

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE - UNICENTRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
FLORESTAIS - PPGF**

**PRODUÇÃO DE *BIOCHAR* A PARTIR DE RESÍDUOS DA COLHEITA DE
PINUS E SEU USO NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO
DE MUDAS**

TESE DE DOUTORADO

DISCENTE

Luiz Henrique Natalli

ORIENTADOR

Everton Hillig

Irati - PR

2024

LUIZ HENRIQUE NATALLI

**PRODUÇÃO DE *BIOCHAR* A PARTIR DE RESÍDUOS DA COLHEITA DE
PINUS E SEU USO NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO
DE MUDAS**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Everton Hillig

Orientador

Prof.^a. Dr.^a. Kátia Cylene Lombardi

Coorientadora

Prof. Dr. Marcelo Godinho

Coorientador

Prof. Dr. Remigio Paradelo Nunez

Coorientador

IRATI – PR

2024

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

N272p

Natalli, Luiz Henrique

Produção de *biochar* a partir de resíduos da colheita de *pinus* e seu uso na composição de substratos para produção de mudas / Luiz Henrique Natalli. -- Irati, 2024.

xiv, 111 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, 2024.

Orientador: Everton Hillig

Coorientadora: Kátia Cylene Lombardi

Coorientador: Marcelo Godinho

Coorientador: Remigio Paradelo Nunez

Banca examinadora: Everton Hillig, Gabriel Pauletti, Fabrício William de Ávila, Suelem Daiane Ferreira, Marcelo Godinho

Bibliografia

1. Biomassa. 2. Acículas. 3. Conversão termoquímica. 4. Pirólise.
I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais.

| CDD 634.9



TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 47

Luiz Henrique Natalli

"Produção de *Biochar* a partir de resíduos da colheita florestal de Pinus e seu uso na composição de substratos para produção de mudas"

Tese aprovada em 02/02/2024, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gabriel Pauletti
Universidade de Caxias do Sul
Primeiro Examinador

Prof. Dr. Fabrício William de Ávila
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Segunda Examinadora

Prof^a. Dra. Suellem Daiane Ferreira
Universidade de Caxias do Sul
Terceiro Examinador

Prof. Dr. Marcelo Godinho
Universidade de Caxias do Sul
Quarto Examinador

Prof. Dr. Éverton Hillig
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati – PR
2024

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Salvatore Renna – Padre Salvador, 875, Bairro Santa Cruz – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090 CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

Campus Cedeteg: Alameda Élio Antonio Dalla Vecchia, 838, Bairro Vila Carli – Fone: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-167 – GUARAPUAVA – PR

Campus de Irati: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000 CEP 84.505-677 – IRATI – PR

*Aos meus pais Sayonara e Valdir, que me
incentivaram do início ao fim. Dedicó.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus, por iluminar o meu caminho durante esta jornada, por me manter firme diante das dificuldades encontradas e me fazer entender que as coisas acontecem conforme for sua vontade.

Aos meus pais Sayonara e Valdir, pelo apoio incondicional de sempre, pela educação que me passaram, por todo incentivo, suporte, compreensão, paciência e carinho, tudo que sou é graças a vocês.

À minha avó Ivani e ao meu Tio Sandro, pelo carinho e apoio diário, que apesar da distância, se fizeram presentes.

Ao Professor e Orientador, Everton Hillig, por toda calma, paciência e incentivo. Por todos ensinamentos, conselhos, ajuda e disponibilidade de sempre e os ‘puxões de orelha’ necessários para que eu tomasse o rumo certo.

Aos meus Co-orientadores, Katia Cylene Lombardi, Marcelo Godinho e Remigio Paradelo Nunez, pelas críticas construtivas, pelas orientações e todas contribuições, ajuda e ensinamentos constantes.

Aos membros da Banca Examinadora, Gabriel Pauletti, Suelem Daiane Ferreira e Fabrício William de Ávila e Marcelo Godinho por todas as contribuições.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Silvana A. Kowalski, por todo incentivo, conversas e ajuda prestada ao longo da minha jornada.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, a todos os Professores e Funcionários.

À Universidade de Santiago de Compostela (Espanha), pelo acolhimento, ajuda e compreensão comigo durante meu período Sanduíche.

A todos os colegas de laboratório e do PPGF, pelo auxílio, conversas, estudos, por toda ajuda e companheirismo.

Aos membros do LEBio, da Universidade de Caxias do Sul, em especial ao Oscar de Almeida Neuwald, pelo auxílio na produção do *biochar* e demais análises.

A todos os meus amigos, aos que deixei no Rio Grande do Sul, Paraná e no Mundo, por me apoiarem sempre, por estarem do meu lado e entenderem a minha ausência, por acreditarem em mim e apoiarem meu sonho, vocês foram o combustível necessário para eu continuar.

À CAPES pelo apoio financeiro, tanto dentro como fora do País.

The way to get started is to quit talking and begin doing.
(Walt Disney)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. GERAL	17
2.2. ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL	18
3.2. RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL DE <i>Pinus spp.</i>	19
3.3. <i>BIOCHAR</i> : DEFINIÇÃO E PROCESSO DE PRODUÇÃO	19
3.3.1. O <i>Biochar</i>	19
3.3.2. Processo de Pirólise	20
3.4. <i>BIOCHAR</i> E SEUS POTENCIAIS USOS NA GESTÃO AMBIENTAL	23
3.4.1. Gestão e reciclagem de resíduos	23
3.4.2. Mitigação das mudanças climáticas	23
3.4.3. Sequestro de carbono	24
3.4.4. Remediação da poluição e corpos d'água	25
3.4.5. Produção de energia	26
3.4.6. Logística Reversa de resíduos florestais	27
3.5. <i>BIOCHAR</i> NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS	28
3.6. UTILIZAÇÃO DO <i>BIOCHAR</i> NA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1. CARACTERIZAÇÃO E ÁREA DO ESTUDO	32
4.2. COLETA DO MATERIAL	33
4.3. PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	34
4.3.1. Teor de umidade e Densidade a granel	34
4.3.2. Análise Imediata	35
4.3.3. Análise Termogravimétrica da biomassa	36
4.4. PRODUÇÃO DO <i>BIOCHAR</i>	37
4.4.1. Rendimento gravimétrico do <i>biochar</i>	40
4.5. CARACTERIZAÇÃO DO <i>BIOCHAR</i>	40
4.5.1. Análise Imediata	41
4.5.2. Poder Calorífico Superior (PCS)	41
4.5.3. Propriedades físicas e químicas do <i>biochar</i>	42
4.5.4. Determinação da área superficial e tamanho de poros do <i>biochar</i> (BET)	42

4.5.5. Análise por Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	43
4.6. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE <i>BIOCHAR</i> NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS DE CULTIVO	44
4.6.1. Preparo do substrato de cultivo	44
4.6.2. Caracterização físico-química dos substratos	44
4.7. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO <i>BIOCHAR</i> NO DESENVOLVIMENTO DAS MUDAS DE <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i>	51
4.7.1. Delineamento experimental	51
4.7.2. Produção de mudas de <i>Eucalyptus benthamii</i>	53
4.7.3. Análise do desenvolvimento e qualidade das plantas	53
4.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	56
5.1.1. Teor de Umidade e Densidade a Granel	56
5.1.2. Análise Imediata	56
5.1.3. Análise Termogravimétrica (TGA)	58
5.2. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO <i>BIOCHAR</i>	59
5.2.1. Rendimento Gravimétrico	59
5.2.2. Análise Imediata e Poder Calorífico Superior (PCS)	60
5.2.3. Área superficial e Tamanho de Poros (Porosidade) (BET)	62
5.2.4. Análise por Espectroscopia no Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	63
5.2.5. Propriedades físicas do <i>biochar</i>	65
5.2.6. Propriedades químicas do <i>biochar</i>	68
5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SUBSTRATOS DE CULTIVO APÓS ADIÇÃO DO <i>BIOCHAR</i>	72
5.3.1. Efeito do <i>biochar</i> nas propriedades físicas dos substratos	72
5.3.2. Efeito do <i>biochar</i> nas propriedades químicas dos substratos	75
5.4. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO <i>BIOCHAR</i> NO DESENVOLVIMENTO E QUALIDADE DAS MUDAS DE <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i>	82
6. CONCLUSÕES	91
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
8. BIBLIOGRAFIA	93

