito significativo no teor de cinzas dos biocarvões e, possivelmente, o maior teor de cinzas para o biocarvão de gramínea é resultado do maior teor de K, Ca e Mg da biomassa de origem e do biocarvão.

O teor de cinzas encontrado para o biocarvão de babaçu foi coerente com estudos anteriores que demonstram que este é variável de acordo com a matéria-prima e a temperatura de produção do biocarvão. Vilas-Boas *et al.* (2021), relaciona o aumento do teor de cinzas no biocarvão uma vez que a decomposição térmica da fração orgânica da biomassa durante a pirólise causa a conversão de compostos para a fase gasosa, resultando em biocarvão enriquecido com os elementos inorgânicos, ou seja, as cinzas.

4.3.3.2 Matéria volátil

O biocarvão de babaçu produzido em maior escala apresentou 29,20% de matéria volátil, próximo ao obtido na caracterização preliminar do biocarvão produzido em menor escala nas mesmas condições de processo (29,92%).

Comparativamente ao conteúdo de matéria volátil encontrado para a biomassa bruta (82,48%), era esperado o menor conteúdo de voláteis para o biocarvão sabendo

que o processo de pirólise provoca a degradação térmica de compostos menos estáveis e resulta em considerável perda de massa na forma de voláteis (JAHIRUL *et al.*, 2012).

O conteúdo de matéria volátil obtido para o biocarvão de babaçu é inferior ao encontrado por Mukherjee *et al.* (2011) para biocarvão de carvalho (51,9%), biocarvão de pinho (58,6%) e para biocarvão de gramínea (51,4 %), todos produzidos a 400°C. Já o estudo de Zhao *et al.* (2013) avaliou diferentes biocarvões e obtiveram 18,9% de voláteis para biocarvão de gramínea, 17,6% para biocarvão de palha de trigo e 16,0% para biocarvão de casca de amendoim, todos produzidos a 500°C. Para biocarvão de palha de trigo produzido a 350°C obtiveram 31,3% de conteúdo volátil, resultado próximo ao encontrado neste estudo para o biocarvão de babaçu produzido na mesma temperatura.

O teor de voláteis encontrado por Aguiar *et al.* (2020) para o biocarvão produzido a 500°C a partir do ramo central da folha de babaçu foi de 13,56%, resultado inferior ao do presente estudo. Assim, pode-se observar que o teor de matéria volátil apresenta grandes variações em relação a temperatura de produção e da biomassa precursora do biocarvão.

4.3.3.3 Carbono fixo

O biocarvão de babaçu apresentou 66,09% de carbono fixo, resultado superior ao apresentado pela biomassa precursora (16,38%). Este aumento era esperado visto que o processo de pirólise tem por objetivo a conversão de biomassa em biocarvão, uma matriz rígida de carbono amorfo (JAHIRUL *et al.*, 2012).

De acordo com Veiga *et al.* (2017), o teor de carbono fixo é uma informação relacionada a qualidade da biomassa, visto que é a porção mais estável e que permanece no biocarvão após a pirólise. O teor de carbono está inversamente relacionado ao teor de matéria volátil e teor de cinzas e, juntamente com a lignina, é um componente mais importantes para a estabilidade térmica do biocarvão, refletindo na permanência deste no solo.

O estudo de Aguiar *et al.* (2020) encontrou 78,65% de carbono fixo para o biocarvão produzido a partir do ramo central da folha do babaçu, a temperatura de pirólise de 500°C. Em relação a outras matérias-primas o estudo Zhao *et al.* (2013) obteve teor de carbono fixo de 59,2% para biocarvão de gramíneas, 63,7% para

biocarvão de palha de trigo e 72,9% para biocarvão de casca de amendoim, todos produzidos a 500°C. Já para biocarvão de palha de trigo produzido a 350°C obtiveram teor de carbono fixo de 53,2%, resultado abaixo do encontrado para o biocarvão de babaçu produzido na mesma temperatura.

4.3.4 pH e condutividade elétrica

Os valores de pH e condutividade elétrica do biocarvão de babaçu estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados de pH e CE do biocarvão de babaçu obtido via processo de pirólise lenta sob condições de 350°C por 20 minutos

Amostra	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)
Biocarvão de babaçu	8,98 \pm 0,47	138,1 \pm 13,6

Fonte: Autora.

O biocarvão de babaçu produzido em maior escala apresentou pH de 8,98, levemente básico. Este resultado está próximo ao resultado do biocarvão produzido nas mesmas condições, mas em menor escala (8,07). A diferença observada entre estes resultados pode estar associada ao procedimento de extração da amostra com água, visto que a velocidade de agitação da suspensão não foi controlada como requer a IN SDA nº 17 em decorrência de limitações técnicas.

No estudo de Aguiar *et al.* (2020), os autores avaliaram o pH de biocarvão produzido a temperatura de 500°C cujo material precursor era o ramo central da folha do babaçu e obtiveram resultado igual a 9,62, de caráter básico. O pH de diferentes biocarvões também foi avaliado no estudo de Zhao *et al.* (2013), o qual obteve pH de 10,2 para biocarvão de gramínea, pH de 10,5 para biocarvão de casca de amendoim e 10,2 para biocarvão de palha de trigo, produzidos a 500°C. Já para biocarvão de palha de trigo produzido a 350°C obtiveram pH igual a 8,69, resultado bem próximo ao encontrado para o biocarvão de babaçu produzido na mesma temperatura.

O pH do biocarvão é um parâmetro relevante para fins agrícolas, uma vez que pode influenciar no desenvolvimento das plantas, determinando a forma química como os nutrientes se apresentam no solo e interferindo na sua disponibilidade às plantas, logo, este parâmetro deve ser considerado um condicionante quando se pretende

definir as condições de operação do processo de pirólise. Vale ressaltar que, há casos em que a absorção é dificultada em virtude do pH e, em outros casos, pode haver transformação de nutrientes em compostos tóxicos ou perda por lixiviação (MOLINA JR, 2017).

Em geral o pH dos biocarvões varia de neutro a alcalino para atuarem como neutralizador da acidez dos solos nos quais são aplicados, aumentando a produtividade e a maior disponibilidade de nutrientes. Os resultados de pH estão relacionados aos teores de cinzas dos biocarvões visto que, após a pirólise, o biocarvão torna-se mais básico em virtude da eliminação de parte dos grupos funcionais inorgânicos provenientes da biomassa original (óxidos, sulfatos ou carbonatos) e da formação das cinzas que são de natureza básica, resultando em biocarvão com pH mais básico (MATOS *et al.*, 2021).

Conforme Shackley *et al.* (2012), o pH do biocarvão também tem impacto na sua capacidade de troca catiônica, sendo que valores altos de pH elevam a CTC, o que sugere que o biocarvão de babaçu favorece a CTC do solo.

A condutividade elétrica do biocarvão de babaçu produzido a 350°C foi de 138,1 μ S/cm. A condutividade elétrica pode ser definida como a capacidade de um material de conduzir corrente elétrica e está relacionada a concentração de sais dissolvidos na água. Biocarvões produzidos a partir de matéria-prima lenhosa ou de resíduos agrícolas apresentam condutividade elétrica baixa a moderada, enquanto biocarvão produzido a partir de resíduos animais apresenta maior condutividade elétrica. A maior condutividade elétrica do biocarvão de resíduos animais foi atribuída às altas concentrações de sais decorrentes dos íons Na⁺, K⁺ e Mg²⁺, além da presença de (SO₄)²⁻ e (PO₄)³⁻, todos considerados essenciais para o crescimento de culturas (LAGHARI *et al.*, 2016).