LISTA DE SIGLAS

BAP	<i>Biochar</i> de acículas de <i>Pinus</i>
BCP	<i>Biochar</i> de cascas de <i>Pinus</i>
BMP	<i>Biochar</i> de madeira de <i>Pinus</i>
BACM	<i>Biochar</i> de mistura
SB100	Substrato comercial
TU	Teor de Umidade
Dg	Densidade a granel
TGA	Análise termogravimétrica
PCS	Poder calorífico superior
BET	Área superficial e tamanho de poros
FTIR	Infravermelho por transformada de Fourier
UNE-EN	Norma Europeia
Pu	Peso úmido
Ps	Peso seco
Pbiom	Peso da biomassa
Vrecip	Volume do recipiente
M105	Massa da amostra seca a 105 °C
M750	Massa da amostra após aquecimento a 750 °C
M950	Massa da amostra após aquecimento a 950 °C
TC	Teor de carbono fixo
TV	Teor de matéria volátil
TZ	Teor de cinzas
RG	Rendimento gravimétrico
RCF	Rendimento em carbono fixo
Dbd	Densidade aparente seca
Wmo	Teor de matéria orgânica
Wcen	Teor de cinzas
Pd	Densidade de partículas
Ps	Porosidade total
Wv	Volume de água
Av	Volume de ar
pH	Potencial hidrogeniônico
CE	Condutividade elétrica
IQD	Índice de qualidade de Dickson
MST	Massa seca total
H	Altura
Dc	Diâmetro do colo
NH ₄ ⁺	Amônio
NO ₃ ⁻	Nitrato

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do Procedimento Metodológico desenvolvido no estudo. Onde: TU= Teor de umidade; Dg= Densidade a granel; TGA= Análise termogravimétrica; PCS= Poder calorífico superior; BET= Área superficial e Tamanho de poros; FTIR= Infravermelho por transformada de Fourier; BAP= Biochar de acículas de pinus; BMP= Biochar de madeira de pinus; BCP= Biochar de casca de pinus; IQD= Índice de qualidade de Dickson.....	33
Figura 2. Resíduos da colheita florestal de Pinus spp. A= madeira (galhos e ponteiros); B= casca; e C= Acículas.	34
Figura 3. Analisador termogravimétrico (TG e TGA).	37
Figura 4. Reator de pirólise do tipo rosca transportadora-screw reator (Pirólise de biomassas/resíduos). Nota: ZE= zona de entrada; ZI= zona intermediária; ZS= zona de saída; CO= coletor.....	38
Figura 5. Fluxograma do reator de pirólise do tipo rosca transportadora. Fonte: Ferreira, 2013.39	
Figura 6. Analisador de superfície Quantachrome Instruments, modelo New 1200, análise BET.	43
Figura 7. Espectrofotômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR, Shimadzu, IR Prestige 21.....	44
Figura 8. Procedimentos de determinação do Volume e Densidade Básica Aparente.....	46
Figura 9. Obtenção do conteúdo de Matéria Orgânica e Cinzas.	47
Figura 10. Procedimento para obtenção do volume de água e volume de ar das amostras.....	48
Figura 11. Medidor de pH e medidor de Condutividade elétrica.....	49
Figura 12. Procedimento para medição do pH das amostras.....	49
Figura 13. Procedimento para determinação dos elementos solúveis em água e fósforo.	50
Figura 14. Extração dos elementos solúveis em água régia.	51
Figura 15. Esquema do delineamento em Blocos ao acaso para o experimento em casa de vegetação.....	52
Figura 16. Materiais utilizados para mensurar os parâmetros das plantas. A= Paquímetro digital; B= Régua graduada.	53
Figura 17. Análise destrutiva para obtenção dos parâmetros de qualidade das mudas.....	54
Figura 18. Análise termogravimétrica (TG) e suas derivadas (DTG) para os três compartimentos residuais de Pinus taeda.....	58
Figura 19. Espectros FTIR dos Biochars estudados. Onde: BAP= Biochar de acículas de Pinus; BCP= Biochar de cascas de Pinus; BMP= Biochar de madeira de Pinus.	64
Figura 20. Análise dos fatores “tipo de biochar” e “doses”. Onde: BACM= Biochar de mistura de Pinus; BAP= Biochar de acículas de Pinus; BCP= Biochar de cascas de Pinus; BMP= Biochar de madeira de Pinus. Letras maiúsculas: componentes; Letras minúsculas: doses.	87
Figura 21. Análise dos fatores “tipo de biochar” e “doses”. Onde: BACM= Biochar de mistura de Pinus; BAP= Biochar de acículas de Pinus; BCP= Biochar de cascas de Pinus; BMP= Biochar de madeira de Pinus. Letras maiúsculas: componentes; Letras minúsculas: doses.	88
Figura 22. Análise dos fatores “tipo de biochar” e “doses”. Onde: BACM= Biochar de mistura de Pinus; BAP= Biochar de acículas de Pinus; BCP= Biochar de cascas de Pinus; BMP= Biochar de madeira de Pinus. Letras maiúsculas: componentes; Letras minúsculas: doses.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Rendimento em biochar de diferentes biomassas e temperaturas utilizadas no processo de Pirólise.....	21
Tabela 2. Desenho experimental para produção do biochar.....	38
Tabela 3. Variáveis de determinação das propriedades físicas e químicas do substrato.....	42
Tabela 4. Esquema de montagem do experimento.....	52
Tabela 5. Valores médios para teor de umidade e densidade a granel da biomassa residual de <i>Pinus taeda</i>	56
Tabela 6. Valores médios para análise imediata da biomassa residual de <i>Pinus taeda</i>	57
Tabela 7. Parâmetros de processo e valores de rendimento gravimétrico na produção do biochar.	59
Tabela 8. Valores médios para análise imediata e poder calorífico superior do biochar.	60
Tabela 9. Resultados da análise de Volume de Poros e Área superficial do Biochar.	62
Tabela 10. Atribuições das bandas observadas a partir da análise FTIR dos três tipos de Biochar.	65
Tabela 11. Valores médios para as propriedades físicas do biochar da biomassa residual de <i>Pinus taeda</i>	66
Tabela 12. Valores médios para as propriedades químicas do biochar a biomassa residual de <i>Pinus taeda</i>	69
Tabela 13. Valores médios para as propriedades físicas dos substratos de cultivo compostos por biochar da biomassa residual da colheita de <i>Pinus taeda</i>	73
Tabela 14. Valores médios para as propriedades químicas dos substratos de cultivo compostos por biochar da biomassa residual da colheita de <i>Pinus taeda</i>	76
Tabela 15. Valores médios para a concentração de metais dos substratos de cultivo compostos por <i>biochar</i> da biomassa residual da colheita de <i>Pinus taeda</i>	78
Tabela 16. Análise fatorial para as propriedades físicas para os fatores componente e dose.	80
Tabela 17. Análise fatorial para as propriedades químicas dos fatores componente e dose.	80
Tabela 18. Análise fatorial para os metais pesados dos fatores componente e dose.....	81
Tabela 19. Valores médios das variáveis mensuradas para verificação do crescimento e qualidade das mudas de <i>Eucalyptus. benthamii</i>	83
Tabela 20. Análise fatorial para as variáveis dendrométricas das mudas para os fatores componente e dose.	84

RESUMO

As operações da colheita florestal geram montantes significativos de resíduos que, embora possam ser mantidos no campo como prática de manejo do solo, quando em grande quantidade, podem acabar afetando o desenvolvimento e condução do plantio. A colheita florestal de *Pinus* gera, nas suas operações, três principais resíduos, sendo estes: acículas, cascas e madeira (ponteiros e galhos), os quais poderiam ser melhor reaproveitados. Uma das formas de aproveitamento é a sua conversão termoquímica, por meio da técnica de pirólise, para produção de *biochar*. O *biochar* é um produto rico em carbono, de constituição porosa, que apresenta uma gama de utilizações, contribuindo desde a redução das emissões de CO₂, como agente de remoção de poluentes das águas, também como prática de manejo, contribuindo para correção de acidez e até disponibilização de nutrientes e ainda podendo retornar ao início do processo produtivo, na composição de substratos para produção de mudas. Desta maneira, o estudo teve como objetivo avaliar a qualidade de mudas de *Eucalyptus benthamii*, produzidas com a adição de *biochar* de resíduos da colheita de *Pinus taeda* na composição dos substratos. Foi realizada a caracterização dos resíduos gerados na colheita do *Pinus* e posteriormente o material foi conduzido a um reator de pirólise para produção do *biochar*. Foram realizadas as caracterizações físico-químicas do *biochar*, análise BET e análise FTIR, a fim de avaliar suas propriedades. Após, o *biochar* foi incorporado na composição dos substratos, em três proporções (15, 30 e 45%), sendo realizada a caracterização dos substratos, no intuito de avaliar o efeito do *biochar* na sua composição. Na última etapa, foram produzidas mudas de *Eucalyptus benthamii*, em casa de vegetação, a fim de avaliar o efeito do *biochar* no crescimento e qualidade das mudas. Os resultados demonstraram que os resíduos apresentam características potenciais para produção de *biochar*, tais como teor de carbono e cinzas, porosidade, tamanho e formato das partículas. O *biochar* produzido a partir dos resíduos apresentou bom rendimento e, a partir da sua caracterização, foi possível identificar propriedades que os tornam aptos para utilização na composição de substratos, pois apresentaram características que são requeridas para substratos, tais como alto teor de cinzas e carbono, baixa densidade e alta porosidade. Isto foi evidenciado após caracterização dos substratos com *biochar* em sua composição, onde este apresentou efeito positivo nas propriedades físicas, tais como porosidade, retenção e volume de água, volume de ar, densidade, teor de matéria-orgânica, demonstrando seu potencial de uso como condicionador de substratos. A avaliação da qualidade das mudas de *Eucalyptus benthamii* demonstrou que o *biochar* de acículas de pinus, nas proporções de 30 e 45%, apresentaram melhores resultados para as propriedades morfológicas avaliadas, tais como comprimento do sistema radicular, massa seca aérea e radicular, massa seca total e índice de qualidade de Dickson. Concluiu-se, então, que os resíduos da colheita florestal de *Pinus taeda* apresentaram potencial como matéria-prima para produção de *biochar*, que demonstrou potencial de utilização na composição de substratos, agindo como condicionador.