Na literatura são encontradas condutividades elétricas elevadas para biocarvão de cama de frango produzidos a 200°C (9,18 dS/m), 300°C (9,33 dS/m) e 400°C (8,5 dS/m) (TSAI; CHANG, 2021). Já para biocarvão produzido 550°C a partir de esterco animal foi obtido condutividade de 1,6 dS/m e 0,14 dS/m para biocarvão produzido a 550°C a partir de resíduos verdes (SLAVICH *et al.*, 2013).

4.3.5 Massa específica real

O biocarvão de babaçu apresentou massa específica real de $1,3804 \pm 0,0061 \text{g/cm}^3$, resultado superior ao da perlita ($1,2922 \text{g/cm}^3$) e inferior ao do biocarvão produzido na mesma temperatura a partir de casca de arroz ($1,4203 \text{g/cm}^3$), ambos analisados por Souza (2019). A massa específica real não é um parâmetro estabelecido pelo MAPA para condicionadores de solo, mas é um parâmetro relacionado à porosidade do material. Ainda segundo Souza (2019), a perlita apresenta a característica de aeração quando misturada ao solo e, assim, o resultado encontrado para o biocarvão de babaçu é sugestivo de que este pode favorecer a aeração do solo quando misturado a ele.

4.3.6 Poder calorífico superior

O biocarvão de babaçu apresentou poder calorífico superior de 27,794 MJ/kg, resultado superior ao da biomassa bruta (18,674 MJ/kg), precursora do biocarvão. O aumento do poder calorífico superior do biocarvão em relação a biomassa de origem também foi identificado no estudo de (RO *et al.*, 2010), no qual foi obtido 13,0 MJ/kg para a biomassa de cama de frango e 13,5 MJ/kg para o biocarvão de cama de frango e, 19,3 MJ/kg para a biomassa resultante da mistura de sólidos suínos e capim azevém e 21,2 MJ/kg para o biocarvão produzido a partir desta mistura de biomassa.

O aumento do poder calorífico do biocarvão em comparação a biomassa precursora aproxima este dos valores de poder calorífico superior encontrado para combustíveis fósseis como o metano (55,5 MJ/kg), etano (51,9 MJ/kg) e propano (50,4 MJ/kg) (RENDEIRO *et al.*, 2008), e expõem a vantagem da conversão desta biomassa em biocarvão também para fins energéticos.

4.3.7 Fluorescência de raios X

O resultado da análise de fluorescência de raios X realizada com o biocarvão de babaçu se encontra na Tabela 14.

Tabela 14 - Fluorescência de raios X do biocarvão de babaçu

Amostra	Elementos majoritários (> 50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos traços (< 5%)
Biocarvão de babaçu	K	Si, Ca	Fe, Mg, S, P, Cu, Rb

Fonte: Autora.

Em relação aos constituintes minerais, o biocarvão de babaçu apresentou K como elemento majoritário (> 50%), Si e Ca como elementos presentes entre 5 e 50% e Fe, Mg, S, P, Cu e Rb (rubídio) como elementos presentes a nível de traços (< 5%).

Os resultados apresentados pelo biocarvão estão coerentes se comparados a biomassa bruta, precursora do biocarvão. Além dos constituintes já presentes na biomassa, no biocarvão também foi possível identificar o Rb como elemento a nível de traços.

De acordo com Molina Jr. (2017), os sais solúveis apresentam nutrientes que são considerados essenciais para o desenvolvimento das plantas, podendo ser classificados em macronutrientes e micronutrientes. Os macronutrientes são assim chamados, pois a concentração requerida destes elementos para o bom desenvolvimento das plantas é relativamente alta em comparação aos micronutrientes. São considerados macronutrientes os elementos nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg); enquanto o boro (B), cobre (Cu), cloro (Cl), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn) são considerados micronutrientes. Além destes, ainda há alguns elementos que são considerados benéficos para algumas plantas como é o caso do cobalto (Co), silício (Si) e sódio (Na).

Os resultados obtidos neste estudo também são indicativos de que a aplicação do biocarvão no solo pode favorecer o crescimento das plantas visto que a maioria dos elementos encontrados (K, Si, Ca, Fe, Mg, S, P e Cu) compõem a lista de macronutrientes e micronutrientes que devem estar presentes em fertilizantes organominerais sólidos ou líquidos para aplicação no solo, conforme Instrução Normativa SDA nº 61 do MAPA (BRASIL, 2020).

O estudo de Zhao *et al.* (2013) avaliou a constituição de diferentes biocarvões, sendo que, para o biocarvão de palha de trigo produzido na mesma temperatura (350°C), obteve a seguinte ordem decrescente de abundância K, Ca, Mg, P e Fe, Al,

Mn, Cu e Zn, não sendo reportada em função do percentual. Este mesmo estudo observou que o teor de minerais presentes no biocarvão sofreu forte dependência da composição da matéria-prima.

Os resultados do biocarvão de babaçu e dos biocarvões obtidos por Zhao *et al.* (2013), reforçam os estudos de Vassilev *et al.* (2010), que afirmam que a abundância dos elementos pode ser diferente devido às variedades de biomassas. Por consequência, os biocarvões também apresentarão abundância de constituintes diferentes, sendo importante considerar este fator quando sua utilização for para a melhoria da fertilidade do solo, por exemplo, pela adição de nutrientes. Também foi observado por Laghari *et al.* (2016), que a concentração de sal apresenta relação direta com a temperatura de pirólise, mas é afetada principalmente devido ao tipo de biomassa de origem. Dessa forma, para projetar o biocarvão para aplicação agrícola é importante considerar a concentração de sais do biocarvão para que a aplicação no campo seja apropriada, evitando a toxicidade para mudas que são sensíveis à alta salinidade no solo ou na água da irrigação.

4.3.8 Capacidade de Troca Catiônica

O biocarvão produzido a 350°C por 20 minutos apresentou CTC de $34,77 \pm 1,07$ mmol/kg. Souza (2019) obteve resultados próximos para os biocarvões de casca de arroz, 43 mmol/kg, 47 mmol/kg e 49 mmol/kg, produzidos a 350°C, 450°C e 550°C, respectivamente. Ainda segundo Souza (2019), a CTC do biocarvão sofre influência do aumento da temperatura de produção do biocarvão, obtendo-se maiores CTCs em maiores temperaturas de pirólise. Entretanto, o comportamento inverso também foi observado no estudo de Kappler (2021), que notou uma tendência de diminuição da CTC do biocarvão com o aumento da temperatura de pirólise e da taxa de aquecimento. Tal característica foi atribuída a perda de grupos funcionais, observadas em análises de FTIR, em função da severidade da pirólise.