Palavras-chave: Biomassa. Acículas. Conversão termoquímica. Pirólise.

ABSTRACT

Forest harvesting operations generate significant amounts of residue that, although they can be kept in the field as a soil management practice, when in large quantities, can end up affecting the development and conduct of planting. *Pine* forest harvesting generates, in its operations, three main residues, namely: needles, bark and wood (tips and branches), which could be better reused. One of the ways of using it is its thermochemical conversion, using the pyrolysis technique, to produce *biochar*. *Biochar* is a product rich in carbon, with a porous constitution, which has a range of uses, contributing to the reduction of CO₂ emissions, as an agent for removing pollutants from water, as well as a management practice, contributing to the correction of acidity and even availability of nutrients and can even return to the beginning of the production process, in the composition of substrates for seedling production. In this way, the study aimed to evaluate the quality of *Eucalyptus benthamii* seedlings, produced with the addition of *biochar* from *Pinus taeda* harvest residues in the composition of the substrates. The characterization of the waste generated during the Pine harvest was carried out and the material was subsequently taken to a pyrolysis reactor to produce *biochar*. Physicochemical characterizations of the *biochar*, BET analysis and FTIR analysis were carried out in order to evaluate its properties. Afterwards, *biochar* was incorporated into the composition of the substrates, in three proportions (15, 30 and 45%), and the characterization of the substrates was carried out, in order to evaluate the effect of *biochar* on their composition. In the last stage, *Eucalyptus benthamii* seedlings were produced in a greenhouse, in order to evaluate the effect of *biochar* on the growth and quality of the seedlings. The results demonstrated that the waste has potential characteristics for *biochar* production, such as carbon and ash content, porosity, particle size and shape. The *biochar* produced from the residue showed good yield and, from its characterization, it was possible to identify properties that make it suitable for use in the composition of substrates, as it presented characteristics that are required for substrates, such as high ash and carbon content, low density and high porosity. The evaluation of the quality of *Eucalyptus benthamii* seedlings demonstrated that pine needle *biochar*, in proportions of 30 and 45%, presented better results for the morphological properties evaluated, such as length of the root system, aerial and root dry mass, dry mass total and Dickson quality index. It was concluded, then, that residues from *Pinus taeda* forest harvesting had potential as a feedstock for the production of *biochar*, which demonstrated potential for use in the composition of substrates, acting as a conditioner.

Key-words: Biomass. Needles. Thermochemical conversion. Pyrolysis.

1. INTRODUÇÃO

O setor de árvores plantadas representa 9,9 milhões de hectares. Entre as espécies, 19,4% (1,9 bi de hectares) são compostos pelo cultivo de pinus. Para retirada da madeira com uso comercial da floresta, temos um conjunto de operações, dada pela colheita florestal (VATRAZ; BORGES, 2019). Destas operações, desde a extração até a obtenção dos produto final, a cadeia produtiva florestal gera milhões de toneladas anuais de resíduos. Conforme dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), só no ano de 2018, o setor florestal produziu aproximadamente 52 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Destes, 70,9% (36,9 milhões de toneladas) foram gerados por atividades florestais e correspondem, principalmente, resíduos como cascas, galhos e folhas (98%) (IBÁ, 2019). Ainda, daqueles provenientes da colheita florestal, 17% permanecem no campo (IBÁ, 2022). Desta maneira, é necessário conhecer melhor os resíduos e entender o seu potencial de uso em diferentes meios, sendo um material com eficiência para inúmeros fins.

Os resíduos da colheita florestal podem ser classificados como todo material da árvore que, ao longo das operações, são deixados para trás, como folhas, galhos, cascas e ponteiros (CASTRO *et al.*, 2017). Esta biomassa gerada pode atuar como fonte de nutrientes, um vez que liberam elementos a partir da sua decomposição contribuindo para a fertilidade (BRUN *et al.*, 2021). Dentre os nutrientes, os principais encontrados são Ca, N, Mg, estes presentes principalmente nas cascas da madeira. A casca é caracterizada por sua riqueza de nutrientes, a partir das células de parênquima, apresentando carbonatos de Mg e Ca (WINK *et al.*, 2018). Ainda, a madeira apresenta maiores níveis de nutriente, no entanto, as folhas, galhos e casca apresentam teores significativos de N, P, K, Ca, Mg, S, B e Zn (WINK *et al.*, 2018).

Portanto, as perdas ao longo da cadeia produtiva podem representar uma importante fonte de biomassa para aproveitamento secundário (MALTA *et al.*, 2017; PINCELLI *et al.*, 2017) e, ainda, consistir em uma nova fonte de renda (NONES *et al.*, 2017). Sobretudo, a utilização desta biomassa residual da colheita florestal como forma de manejo e uso renovável é de grande importância, a fim de responder às preocupações relativas à proteção e conservação do meio ambiente.

Uma das alternativas para a utilização desta biomassa residual é a conversão termoquímica, através do processo de pirólise, onde a biomassa é decomposta sob temperaturas elevadas, na ausência de oxigênio e convertida em *biochar* (BRIDGWATER *et al.* 2012). O *biochar* consiste em um produto sólido, rico em carbono,

de constituição porosa, representando cerca de 25% da biomassa original. O *biochar* é um produto versátil e apresenta uma ampla faixa de utilização. Seu potencial inicia desde a remoção de metais contaminantes (TANG *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019), no sequestro de carbono (ABDEL-FATTAH *et al.*, 2015; YOUSAF *et al.*, 2017), aumento da atividade microbiana (KONG *et al.*, 2017), aumento da fertilidade (DING *et al.*, 2016), e ainda na sorção e disponibilidade de nutrientes, tais como Ca, Mg, P, K, N (FIGUERERO *et al.*, 2017; ZEMANOVÁ *et al.*, 2017; GWENZI *et al.*, 2018; GLASER e LEHR, 2019).

Como já observado em alguns estudos (GLASER e LEHMAN, 2002; DUMROESE *et al.*, 2011; BIEDERMAN e HARPOLE, 2013; LAGHARI *et al.*, 2016; SULIMAN *et al.*, 2017), o *biochar* apresenta potencial, também, para ser utilizado como condicionador na composição de substratos para produção de mudas, tanto hortícolas quanto florestais, uma vez que apresenta características que proporcionam à estas melhorias nas características físicas, químicas e biológicas, tais como redução da densidade, aumento da porosidade, disponibilidade de água, absorção de nutrientes, atividade microbiana. Seu potencial de uso na composição de substratos é visto em alguns estudos, (ZAKARIA *et al.*, 2012; PLUCHON *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2019; BASÍLIO *et al.*, 2020; KULCZYCKI *et al.*, 2020; SOLÍS *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2022; EDUSSURIYA *et al.*, 2023), contribuindo na produção, uma vez que a melhoria das características dos substratos proporciona melhor crescimento e desenvolvimento das plantas.

A produção de mudas é uma das etapas mais importantes para o estabelecimento e qualidade de grandes plantios. Portanto, a escolha de um substrato adequado, que proporcione as características ideais para o bom desenvolvimento das mudas, que possa ser adquirido com facilidade, de baixo custo benefício e, que, ainda, possa ser proveniente de materiais orgânicos, tais como resíduos, sendo menos nocivo ao meio ambiente é primordial.

A formação e condução de mudas é prioridade, no intuito de obter plantas de qualidade, o que será refletido na adaptação das plantas ao campo posteriormente. Desta forma, cada espécie tem suas características e, com isso, a elaboração e combinação do substrato é importante para estabelecer uma condição ideal à estas (LAVIOLA *et al.*, 2006). Esta etapa é uma das mais importantes ao longo do sistema produtivo, pois reflete no comportamento das plantas, sua resposta nutricional e produtiva (BASTOS *et al.*, 2007).

Sobretudo, quando determinados os substratos e suas composições, as avaliações da qualidade das mudas, isto é, dos seus parâmetros morfológicos é de extrema importância, tais como altura, diâmetro do coleto, número de folhas, pois desta maneira é possível identificar os fatores biológicos, ambientais, abióticos (PETTER *et al.*, 2012; FREITAS *et al.*, 2013), e conduzir de maneira a se obter o melhor desenvolvimento e qualidade do produto final. A qualidade dos insumos é fator essencial, assim como a sua disponibilidade e custos (SILVA *et al.*, 2010).

Diante disto, aliando a preocupação com as questões ambientais e os aspectos de qualidade de produção de mudas, a utilização da biomassa residual da colheita florestal, convertida em *biochar*, a partir da degradação termoquímica, demonstra uma alternativa viável, pois permite a melhor gestão dos resíduos, que são convertidos em um produto potencial que, além de atender às necessidades das plantas, ainda surge como uma alternativa sustentável para este setor.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O estudo tem como objetivo geral avaliar a qualidade de mudas de *Eucalyptus benthamii*, produzidas com a adição de *biochar* de resíduos da colheita de *Pinus taeda* na composição dos substratos.

2.2. ESPECÍFICOS

- a) caracterizar física e quimicamente os resíduos provenientes da colheita de *Pinus taeda*;
- b) produzir o *biochar* por meio da técnica de pirólise; e caracterizar o *biochar* dos resíduos por meio da técnica de pirólise;
- c) caracterizar física e quimicamente o *biochar*;
- d) avaliar os efeitos da adição de *biochar* nas propriedades de substratos;
- e
- e) avaliar o efeito do *biochar* no desenvolvimento das mudas de *Eucalyptus benthamii*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL

Os materiais provenientes das operações de colheita florestal podem ser caracterizados por galhos, folhas, cascas, ponteiros, tocos e raízes (MOURA *et al.*, 2012). São decorrentes da exploração madeireira e que acaba permanecendo no local de origem, sem que haja um destino estabelecido para que possa ser aplicado algum uso (ALMEIDA, 2016).

Os resíduos florestais, ainda, podem ser definidos como sendo os materiais gerados e deixados na floresta resultante das atividades de colheita da madeira, englobando todo material resultante da exploração da madeira e que continuam sem utilização definida. Ou seja, podem ser considerados resíduos: casca, galhos, copas, árvores com diâmetro inferior ao mínimo comercial, árvores doentes e mortas, os tocos e raízes (SOUZA, 2010). São gerados, tanto nas operações de colheita florestal como na transformação da madeira em produtos acabados, definidos como àqueles que acabam sem nenhuma utilização, devido às limitações tecnológicas ou de mercado (LOPES, 2016).

Os maiores volumes de resíduos estão contidos nos ponteiros, cascas, folhas, galhos e árvores finas deixadas após as operações de colheita, conforme apresentado anteriormente, o que representa neste seguimento cerca de 74% em toneladas. A quantidade destes resíduos gerados ao longo das operações de colheita florestal gira em torno de 10 a 120 t/ha⁻¹ (IBÁ, 2019). Por ser considerado de baixo valor agregado e de forma ineficiente acaba impedindo o desenvolvimento de uma nova cadeia de produção, uma vez que o volume gerado destes resíduos é consideravelmente grande (BRAZ *et al.*, 2014).

Além disso, os estudos de aproveitamento de resíduos realizados e publicados são relacionados àqueles gerados nas etapas de desdobro e processamento da madeira nas indústrias e não estão direcionados para os resíduos gerados no campo, nas intervenções e operações de colheita, o que dificulta ainda mais o processo de utilização (PONTES *et al.*, 2012). Uma das formas de reutilização destes resíduos é na produção do *biochar*, obtendo materiais com características adsorventes semelhantes às do carvão ativado, entretanto, com um custo de produção muito mais baixo (DOKE *et al.*, 2013; LORENZO *et al.*, 2014;).

3.2. RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL DE *Pinus spp.*

Em 2021, a área total de florestas plantadas totalizou 9,93 milhões de hectares. Entre as espécies, está o Pinus, que representa cerca de 19,4% das áreas cultivadas, com aproximadamente 1,93 milhão de hectares. Atualmente, a produtividade de pinus está na faixa de 29,7 m³/ha/ano (IBÁ, 2022). Junto com esta produtividade, chegam os resíduos, gerados em volumes significativos ao longo das atividades, não apenas de colheita florestal, mas até a obtenção do produto final, em que, a maioria dos resíduos da colheita florestal no Brasil provém de florestas plantadas.

Alguns dados já são conhecidos e vêm sendo estudados ao longo dos anos. Copetti (2001) relata a proporção de 31% de resíduos totais, em relação à produção total de biomassa, na colheita em talhões de *Pinus taeda*, sendo 18% de galhos, 7% de casca e 6% de acículas. Schumacher *et al.* (2002), avaliando o acúmulo de biomassa após colheita em povoamento de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, quantificaram 10,9 t/ha de casca, 47,7 t/ha de galhos e 8 t/ha de acículas, o que representa um montante total de 24,7% de resíduos em comparação ao total de biomassa produzida. Em estudo realizado por Szymczak (2013), este quantificou a biomassa florestal residual proveniente da colheita de *Pinus taeda* L. com idade de 22 anos e, verificou que, foram gerados, em média, 100 t/ha de acículas, galhos, ponteiro e serrapilheira distribuídas na trilha. Vatrax e Borges (2014) quantificaram resíduos de *Pinus sp.* gerados após a colheita, encontrando cerca de 43 m³ ha⁻¹. Ainda, para colheita da mesma espécie, *Pinus taeda*, com 15 anos de idade, Marcio (2013) relata uma produção média de 93 t/ha de resíduos. Pincelli *et al.* (2017) observou que, os resíduos lenhosos originados nos processos de colheita de *Pinus caribaea* correspondem a 13,2%, em relação a biomassa madeireira total produzida. Ainda, observou que a colheita de pinus gera maior quantidade de biomassa residual que o eucalipto, cerca de 11,0 t/ha.

3.3. BIOCHAR: DEFINIÇÃO E PROCESSO DE PRODUÇÃO

3.3.1. O Biochar

O termo *biochar* surge a partir de questões de manejo do solo e sequestro de carbono, relacionados à matéria orgânica. Esta denominação é, também, utilizada para materiais lignocelulósicos carbonizados, por meio do processo conhecido por pirólise (PETTER e MADARI, 2012). *Biochar* ou biocarvão é um carvão obtido de material vegetal que passou por processo de pirólise, decomposição térmica em ambiente com restrição total

ou parcial de oxigênio. Constituído por cerca de 80% de carbono e menos de 0,1% de nitrogênio (DUMROESE *et al.*, 2017; HAN *et al.*, 2020).

A degradação termal da biomassa a partir da pirólise gera um produto sólido, denominado de *biochar* (LIU; LIU; ZHANG, 2014). A partir da carbonização de biomassa sob baixa atmosfera de oxigênio, o *biochar* é gerado, constituindo de um material carbonáceo, de granulometria fina e elevado teor de carbono em sua fração orgânica, o que o torna resistente à decomposição, representando, em média de 25% da biomassa original (LEHMANN & JOSEPH, 2015), dependendo das condições e parâmetros utilizados durante o processo de produção. Este, consiste na fração sólida gerada no processo de conversão, que é composta por um material organo-funcionalizado, apresentando algumas diferentes funções (SUN *et al.*, 2016). Ainda, o subproduto gerado, denominado de *biochar*, é composto por camadas de anéis aromáticos semelhantes à estrutura do grafite, responsável pela composição do esqueleto do material. Apresenta ainda, determinada quantidade de material não-volatizado, que são os compostos aromáticos-alifáticos, e uma quantidade de minerais, que são as cinzas (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

3.3.2. Processo de Pirólise

A pirólise é um processo endotérmico que consiste na decomposição térmica da biomassa, na ausência ou na presença de uma quantidade mínima de oxigênio, com temperaturas acima de 400° C. No final do processo da pirólise são obtidos produtos em três fases distintas: bioóleo (líquido), *biochar* (sólido) e gases não condensáveis como CO, CO₂, H₂ e CH₄. Os próprios produtos finais podem servir de matéria prima para fornecer a energia necessária para o processo pirolítico (BRIDGWATER, 2012).

O produto gasoso, gás pirolítico (material volátil), é composto principalmente de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrogênio (H₂), hidrocarbonetos leves, alguns componentes orgânicos maiores e vapor de água. A fração líquida (bioóleo) de cor escura é originado dos vapores orgânicos condensáveis; e a fração sólida (*biochar*), que é rico em carbono, é a matéria que não volatiliza (YANG *et al.*, 2007; LAIRD *et al.*, 2009; BRIDGWATER, 2012).

Existem diferentes tipos de pirólises, classificados como lenta, rápida e flash. Na pirólise lenta a biomassa é pirolisada em taxas de aquecimento lento (0,1 –1°C min⁻¹), com menor produção de líquidos e gasosos e maior produção de *biochar*, utilizando

temperaturas de 300 a 700° C. A pirólise rápida com taxas de aquecimento de até 100° C min⁻¹, alcançando temperaturas de 600 a 1000° C, com maior quantidade de bioóleo produzida. A do tipo flash tem tempo de reação em apenas alguns segundos (1000° C min⁻¹ ou maior), em ambas podem ser utilizadas reatores de leito fixo e fluidizado (GEORGES, 2011). Diante disso, quando a temperatura de pirólise é aumentada, o rendimento dos produtos líquidos (bioóleo) e do produto gasoso (biogás) aumenta, no entanto, o rendimento do *biochar* é reduzido (MOHAN *et al.*, 2006; BRIDGWATER, 2012; JAMRADLOEDLUK; LERTSATITTHANAKORN, 2014; HASSEN-TRABELS *et al.*, 2014; TRIPATHI, 2016). Nesse contexto, o conhecimento das características dos três componentes principais é fundamentalmente importante para um melhor entendimento do processo de conversão química, o que auxiliará na seleção de fontes de matérias-primas adequadas para a geração dos produtos esperados (INYANG *et al.*, 2012).