Alguns resultados da caracterização do biocarvão podem ser correlacionados uma vez que o pH do biocarvão tem impacto na CTC, sendo que valores altos de pH elevam a CTC do biocarvão (SHACKLEY *et al.*, 2012). A área superficial do biocarvão é outro fator que pode afetar a CTC, visto que afeta a área superficial do solo e quanto maior este parâmetro, maior a CTC (MENDONÇA, 2006)

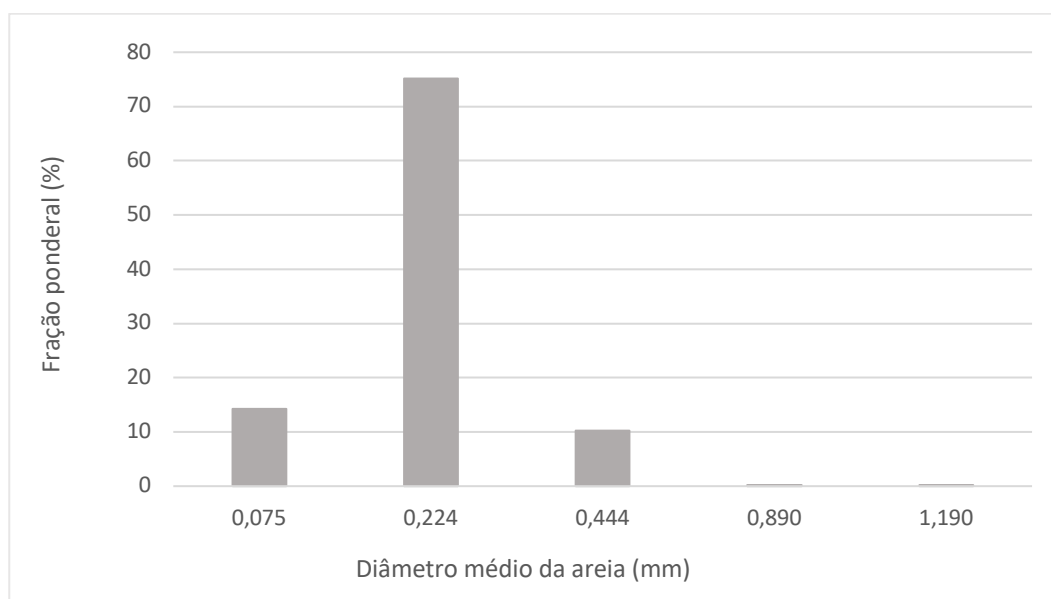
O resultado de CTC do biocarvão de babaçu obtido nesta pesquisa está abaixo do valor especificado pela Instrução Normativa nº 35 do MAPA, cujo valor mínimo deve ser 200 mmol/kg para condicionadores de solo (BRASIL, 2006). É válido ressaltar que a metodologia adotada para a determinação da CTC (BRASIL, 2007) é uma adaptação para a determinação da CTC em turfas pela Association of official Analytical Chemists (AOAC). Assim, ainda que o resultado de CTC do biocarvão de babaçu não possibilite a sua classificação como condicionador de solo perante os requisitos do MAPA, esta classificação não é definitiva e outras metodologias podem ser consideradas.

4.4 APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO

A areia utilizada para o preparo dos tratamentos apresentou diâmetro médio entre 0,075 e 1,190 mm, sendo a maior porção da areia referente ao diâmetro médio de 0,224 mm, conforme a Figura 21.

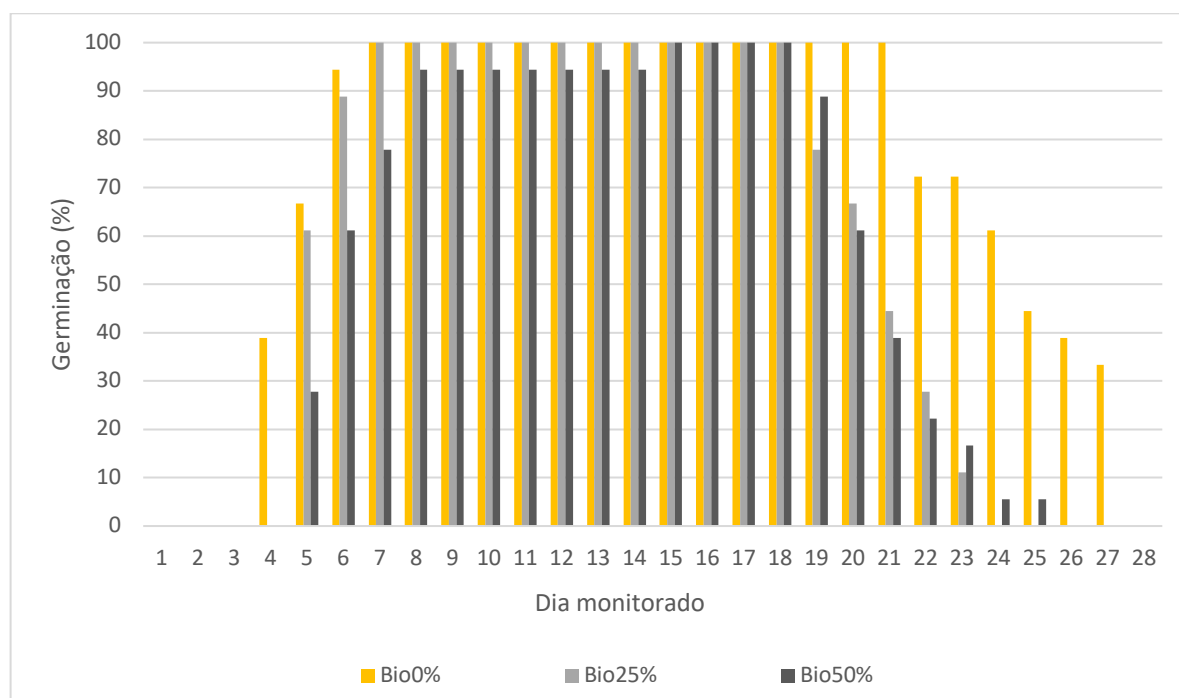
A germinação das sementes em cada célula foi acompanhada diariamente para cada tratamento e está apresentada na Figura 22.

Figura 21 - Distribuição granulométrica da areia utilizada nos tratamentos da semeadura de *L. sativa*



Fonte: Autora.

Figura 22 – Germinação das sementes de alface submetidas aos tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50%



Fonte: Autora.

Conforme a Figura 22, após a sementeira foi observada a germinação das primeiras sementes para o tratamento Bio0% no 4º dia de monitoramento, com germinação de aproximadamente 39% das células. Já os tratamentos Bio25% e Bio50% apresentaram germinação das primeiras células somente no 5º dia de monitoramento, apresentando germinação de aproximadamente 61% e 28% das células, respectivamente. Observa-se também que os tratamentos Bio0% e Bio25% foram os primeiros a apresentaram a germinação de todas as células semeadas, ambos no 7º dia de monitoramento, enquanto o Bio50% apresentou germinação de todas as células no 15º dia de monitoramento.

É interessante ressaltar que o Bio0% apresentou resposta de germinação mais rápida, iniciando a germinação um dia antes aos demais tratamentos e, ainda assim, o Bio25% apresentou número máximo de células germinadas no mesmo dia, indicando maior homogeneidade da germinação das sementes. Já o tratamento Bio50% apresentou maior dispersão em relação a germinação das sementes se comparado aos demais tratamentos.

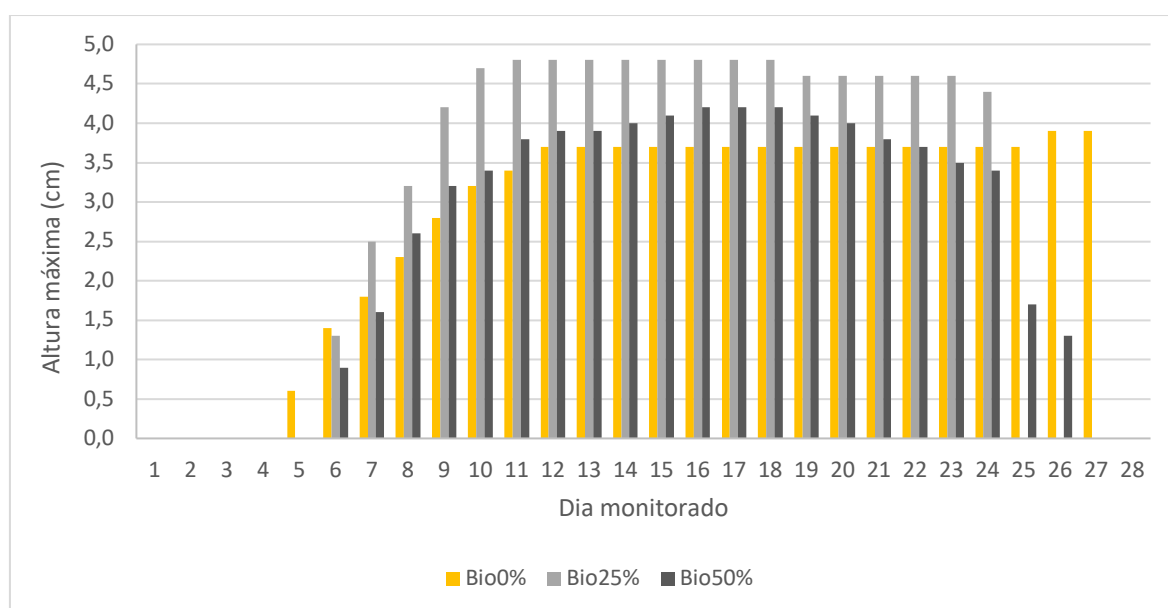
Observa-se também na Figura 22 o início da perda dos indivíduos (plântulas) no 19º dia de monitoramento para os tratamentos Bio25% e Bio50% e no 22º dia para