Os tipos de reatores mais empregados são os de leito fluidizados e leito fixo. O reator de leito fluidizado, a biomassa é submetida a altas temperaturas em ambiente inerte, as partículas são fluidizadas e os produtos coletados sob resfriamento. Já o reator de leito fixo, o aquecimento do sistema é controlado e o fluxo de gás de arraste é colocado em contato com a biomassa, que é também seca, resfriada e de granulometria definida, onde posteriormente os produtos são levados para fora do leito em direção ao frasco de coleta (ALMEIDA, 2010; BRIDGWATER, 2012).

Durante o processo de pirólise, a eficiência e o rendimento estão condicionados às condições empregadas, tais como tempo de residência, taxa de aquecimento e temperatura, levando uma maximização da produção e dos seus respectivos produtos, quando bem otimizados, mas também, às características da biomassa utilizada, como composição química, teor de cinzas, tamanho e forma da partícula, densidade, teor de umidade (BLASI, 2008; BON *et al.*, 2008; BRIDGWATER, 2012).

Tabela 1. Rendimento em *biochar* de diferentes biomassas e temperaturas utilizadas no processo de Pirólise.

Autor	Biomassa	Temperatura (°C)	Rendimento em <i>biochar</i> %
Ferreira <i>et al.</i> , 2018	Capim elefante	400 e 600	37,5
Colen <i>et al.</i> , 2009	Dejetos de galinha	300 e 525	64,39 e 42,71
Pires <i>et al.</i> , 2018	Cana-de-açúcar	300	30,40
Chaib, 2019	Resíduos verdes	375	73,27
Zelaya <i>et al.</i> , 2018	Lodo de esgoto	450	24
Figueredo <i>et al.</i> , 2017	Eucalyptus	350	40,17
Silvestre <i>et al.</i> , 2018	Sementes de rabanete	500	24,90
Ahmad <i>et al.</i> , 2013	Pine Needles	300	57,57
Roy e Kundu, 2023	Pine Needles	350	41,82

Alguns estudos demonstraram que a temperatura é um parâmetro determinante no processo, sendo um dos parâmetros mais importantes, que alteram as características e rendimento dos produtos finais do produto gerado (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Hanke *et al.* (2022) observaram que a condutividade elétrica do *biochar* variou e foi superior em temperaturas mais elevadas. Hamzah *et al.* (2013) avaliaram as propriedades físico-químicas do *biochar* e verificaram que a temperatura e tempo de residência influenciam nas características do produto final. Gonçalves (2021) observou que a microporosidade do *biochar* é influenciada diretamente pela temperatura de pirólise e a mesoporosidade pelo tipo de matéria-prima empregada no processo.

As matérias-primas utilizadas são degradadas a temperaturas situadas entre 350 a 1000° C. Isto significa que, a perda de massa do produto gerado é dependente da temperatura e duração do processo de pirólise e taxa de aquecimento (ONAY, 2003; ATES, 2013; BARROS, 2017), portanto, a qualidade do *biochar* depende destes parâmetros empregados ao longo do processo (GUARNIERI, 2016; TRAZZI *et al.* 2018).

Desta forma, o aquecimento da matéria-prima somado à atmosfera inerte faz com que as ligações C-C dos componentes orgânicos sejam quebradas, formando ligações C-O. As lamelas dos anéis aromáticos se reorganizam, formando estrutura reorganizada. Reações de oxirredução também acontecem e com ela, uma parte da biomassa é reduzida a carbono e outra parte é oxidada e hidrolisada, originando fenóis, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos. Ao longo do processo, a hemicelulose é degradada entre as temperaturas de 225 e 325° C, a celulose entre 305 e 375° C e a lignina entre 250 e 500° C (ALCALA; BRIDGWATER, 2013; LIOU *et al.*, 2013).

Algumas características foram vistas e estudadas por alguns autores. Para composição química elementar do *biochar*, Cimo *et al.* (2014) observaram que a temperatura final de pirólise teve maior influência em comparação à taxa de aquecimento, analisando a composição elementar do composto (% de N, H e O), na qual diminuiu com o aumento da temperatura. Uttran *et al.* (2018) buscaram investigar a sorção de íons de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) no *biochar*, onde este foi produzido e preparado para o processo de adsorção de NPK. Concluíram ainda que, a temperatura de pirólise influencia nas propriedades finais do produto, ou seja, quanto maior for a temperatura, menor a capacidade de troca catiônica, maior o teor de cinzas, carbono fixo, área superficial e pH, todos estes parâmetros determinantes para o uso final do produto gerado. As propriedades minerais, físicas, químicas e mecânicas do *biochar* dependem das características da

matéria-prima utilizada, bem como das condições de pirólise, uma vez que, diferentes graus de carbonização podem produzir uma variedade de *biochars*, o que direcionará sua aplicação posteriormente (LEHMANN, 2011; ENDERS *et al.*, 2012; AHMAD *et al.*, 2014).

Este processo demonstra ser muito eficiente, no que diz respeito à obtenção de materiais renováveis, pois apresenta balanço energético e ecológico positivo. Consiste ainda em uma alternativa viável, em virtude dos valores agregados aos produtos e coprodutos gerados ao longo do processo (VIEIRA *et al.*, 2014).

3.4. *BIOCHAR* E SEUS POTENCIAIS USOS NA GESTÃO AMBIENTAL

3.4.1. Gestão e reciclagem de resíduos

Os resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva florestal é elevado e apresenta potencial de utilização em outros setores. A biomassa florestal apresenta potencial como fonte de matéria-prima para produção do *Biochar*, consistindo em uma forma de gestão e aproveitamento dos resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva.

Resíduos de colheita, resíduos florestais, dejetos de animais, resíduo de comida processada, resíduos da fábrica de papel, resíduos sólidos municipais e lodo de esgoto, resíduos agrícolas e agroindustriais são relatados como sendo os resíduos mais comuns para produção de *biochar* (AHMAD *et al.*, 2014; PEREIRA *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2021). A transformação destes materiais em *biochar* são uma ferramenta econômica e sustentável para a remediação ambiental, pois contribui para a reciclagem dos recursos existentes (CONTE *et al.*, 2015). Uma vez que o *biochar* é formado por diversas classes de resíduos/biomassas, tanto urbanos, rurais como industriais, e desta forma, contribui para a reciclagem e reaproveitamento desses materiais, que outrora seriam descartados em lixões ou vias fluviais (PEDROXA *et al.*, 2017).

3.4.2. Mitigação das mudanças climáticas

O *biochar*, devido à sua estrutura, apresenta potencial como agente mitigador das mudanças climáticas, diminuindo a emissão de gases, como o gás carbônico a atmosfera. Em virtude da sua estrutura porosa particular e alta área superficial específica, o *biochar* não apenas pode ser utilizado como agente condicionador, na remediação da fertilidade, mas também na mitigação das mudanças climáticas (LEHMANN e JOSEPH, 2009). É desta maneira que, não por acaso, o *biochar* foi citado no quinto relatório do IPCC

(Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), como uma promissora tecnologia que poderia e, de fato, já vem contribuindo na mitigação de gases do efeito estufa, incluídos no setor Florestal, agrônômico, embora ainda sejam limitadas as evidências de seu uso e sua eficácia (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

O *biochar* possui elevada taxa de fixação e lenta liberação de carbono, o que, conseqüentemente, armazenando e reduzindo as emissões de gases do efeito estufa, tais como Metano (CH₄) e Óxido Nitroso (N₂O) (PETTER & MADARI, 2012; HUSSAIN *et al.*, 2017; UUSITALO & LEINO, 2019), podendo reduzir em até 92% as emissões de N₂O (Mukherjee *et al.*, 2014), reduzindo de maneira significativa (CASE *et al.*, 2012).

3.4.3. Sequestro de carbono

O *biochar* é uma forma de carbono antropogênico recalcitrante produzido para aplicação no solo, inspirado nas práticas de nativos pré-coloniais da Amazônia, que transformaram solos pobres em solos férteis, os quais permanecem produtivos até os dias atuais, após cessada produção (LEHMANN *et al.*, 2008). Utilizado de forma eficiente como sequestro de carbono (ELKHLIFI *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2023). Carbono recalcitrante, que apresenta tempo de degradação maior do que o carbono orgânico, permanecendo por maior tempo (LEHMANN e JOSEPH, 2009). Este carbono, que permanece após a remoção dos componentes voláteis é denominado carbono fixo. Também, devido a suas características estruturais e de superfície (MAROUSEK *et al.* 2023).