o tratamento Bio0%, caracterizado pela queda no percentual (%) de germinação das plântulas dos referidos tratamentos.

A medição da altura das plântulas ocorreu um dia após o início da germinação visto a dificuldade de medição dos brotos no primeiro dia de germinação. O desenvolvimento e crescimento das plântulas foi acompanhado por meio da medição da altura das plântulas, conforme a Figura 23.

Para o tratamento Bio0% observa-se que a altura máxima alcançada pelas plântulas foi de 3,9 cm no 26º dia de monitoramento, para o Bio25% a altura máxima foi de 4,8 cm no 11º dia de monitoramento e para o Bio50% a altura máxima alcançada foi de 4,2 cm no 16º de monitoramento. Logo, pode-se concluir que, ainda que o tratamento Bio0% tenha iniciado a germinação primeiro, as plântulas dos demais tratamentos alcançaram alturas maiores, indicando que os tratamentos com biocarvão podem favorecer o desenvolvimento de culturas agrícolas.

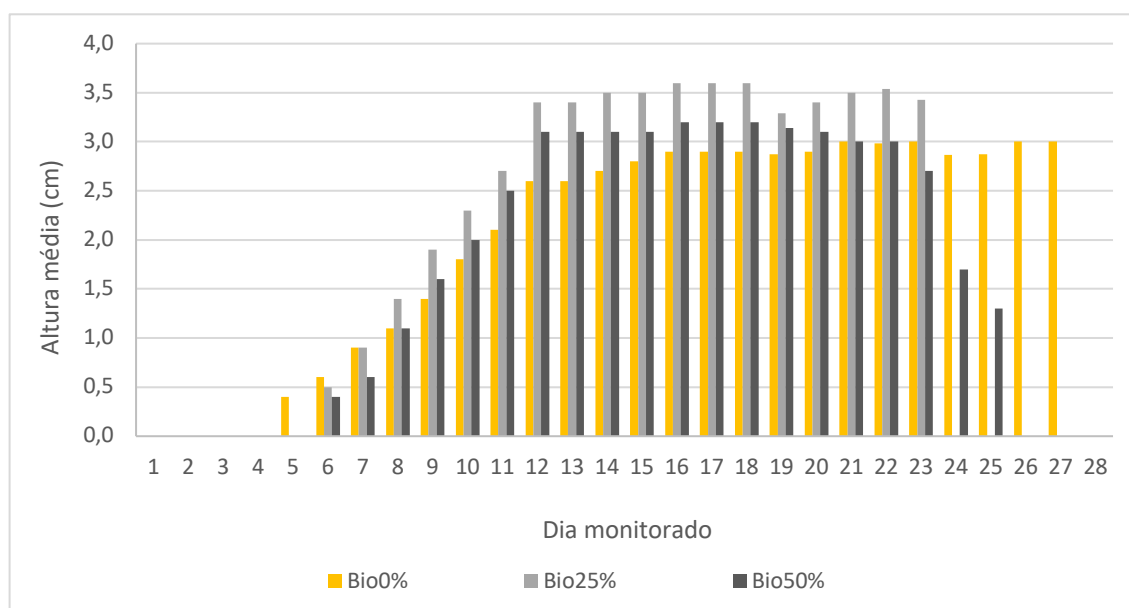
Figura 23 - Altura máxima das plântulas submetidas aos tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50%



Fonte: Autora.

A Figura 24 apresenta a altura média das plântulas submetidas a cada tratamento, considerando somente as plântulas germinadas/vivas para o cálculo, desprezando as plântulas que ainda não estavam germinadas no referido dia de monitoramento ou as que já se encontravam-na fase de morte.

Figura 24 – Altura média das plântulas submetidas aos tratamentos Bio0%, Bio25% e Bio50%



Fonte: Autora.

Observa-se que a altura média máxima alcançada pelas plântulas do tratamento Bio0% foi de 3,0 cm no 21º dia de monitoramento, 3,6 cm para o tratamento Bio25% e 3,2 cm para o tratamento Bio50%, estes dois últimos no 16º dia de monitoramento.

A partir da Figura 24 observa-se também que, da mesma forma que a altura máxima das plântulas, a altura média destas foi maior para os tratamentos com biocarvão, ainda que o Bio0% tenha iniciado a germinação primeiro. Tal fato reforça a hipótese de que o uso do biocarvão em solos pode favorecer o desenvolvimento de culturas agrícolas.

O crescimento das plântulas também foi acompanhado por meio de fotografias, conforme apresentado nas Figuras 25, 26, 27, 28 e 29. Observa-se em todas as fotografias que as plântulas submetidas aos tratamentos com biocarvão (Bio25% e Bio50%) se destacam pela altura e tamanho das folhas em relação ao tratamento testemunha, robustecendo a hipótese de que o biocarvão pode favorecer o crescimento de culturas quando utilizado em solos agrícolas.