Os teores de carbono fixo da biomassa estão na faixa de 10 a 30%. A partir de temperaturas de 250 e 350° C, a quantidade de carbono fixo aumenta duas vezes. Este aumento é resultado da desvolatilização, diminuindo a quantidade de matéria volátil presente (QUIKER *et al.*, 2016; WEBER e QUIKER, 2018). Embora no seu processo de produção, a liberação inicial de gases seja mais rápida, a porção remanescente é mais estável, permanecendo por centenas de anos quando adicionada (GAUNT; COWIE, 2009). Por isso, o manejo convencional da biomassa, libera gases como metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), gases estes que contribuem para o aumento do efeito estufa, sendo que sua conversão em *biochar* pode contribuir para remissão destes gases e a permanência maior do carbono sem ser emitido à atmosfera. Lehmann *et al.* (2006) estimam que até 12% do total das emissões de C por mudança no uso da terra poderiam ser evitadas

anualmente desde que o sistema tradicional *slash-and-burn* (corte e queima) fosse substituído pelo então denominado *slash-and-char* (corte e produção de biocarvão). Isso significa que, para cada tonelada de Carbono perdida no solo, adiciona-se cerca de 3,7 toneladas de CO₂ na atmosfera (WINSLEY, 2007), sendo isso possível por meio do processo de conversão termoquímica (SCHMIDT *et al.*, 2011).

3.4.4. Remediação da poluição e corpos d'água

Muitos estudos vêm demonstrando que o *biochar* apresenta potencial como agente adsorvente, uma vez que possui algumas propriedades, tais como sua matriz de carbono relativamente estruturada, com grande área superficial específica, estrutura micro, meso e macroporosa, grupos funcionais ativos e pH elevado, podendo desempenhar um papel importante no controle de contaminantes no ambiente (CHEN *et al.*, 2013; TREVIÑO-CORDERO, 2013). O *biochar* desempenha este papel de remediador da poluição pois apresenta como propriedade a capacidade de filtração e remediação de efluentes e águas contaminadas, adsorvendo excessos de nutrientes, metais pesados e moléculas pesticidas em geral (XIE *et al.*, 2015; RAO *et al.*, 2017; SAIZ-RUBIO *et al.*, 2018). Esta capacidade de retenção, faz com que, por meio de sua aplicação, se reduza a lixiviação de produtos químicos para as águas subterrâneas e, desta forma, reduza os riscos potenciais de contaminação e poluição tanto do solo quanto da água (TRIGO *et al.*, 2016).

Como é o caso dos herbicidas, conforme aumenta a sorção desses compostos orgânicos pelo *biochar* em solos agrícolas, reduz o risco de contaminação das águas, embora haja possibilidade de reduzir a eficácia do herbicida, exigindo que aumente a dose aplicada (CLAY *et al.*, 2016). Estes pesticidas e inseticidas utilizados na área agrícola e florestal, são inseridos no meio ambiente produzindo toxicidade para os seres vivos, possibilitando que as plantas absorvam e até mesmo contaminando as águas subterrâneas. Portanto, a utilização de componentes carbonáceos, tais como *biochar*, surgem como uma ferramenta potencial na retenção de compostos químicos. A parte física, tais como os microporos do *biochar*, tem a função de absorção e adsorção dos pesticidas (SOUZA *et al.*, 2016). Alguns autores constataram que o *biochar* pode ser bastante efetivo como adsorvente de contaminantes orgânicos e inorgânicos da água e do solo, diminuindo assim sua biodisponibilidade e toxicidade para os seres vivos (AHMAD *et al.*, 2014; CAPORALE *et al.*, 2014; INYANG and DICKENSON, 2015; LEHMANN e JOSEPH, 2015; TAN *et al.*, 2015). Em solos contaminados por exemplo, o tratamento com *biochar*

proveniente de biomassa de coníferas induziu uma melhor resposta com pH e PCP. O *biochar*, portanto, reduz com sucesso a extração de contaminantes e, conseqüentemente a sua biodisponibilidade, diminuindo a concentração de substâncias tóxicas (RAO *et al.*, 2017).

De baixo custo e com uma alternativa efetiva na remediação de contaminantes, tornando o *biochar* um adsorvente sustentável para tratamento de águas e solos (GWENZI *et al.*, 2017). O *biochar* é capaz de absorver elementos químicos como o arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), zinco (Zn), considerados metais pesados. Todas estas substâncias fixam-se no solo em consequência do uso desordenado e inadequado de herbicidas, inseticidas e outros produtos nocivos ao ambiente (SÁNCHEZ-REINOSO *et al.*, 2020). Assim, características como: porosidade alta, capacidade de troca de cátions, resistência no solo e mudanças no pH, fazem com que o *biochar* apresente esta capacidade de adsorção de metais pesados no solo e água, tanto de forma acidental quanto intencional (ASSIS, 2018; SOUZA *et al.*, 2021).

3.4.5. Produção de energia

O produto *biochar* gerado pelo processo de conversão termoquímica (pirólise) é composta por carbono e oxigênio e em menor escala por hidrogênio, enxofre e cinzas, apresentando potencial como combustível para produção de energia. Biomassas lipídicas e lenhocelulósicas são as fontes de matéria-prima mais utilizadas nas indústrias de bioenergia, para produção de biocombustíveis. A biomassa lipídica é essencialmente composta por triglicerídeos, estrutura carbonosa, poucos átomos de oxigênio e fraca solubilidade em água, diferente do *biochar* por exemplo. Já a biomassa lignocelulósica é composta por celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, com estrutura rica em carbono e oxigênio, além de elevada umidade em seu estado bruto, o que, convertida em *biochar*, se torna grande potencial para produção de energia (MOLINO *et al.*, 2014). Por isso, a utilização da biomassa carbonizada como combustível contribui não só para a segurança energética, mas também para o crescimento econômico, fazendo com que diminua a busca por combustíveis fósseis, contribuindo para o meio ambiente (NIZAMUDDIN *et al.*, 2017).

Contudo, a conversão termoquímica baseia-se no fornecimento de calor à biomassa, na presença ou não de agente oxidante (AHMED *et al.*, 2018). O princípio deste processamento térmico é reduzir o teor de oxigênio da matéria-prima a fim de aumentar

sua densidade energética, criando ligações carbono-carbono de modo a aumentar o peso molecular do combustível final (FERREIRA *et al.*, 2009).

Este potencial foi estudado por alguns autores, em que o *biochar* produzido pode ser utilizado em caldeiras e fornos tubulares (fornos comerciais, tais como pizzarias, padarias) e também no uso doméstico, em lareiras e churrasqueiras, por exemplo (VIEIRA *et al.*, 2009; PEDROZA *et al.*, 2014). Corroborando, Ahmad *et al.*, 2014 sintetizaram a composição elementar (teor de carbono entre 53% a 96%), capacidade calorífica (20-36 MJ kg⁻¹) e os rendimentos (30-90% em peso) de diferentes *biochars* oriundos da pirólise de diferenciadas matérias primas em diferentes taxas de aquecimento e temperatura, onde verificaram que o alto poder calorífico do *biochar* o torna atraente para algumas aplicações de combustível como substituto do carvão.

3.4.6. Logística Reversa de resíduos florestais

A logística reversa é um instrumento introduzido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que consiste em um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, sendo em seu próprio ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou, em último caso, sua destinação final ambientalmente adequada.

Além dos resíduos já instituídos pela Política Nacional que devem passar obrigatoriamente pelo sistema de logística reversa, como pilhas e baterias, pneus, lâmpadas, entre outros, os resíduos gerados pela cadeia produtiva florestal também podem entrar neste ciclo. Os resíduos gerados a partir da colheita florestal são elevados e, há algumas décadas atrás, este material era manejado de uma modo tanto quanto primitivo, isto é, enleirados e queimados. Esta prática é reconhecida como danosa ao meio ambiente.

Deixar os resíduos gerados no campo após a colheita têm sido uma prática bastante utilizada, apresentando suas vantagens, como por exemplo a deposição de matéria orgânica e nutrientes, no entanto, se esta prática não for manejada de maneira adequada, pode resultar em problemas como competição por nitrogênio, efeitos alelopáticos, ataque de insetos, dificuldades no preparo do solo e redução do pH (FOELKEL, 2015).

Desta maneira, os resíduos podem retornar de alguma maneira para os seus processos produtivos ou outros processos, como produção de energia (SANTIAGO, 2013; TOMAZ

et al., 2017), móveis e brinquedos (NEJELISKI *et al.*, 2016), pellets e briquetes (SPANHOL, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2019), produção de painéis (YANO e SILVA, 2020; NATALLI *et al.* 2022), e obtenção de outros produtos, tais como a produção de *biochar* (PAGE-DUMROESE *et al.*, 2017; HAN *et al.*, 2020), que pode compor substratos, saindo assim do processo final do ciclo (colheita) e retornando ao início do ciclo, na produção das plantas.

3.5. BIOCHAR NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS

A produção de plantas em viveiro é uma etapa primordial para o estabelecimento de mudas de qualidade no campo. A escolha do substrato, qualidade, as etapas de produção são fatores determinantes para que este objetivo seja alcançado. Por isso, a seleção de melhores arranjos da composição de substrato que apresentem boas características físico-químicas, preço acessível, bem como da disponibilidade de matéria-prima que possa ser utilizada são importantes, podendo contribuir para, além da melhoria da qualidade das mudas, também na mitigação de possíveis problemas ambientais, provenientes da não utilização de resíduos industriais, urbanos e agroindustriais, que podem suprir a necessidade e compor arranjos de substratos (TRAUNTENMÜLLER *et al.*, 2016).

O setor de viveiros e produção de substratos se caracteriza pela alta demanda por insumos externos. Sendo um setor altamente determinante, está sempre na busca por alternativas viáveis para melhorar a qualidade de seus produtos, uma vez que, esta tecnologia deve ser ao mesmo tempo econômica e ambientalmente adequada. A composição de substratos é muito variada, sendo que cada planta responde de forma diferenciada a cada combinação de seus componentes. Portanto, um bom substrato deve atender à demanda específica de uma espécie de planta para seu bom desenvolvimento. Características como porosidade, densidade, retenção hídrica, assim como as características físico-químicas no geral são determinantes para obtenção de substratos que propiciem boa qualidade na produção de mudas. Todos estes aspectos são observados a partir das propriedades do *biochar*, que, desta forma, com sua aplicação, irá favorecer o enraizamento das mudas de forma mais profunda nos solos, com maior concentração hídrica e de ar, fazendo com que as plantas se desenvolvam melhor, gerando mudas de qualidade requerida (NÓBREGA, 2011; FRANCO, 2019).

Uma vez que o substrato é um dos principais insumos utilizados para produção de mudas (KRATZ *et al.*, 2013) e seu custo impacta muito no valor final das mudas, a busca

por materiais provenientes de materiais orgânicos a base de casca de árvore, turfa, pó de coco, palha de arroz, vermiculita e demais materiais sustentáveis se torna importante, pois acrescidos de fertilizantes químicos que possuem alto custo, está associado a obtenção destes materiais, que acaba aumentando o custo de produção das mudas (ARAÚJO *et al.*, 2017; LUSTOSA FILHO *et al.*, 2015).

Por essa razão, a busca por alternativas mais baratas e sustentáveis se fazem importantes. O aproveitamento de resíduos orgânicos para produção de mudas se faz como uma alternativa, que além de diminuir os custos, auxilia na preservação do meio ambiente e na diminuição de impactos ambientais causados pelo descarte de resíduos (ARAÚJO *et al.*, 2017). O *biochar* é um material de origem renovável, proveniente do processamento de resíduos diversos e que tem se apresentado como uma boa opção para o setor de viveiros. Além de atuar como condicionante, isto é, proporcionando melhorias nas características físico-químicas do substrato, tais como densidade, retenção de água, porosidade, CTC, pH, ainda pode atuar como fertilizante, disponibilizando nutrientes às plantas, conforme for a composição da matéria-prima utilizada na produção do *biochar*, influenciando na qualidade, nutrição e crescimento das plantas (GLASER e LEHMAN, 2002; DUMROESE *et al.*, 2011; BIEDERMAN e HARPOLE, 2013; LAGHARI *et al.*, 2016; SULIMAN *et al.*, 2017).

Retenção de água e nutrientes em sua matriz com capacidade de liberá-los de forma equilibrada para as mudas são propriedades presentes no *biochar*, que o tornam desejável na composição de substratos, podendo diminuir os custos com irrigação e fertilização (PIMENTA *et al.*, 2019; MAIA *et al.*, 2011). Além de sua estrutura ser rica em carbono, o *biochar* apresenta elevada capacidade de troca catiônica, resultado da ação do carbono pirogênico no solo, promovendo a diminuição da lixiviação dos nutrientes e maior retenção de água no substrato, garantindo assim a maior eficiência na utilização dos nutrientes e redução dos custos com adubação (LEHMANN e JOSEPH, 2012). Estes fatores, ainda, podem promover o aumento significativo das raízes, aumentando o crescimento e produtividade, e, combinado com solo rico em nutrientes ou aliado a fertilizantes, potencializa o desenvolvimento das plantas (LIMA *et al.*, 2016).

3.6. UTILIZAÇÃO DO *BIOCHAR* NA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS

Um dos parâmetros mais importantes na produção de mudas de qualidade é a composição do substrato (TERRA, 2011). O crescimento, qualidade e custos de produção de mudas são influenciados pelos componentes utilizados na produção de substratos,

assim, o uso do *biochar* na produção de mudas de espécies florestais pode ser uma prática econômica e ambientalmente adequada (MÉNDEZ *et al.*, 2012; SIMÕES; SILVA; SILVA, 2012). Na Produção de mudas, para obtenção de boas características do substrato, essenciais para boa qualidade e crescimento das plantas, tais como densidade, CTC, retenção de água, aeração, porosidade, a utilização do *biochar* como condicionador se apresenta como uma alternativa viável e positiva, pois apresenta potencial de melhoria destas características aos substratos, além de poder ainda disponibilizar nutrientes às plantas, de maneira que, contribui diretamente para melhoria das características físico-químicas e biológicas (GLASER e LEHMANN, 2002; LAIRD *et al.*, 2010; DUMROESE *et al.*, 2011; BIEDERMAN e HARPOLE, 2013; LAGHARI *et al.*, 2016; SULIMAN *et al.*, 2017; WOICIECHOWSKI *et al.*, 2018).

Estudos vêm comprovando a efetividade de uso do *biochar* na composição de substratos, proporcionando melhorias às características e qualidade das mudas. Ao aplicar *biochar*, a densidade diminui, aumenta o volume de poros, aumentando assim a retenção de água, auxiliando no ponto de murcha permanente (ABEL *et al.*, 2013). Conforme observado por Chidumayo (1994), que verificou melhoria na emergência das sementes de sete espécies arbóreas avaliadas na Zâmbia, e ainda, observou que o crescimento das mudas de seis, das sete espécies avaliadas, foi maior quando o *biochar* foi utilizado como componente de substrato. Resultados similares foram observados por Gonzaga *et al.* (2018), que notou melhorias no crescimento e características morfológicas de mudas de eucalipto. Rezende *et al.* (2016) reportou melhoria nos parâmetros de crescimento, mas para a espécie *Tectona grandis* (Teca) e Silva *et al.* (2018) para a espécie de *Eucalyptus grandis*.

Petter *et al.* (2012) verificou que a adição de 7,5% de *biochar* ao substrato promoveu o desenvolvimento de mudas de eucalipto de melhor qualidade, no entanto, doses acima de 15% reduziram a qualidade das mudas. Também verificou uma melhor resposta do *Eucalyptus citriodora* quando comparado ao *Eucalyptus urophylla*. Comparando substrato comercial (Bioplant) com concentrações diferentes de *biochar* (5%, 10%, 15% e 25%), proveniente da pirólise do endocarpo e exocarpo do cafeeiro, Melo e Silva (2018) observaram melhores resultados na composição Bioplant com 10% de *biochar*. Ao avaliar o crescimento de mudas de quatro espécies florestais produzidas em solos adubados com nove tipos de biocarvão provenientes de coníferas e folhosas, Pluchon *et al.* (2014) notaram que, de modo geral, ocorreu efeito positivo ou neutro no crescimento das mudas com adição do *biochar*.

De forma similar, Lima *et al.* (2016) verificaram que, apesar de não afetar o crescimento, a interação entre doses de *biochar* e os macronutrientes N e P promovem efeitos positivos sobre a qualidade de mudas, mostrando potencial em sistemas de produção, o que comprova a possibilidade de o *biochar* atuar na disponibilização de nutrientes às plantas. Esta propriedade está atrelada a alta capacidade na troca de cátions e com isso, diminui a lixiviação de nutrientes catiônicos quando adicionado ao meio. Isto, contribui para a germinação das sementes, crescimento das plantas e rendimento da colheita (FERREIRA *et al.*, 2018). Ainda, Pimenta *et al.* (2019), realizaram estudos em casa de vegetação, avaliando o efeito de *biochar* obtido a partir da madeira de cajueiro em solos arenosos, utilizando vasos cultivados com arroz (*Oryza sativa* L.) e feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) e constataram a ação do composto como condicionador, elevando o pH e os teores de potássio (K) e fósforo (P) disponíveis no solo, apesar de também elevar a porcentagem de sódio trocável.