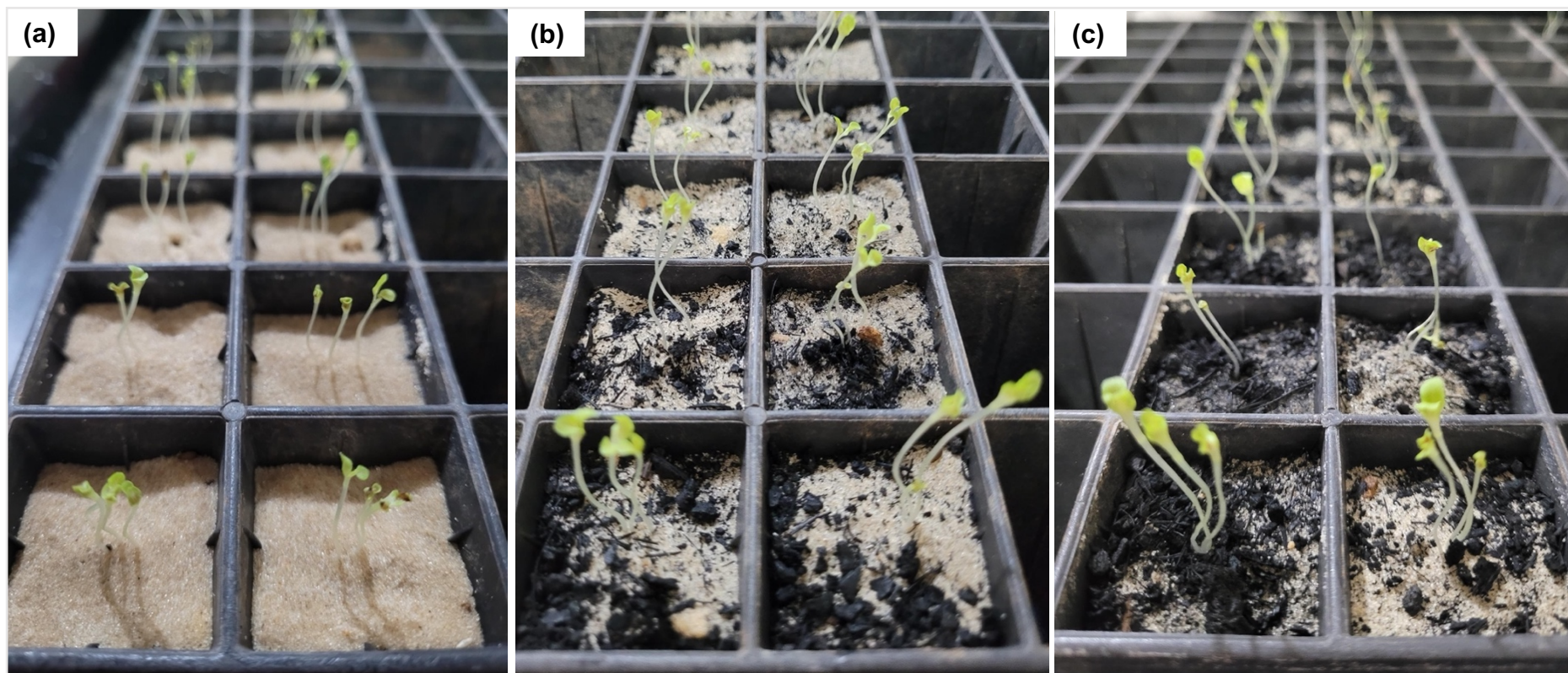
O estudo de Aguiar *et al.* (2020) também avaliou a utilização de biocarvão no cultivo de *L. sativa* e obteve resultados semelhantes. Em seus estudos Aguiar *et al.* (2020) produziram biocarvão pelo processo de pirólise a temperatura de 500°C utilizando o ramo central da folha do babaçu e o aplicaram no cultivo de *L. sativa* por

meio de diferentes formulações contendo o biocarvão produzido. Além dos experimentos contendo os diferentes substratos com quantidades variadas de biocarvão, o estudo também avaliou o plantio de *L. sativa* em substrato testemunha, sem adição de biocarvão. Para a avaliação da qualidade e da aparência externa da *L. sativa* os pesquisadores utilizaram como ferramenta a análise sensorial dos consumidores para a avaliação da cor, defeitos, tamanho, firmeza, aparência e potencial de compra. Ao final do estudo concluíram que o desempenho global das plantas foi superior para o substrato contendo 30 t/ha de biocarvão de babaçu e o substrato testemunha, sem biocarvão, apresentou os piores índices em relação aos demais substratos contendo biocarvão, referentes aos critérios de aceitabilidade em relação à quantidade de defeitos, tamanho comercial, firmeza, aspecto e compra das alfaces cultivadas neste substrato.

Ainda para Aguiar *et al.* (2020), os melhores resultados envolvendo os substratos contendo biocarvão podem estar relacionados a maior disponibilidade de nutrientes resultando em uma planta mais vigorosa, bem nutrida e com cores mais atrativas, sendo estes critérios relevantes na avaliação de compra do consumidor.

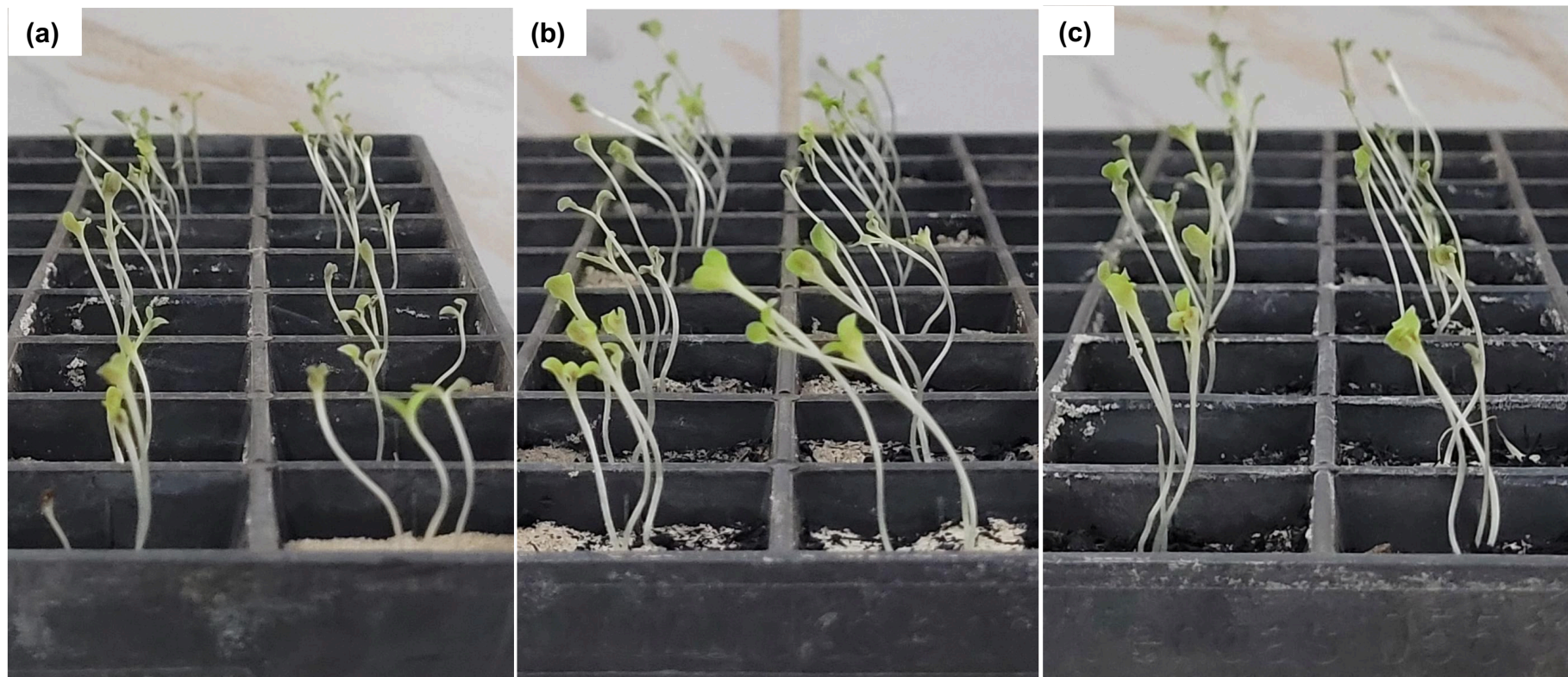
Os resultados obtidos por Aguiar *et al.* (2020) estão de acordo com os encontrados no presente estudo e são bons indicativos da potencialidade de uso do biocarvão de babaçu para fins agrícolas.

Figura 25 - Fotografia registrada no 10º dia de monitoramento das plântulas submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%



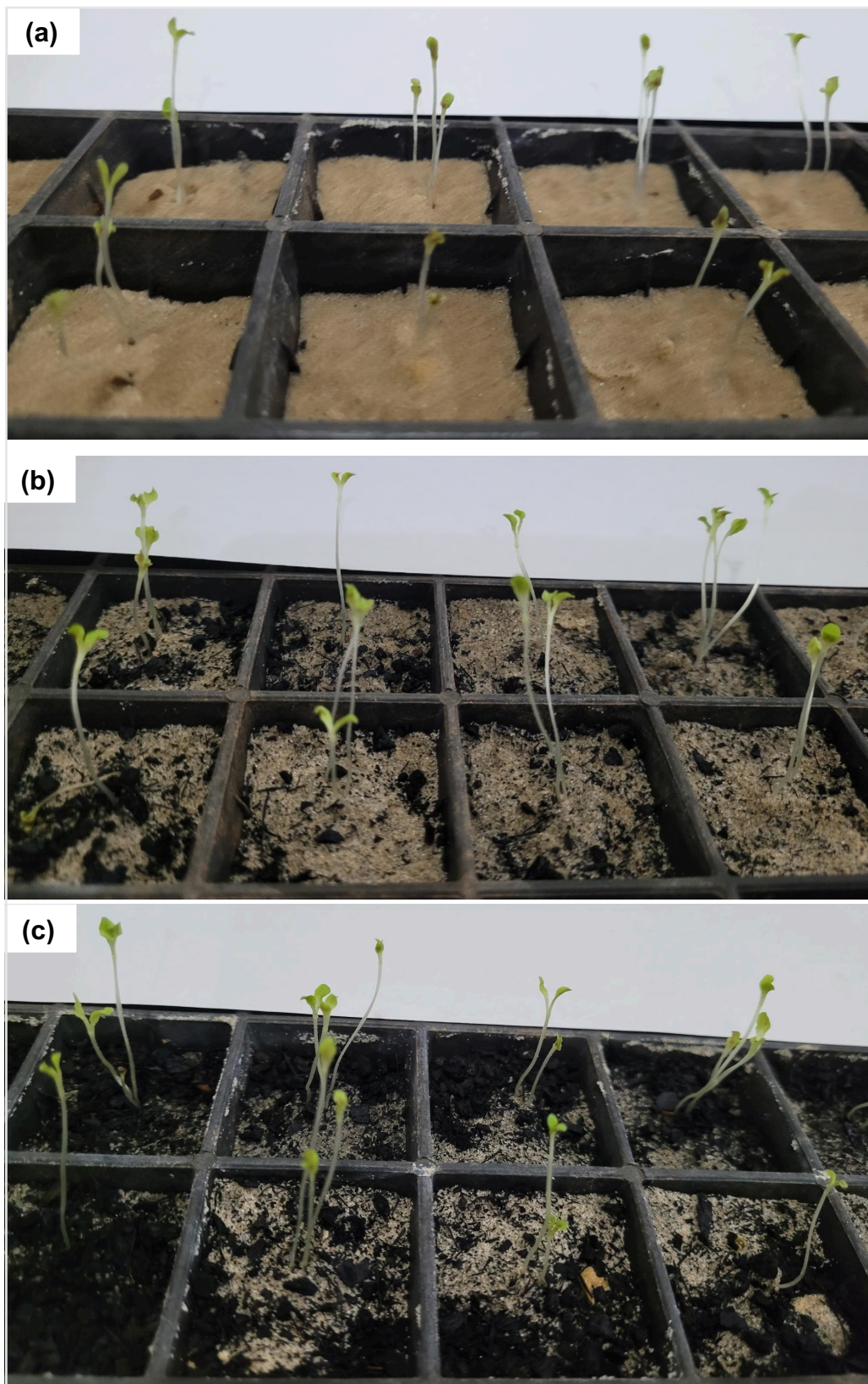
Fonte: Autora.

Figura 26 - Fotografia 1 registrada no 12º dia de monitoramento das plântulas de *L. sativa* submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%



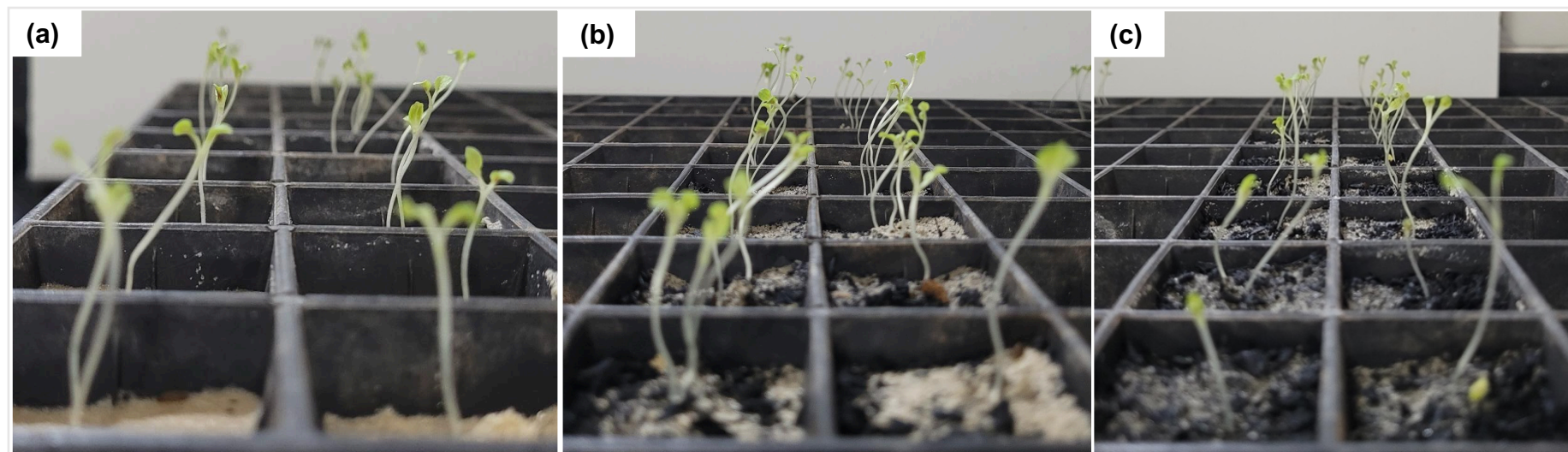
Fonte: Autora.

Figura 27 - Fotografia 2 registrada no 12º dia de monitoramento das plântulas de *L. sativa* submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%



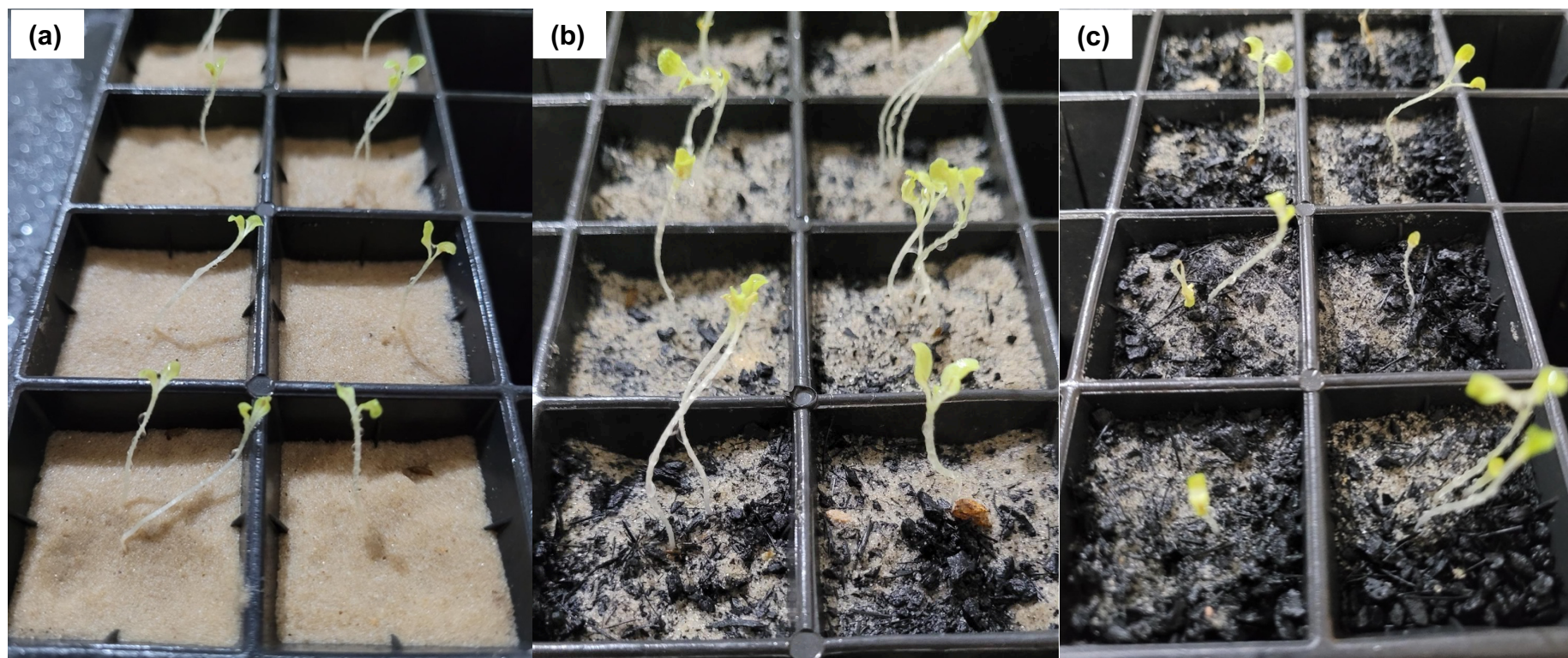
Fonte: Autora.

Figura 28 - Fotografia registrada no 16º dia de monitoramento das plântulas de *L. sativa* submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%



Fonte: Autora.

Figura 29 - Fotografia registrada no 19º dia de monitoramento das plântulas de *L. sativa* submetidas aos tratamentos (a) Bio0% (b) Bio25% e (c) Bio50%



Fonte: Autora.

5 CONCLUSÃO

Em relação a caracterização das biomassas de babaçu limpa e bruta foi possível verificar que, em geral, os resultados são semelhantes e indicam o potencial de utilização de ambas as biomassas para conversão em processo de pirólise para produção de biocarvão.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de pirólise foi possível verificar que a metodologia adotada foi eficiente para a produção de biocarvão a partir de biomassa de babaçu em processo de pirólise lenta. Avaliando a produção do biocarvão de babaçu em diferentes condições de pirólise foi possível verificar que as suas características são dependentes da temperatura de pirólise, sendo que o pH do biocarvão apresenta relação direta com a temperatura e, o rendimento e o conteúdo de voláteis apresentam relação inversa para com a temperatura.

Em relação a caracterização do biocarvão frente aos requisitos de condicionadores de solo foi possível verificar que este apresenta características que podem promover a melhoria das propriedades do solo e podem favorecer o desenvolvimento de culturas agrícolas, tais como distribuição granulométrica, pH, condutividade elétrica, massa específica real e elementos inorgânicos que são essenciais e/ou considerados benéficos para as plantas.

A aplicação do biocarvão em diferentes proporções em cultura de *L. sativa* indica que o biocarvão de babaçu favorece o desenvolvimento, crescimento e a melhora das características das plântulas quando comparado ao tratamento sem biocarvão. Dentre os substratos avaliados o que apresentou melhores resultados em relação a altura, cor e aparência das plântulas foi o Bio25%, referente a 25% v/v de biocarvão.

Ainda que os resultados deste estudo, mais especificamente a CTC, não permitem enquadrar o biocarvão de babaçu como condicionador de solo perante os parâmetros estabelecidos pela IN SDA nº 35 do MAPA, a aplicação prática na semeadura de *L. sativa* indica que há potencialidade de aplicação do biocarvão de babaçu em solos agrícolas para a melhoria das características do solo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados e as limitações dos ensaios realizados neste estudo não permitem classificar o biocarvão de babaçu como condicionador de solo frente aos parâmetros do MAPA. Ainda assim, mais estudos são importantes para avaliar a eficiência do biocarvão em culturas agrícolas a longo prazo e a realização de outros ensaios de caracterização são sugeridos a fim de melhor entender o comportamento do biocarvão quando aplicado no solo.

Considerando a importância da análise de CRA frente aos parâmetros quantitativos para a classificação dos condicionadores de solo, sugere-se realizar este ensaio com o biocarvão produzido.

Sugere-se realizar uma investigação aprofundada sobre o método para a determinação da CTC do biocarvão visto que a metodologia proposta pela IN SDA nº 17 é uma adaptação para a determinação da CTC em turfas pela Association of official Analytical Chemists (AOAC), podendo não ser apropriada para a determinação da CTC de biocarvões.

Considerando a importância da caracterização da biomassa e do biocarvão sugere-se a realização da análise elementar (CHNS-O) para compreender o comportamento do biocarvão no solo no que se refere, principalmente, ao carbono e aos macronutrientes nitrogênio e enxofre.

A análise quantitativa de FRX também é sugerida como forma de abranger o potencial de aplicação do biocarvão em campo e evitar a toxicidade em virtude da alta salinidade no solo ou água.

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) também são sugeridos para a avaliação da química de superfície do biocarvão produzido.

Por fim, sugere-se investigar a possível presença de HAPs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) no biocarvão visto que a presença destes compostos pode limitar seu uso.

REFERÊNCIAS

- ABIFA. **CEMP 145 - Pó de carvão mineral para fundição - Cálculo do teor de carbono fixo**. 2015.
- ADAMS, P. *et al.* Biomass Conversion Technologies. In: **Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems**. 107–139. Elsevier. 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00008-2>
- AGUIAR, F. I. S. *et al.* Sensorial analysis of commercial quality of lettuce grown on different substrates. **Scientific Electronic Archives**, 13 (9), 51, 2020. <https://doi.org/10.36560/13920201192>.
- AL-WABEL, M. I. *et al.* Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. **Bioresource Technology**, 131, 374–379, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.165>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Produção Agrária - MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA). **Instrução Normativa N° 35**, de 4 de julho de 2006. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n.132: 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Produção Agrária - MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA). **Instrução Normativa N° 17**, de 21 de maio de 2007. Brasília, DF: 2007.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Produção Agrária - MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA). **Instrução Normativa N° 61**, de 8 de julho de 2020. Brasília, DF: 2020.
- BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, p. 87–102, 2003.
- BRIDGWATER, A. Fast pyrolysis of biomass for the production of liquids. In: **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. 130–171. 2013. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097439.2.130>.
- BRUNAUER, Stephen; EMMETT, P H; TELLER, Edward. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, p. 309–319, 1938. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
- CARPENTER, Daniel *et al.* **Biomass feedstocks for renewable fuel production: A review of the impacts of feedstock and pretreatment on the yield and product distribution of fast pyrolysis bio-oils and vapors**. Green Chemistry, v. 16, n. 2, p. 384–406, 2014. <https://doi.org/10.1039/c3gc41631c>.
- CARRAZZA, Luis Roberto; ÁVILA, João Carlos Cruz; SILVA, Mariane Lima da. **Manual Tecnológico de Aproveitamento Integral do Fruto e da Folha do Babaçu (Attalea spp.)**. 2ªed. Brasília - DF: Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN), 2012.

CAVALCANTE, Henrique Simões *et al.* Decomposed Babassu Biomass: New Substrate for the Production of Jacaranda mimosifolia D. Don Seedlings. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 2, p. 1–9, 2021. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0045>.

CEN/TS 14774-1:2004 – Solid Biofuels – Methods for determination of moisture content. **European Committee for Standardization**: 2004.

CEN/TS 14775:2009 - Solid biofuels – Determination of ash content. **European Committee for Standardization**: 2009.

CEN/TS 15148:2005 – Solid biofuels – Method for the determination of the content of volatile matter. **European Committee for Standardization**: 2005.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Oliveira. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008.

DIAS, José Manuel Cabral de Souza *et al.* **Produção de briquetes e peletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. 1ªed. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

HOSOYA, T.; KAWAMOTO, H.; SAKA, S. Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 78, n. 2, p. 328–336, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.08.008>.

IBGE, **Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IBI – INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. **Pyrolysis and Gasification of Biosolids to Produce Biochar**, 2013. <http://bayareabiosolids.com/home>

IBI – INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. **Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil**, 2015. <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>.

JAHIRUL, Mohammad I. *et al.* Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 4952–5001, 2012. <https://doi.org/10.3390/en5124952>.

JAMES, Arthur *et al.* Biochar from agricultural residues for soil conditioning: Technological status and life cycle assessment. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 25, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100314>.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 359–378, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>.

KAPPLER, G. **Valorização de agrorresíduos por meio da pirólise na produção de biochar**. 1-235f. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.

KELLEY, Stephen S. *et al.* Rapid analysis of the chemical composition of agricultural fibers using near infrared spectroscopy and pyrolysis molecular beam mass spectrometry. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 1, p. 77–88, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.11.005>.

LAGHARI, Mahmood *et al.* Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 15, p. 4840–4849, 2016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7753>.

LOO, Sjaak van; KOPPEJAN, Jaap. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**. FiSH Books, Enfielded. Londres: Earthscan, 2008.

LUO, L.; XU, C.; CHEN, Z.; ZHANG, S. Properties of biomass-derived biochars: Combined effects of operating conditions and biomass types. **Bioresource Technology**, 192, 83–89, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.054>.

MARTINI, Paulo Roberto Rodrigues. **Conversão Pirolítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos**. 2009. 1–117 f. Santa Maria, 2009.

MATOS, T. T.S. *et al.* Low temperature production of biochars from different biomasses: Effect of static and rotary lab reactors and application as soil conditioners. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105472>.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)).

MENDONÇA, J. F. B. Solo: Substrato da Vida. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia**. 2006.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Série boas práticas de manejo para o extrativismo sustentável orgânico**. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília: MAPA/ACS, 2012.

MOLINA JR, W. F. Comportamento Mecânico do Solo em Operações Agrícolas. **ESALQ/USP**. 2017.

MOTA, F. A. S. *et al.* Pirólise da Biomassa Lignocelulósica: Uma Revisão. **Revista GEINTEC - Gestão, Inovação e Tecnologias**, v. 5, n. 4, p. 2511–2525, 2015. <https://doi.org/10.7198/s2237-0722201500040003>.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R.; HARRIS, W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. **Geoderma**, 163(3–4), 247–255. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.021>.

NASCIMENTO, J. M.; OLIVEIRA, J. D.; LEITE, S. G. F. Chemical characterization of biomass flour of the babassu coconut mesocarp (*Orbignya speciosa*) during

biosorption process of copper ions. **Environmental Technology and Innovation**, v. 16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100440>.

NOVOTNY, E. H. *et al.* Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use - A critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321–344, 2015.

PROTÁSIO, Thiago de Paula *et al.* Combustão da biomassa e do carvão vegetal da casca do coco babaçu. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 1–10, 2017. <https://doi.org/10.1590/01047760201723012202>.

RALEBITSO-SENIOR, T. Komang; ORR, C. H. Microbial Ecology Analysis of Biochar-Augmented Soils: Setting the Scene. **Biochar Application**. Elsevier Inc., 2016. p. 1–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803433-0.00001-1>.

RAMBO, Magale Karine Diel *et al.* Characterization of biomasses from the north and northeast regions of Brazil for processes in biorefineries. **Food Science and Technology (Brazil)**, v. 35, n. 4, p. 605–611, 2015. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6704>.

RENDEIRO, Conçalo *et al.* **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

RO, K. S.; CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G. High-temperature pyrolysis of blended animal manures for producing renewable energy and value-added biochar. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 20, p. 10125–10131, 2010. <https://doi.org/10.1021/ie101155m>.

SALGADO, M. D. F. *et al.* Preparation of activated carbon from babassu endocarp under microwave radiation by physical activation. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, 105(1), 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/105/1/012116>.

SANTOS, Antonio Miranda; MUNIZ, Cejane Pacini Leal. **Universo Cultural da Palmeira Babaçu**. 2017.

SHACKLEY, Simon *et al.* Biochar, Tool for Climate Change Mitigation and Soil Management. **Encyclopedia of Sustainability Science and Technology**. Springer New York, 2012. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5770-1_6.

SILVA, Josany Saibrosa da *et al.* Subprodutos do babaçu (*Orbignya* sp) como novos materiais adsorptivos: uma revisão. **Revista Matéria**, v. 24, n. 3, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0730>.

SLAVICH, P. G. *et al.* Contrasting effects of manure and green waste biochars on the properties of an acidic ferralsol and productivity of a subtropical pasture. *Plant and Soil*, 366(1–2), 213–227, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1412-3>.

SOHI, Saran *et al.* **Biochar, climate change and soil: A review to guide future research**. 2009.

SOUZA, Débora Machado de. **Avaliação das propriedades do biocarvão obtido por carbonização a partir de cascas de arroz, visando sua aplicação em solos agrícolas**. 1–104 f. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

SWERTS, Leila Affonso. **Políticas de desenvolvimento, organização do território, e participação: as quabradeiras de coco de babaçu na microrregião do Bico do Papagaio, Tocantins**. 2009. 1–167 f. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TEIXEIRA, Marcos Alexandre. Babassu-A new approach for an ancient Brazilian biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 9, p. 857–864, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.016>.

TSAI, C. C.; CHANG, Y. F. Quality evaluation of poultry litter biochar produced at different pyrolysis temperatures as a sustainable management approach and its impact on soil carbon mineralization. **Agronomy**, 11(9). 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091692>.

UDDIN, M. N. *et al.* An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. **Energies**, v. 11, n. 3115, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11113115>.

VAN DE VELDEN, Manon *et al.* Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 232–242, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.019>.

VASSILEV, Stanislav v. *et al.* An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.

VEIGA, Tais Regina Lima Abreu *et al.* Different plant biomass characterizations for biochar production. **Cerne**, v. 23, n. 4, p. 529–536, 2017. <https://doi.org/10.1590/01047760201723042373>.

VENDERBOSCH, R. H.; PRINS, W. Fast pyrolysis technology development. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 4, n. 2, p. 178–208, 2010. <https://doi.org/10.1002/bbb.205>.

VIEIRA, Fábio Roberto. **ESTUDO EXPERIMENTAL DA PIRÓLISE LENTA DA CASCA DE ARROZ EM REATOR DE LEITO FIXO**. 2018. 1–92 f. - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

VILAS-BOAS, A. C. M.; TARELHO, L. A. C.; KAMALI, M.; HAUSCHILD, T.; PIO, D. T.; JAHANIANFARD, D.; GOMES, A. P. D.; MATOS, M. A. A. Biochar from slow pyrolysis of biological sludge from wastewater treatment: characteristics and effect as soil amendment. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15(4), p. 1054–1072. 2021. <https://doi.org/10.1002/bbb.2220>.

WAQAS, M. *et al.* Development of biomass-derived biochar for agronomic and environmental remediation applications. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, n. 2, p. 339–361, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00936-2>.

ZHAO, L. *et al.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, p. 256–257, 1–9, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.015>.