Barros *et al.* (2016) avaliaram a utilização de *biochar* ativado (proveniente de resíduos madeireiros) na composição de substratos para mudas de eucalipto. Avaliaram diferentes composições de substratos: fibra de coco e casca de arroz carbonizada (1:1, v/v); comercial (SC), casca de pinus e vermiculita (4:1, v/v); SC com *biochar* ativado (BA) e *biochar* (B) em diferentes proporções (25%; 50% e 75%); dois substratos puramente compostos com BA e B. Concluíram que o SC e os tratamentos com *biochar* ativado (25%, 50%, 75% e 100%) e *biochar* (75% e 100%) proporcionaram as maiores massas secas totais das mudas. Já para altura e diâmetro do coleto, os tratamentos com 75% e 100% de *biochar* ativado e com 75% e 100% de *biochar* resultaram nos maiores crescimentos em altura e diâmetro do coleto. Já utilizando pó-de-serra transformado em *biochar*, Barros (2017) concluiu que este pode ser uma alternativa de aproveitamento dos resíduos, apresentando potencial de uso na composição de substratos para produção de mudas de eucalipto. Apesar de apresentar boas condições e características que contribuem no processo de formação das plantas bem como na melhoria da qualidade dos substratos, alguns estudos demonstraram que o uso do *biochar* em altas concentrações pode obter efeitos negativos. É o que foi observado por Basílio *et al.* (2020) que verificou que substratos compostos apenas com *biochar* da casca de pequi, demonstrou ser um material inadequado para a produção de mudas de *Eucalyptus urophylla*. Porém, ao associar o *biochar* em menores proporções (<25%) a outro material de origem orgânica, com o substrato comercial, confere melhorias às propriedades físico-químicas do substrato.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO E ÁREA DO ESTUDO

O presente trabalho foi dividido em três etapas, realizadas em áreas distintas. A primeira etapa consistiu na coleta do material, onde utilizou-se uma área experimental de *Pinus taeda*, com 14 e 15 anos de idade, espaçamento 3x2m, sem manejo e adubação, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, no município de Irati, região centro-oeste do Paraná. O clima da região é classificado de acordo com Köppen como temperado, com verões amenos, invernos com ocorrências de geadas severas e frequentes, não apresentando estação seca, com amplitude térmica média e significativa. O solo é caracterizado pela presença de siltitos, argilitos e folhelhos sílticos de cor cinza clara a escura.

Após coleta e preparação do material (separação, secagem, moagem e classificação) (item 4.2), este foi conduzido até a Universidade de Caxias do Sul (UCS). A produção do *Biochar*, que consistiu na segunda etapa do estudo, foi realizada na Unidade rural da UCS, na Fazenda Escola, localizada em Fazenda Souza, no interior do município de Caxias do Sul, com as seguintes coordenadas geográficas (28°81'44.12 – 51°42'55.94). utilizando o reator de pirólise da fazenda experimental da Universidade. A terceira etapa consistiu na caracterização do produto, que ocorreu, em parte, nos laboratórios de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais e BIO-3, da Universidade Estadual do Centro-Oeste e, posteriormente, no laboratório de Edafologia, da Faculdade de Farmácia, na Universidade de Santiago de Compostela (USC), Santiago de Compostela, Galícia, Espanha. Um resumo do procedimento metodológico, juntamente com as etapas do estudo estão descritas na Figura 1.

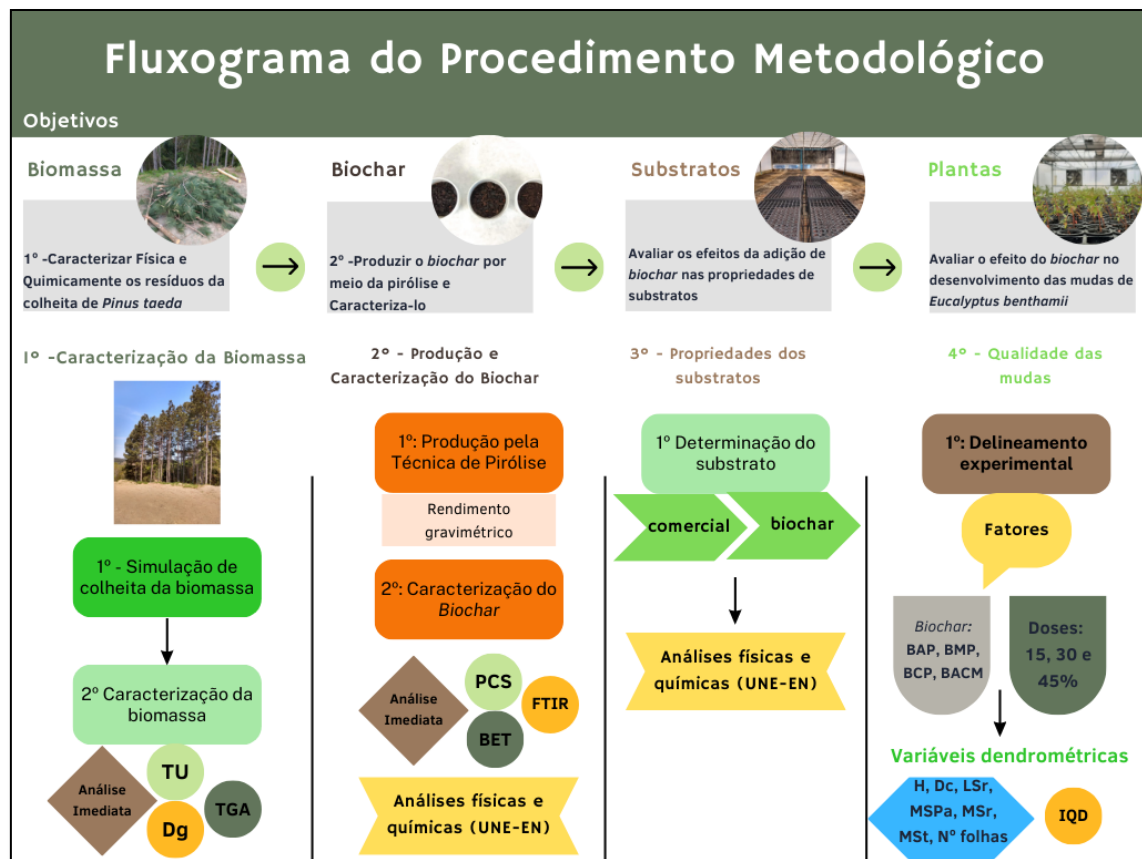


Figura 1. Fluxograma do Procedimento Metodológico desenvolvido no estudo. Onde: TU= Teor de umidade; Dg= Densidade a granel; TGA= Análise termogravimétrica; PCS= Poder calorífico superior; BET= Área superficial e Tamanho de poros; FTIR= Infravermelho por transformada de Fourier; BAP= Biochar de acículas de pinus; BMP= Biochar de madeira de pinus; BCP= Biochar de casca de pinus; IQD= Índice de qualidade de Dickson.

4.2. COLETA DO MATERIAL

O material utilizado para compor o presente estudo foram os resíduos provenientes da colheita de *Pinus taeda*. Foi realizada uma simulação da colheita do *Pinus* spp., onde foram selecionadas ao acaso quatro árvores, seccionadas e divididas nos três compartimentos (resíduos), sendo estes: fração madeira (galhos e ponteiros), fração folhas e fração casca, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2. Resíduos da colheita florestal de *Pinus* spp. A= madeira (galhos e ponteiros); B= casca; e C= Acículas.

Após a simulação da colheita, o material, que foi coletado *in natura*, passou pelo processo de separação dos diferentes compartimentos (acículas, casca e madeira), acondicionados em recipientes de rafia, posteriormente pesados para realização da estimativa da quantidade de resíduos gerada por árvore e conduzidos ao laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO, *campus* Irati-PR, para sua caracterização.

4.3. PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

4.3.1. Teor de umidade e Densidade a granel

Em primeiro momento, após coleta dos resíduos, foram retiradas amostras para determinação do teor de umidade, onde estas foram pesadas com auxílio de uma balança analítica e colocadas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 105° C, por 24h. Após o período de secagem, as amostras foram submetidas a pesagem novamente, para determinação dos cálculos, conforme descrito na Equação 1.

$$TU = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad (1)$$

Onde: TU = teor de umidade (%)

Pu = peso úmido do material

Ps = peso seco do material

Para determinação da densidade a granel, os resíduos foram submetidos primeiramente a secagem em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 50°

C. Após a secagem, as acículas e cascas foram submetidas à moagem com o auxílio de um moinho de martelos, em uma malha de 3 mm. Já a fração madeira, constituída por galhos e ponteiros foram primeiramente picados com auxílio de um picador florestal para reduzir o material em cavacos e, só assim, então submetidos à moagem em moinho de martelos, em malha de 3 mm.

Por conseguinte, deste mesmo material, foram coletadas amostras para determinação da densidade a granel, pesadas com auxílio de balança analítica para determinação dos cálculos, de acordo com a Equação 2.

$$D_{gran} = \frac{P_{biom}}{V_{recip}} \quad (2)$$

Onde:

D_{gran} = densidade a granel (g/cm³)

P_{biom} = peso da biomassa (kg)

$V_{recip.}$ = volume do recipiente (cm³)

4.3.2. Análise Imediata

A análise imediata consiste na determinação dos componentes brutos da biomassa, tais como umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. Para esta, os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM D1762 – 84 (2013) foram seguidos.

4.3.2.1. Matéria volátil

Na determinação da matéria volátil foram utilizadas das mesmas amostras da análise de densidade a granel. Os cadinhos foram, primeiramente, pré-aquecidos na borda externa da mufla (tampa) por 2 minutos (T = 300° C) e por mais 3 minutos na extremidade da mufla (T = 500° C).

Em seguida, as amostras foram colocadas na parte interior do forno, com temperatura inicial regulada em 950° C, permanecendo fechada por 6 minutos. Dado este período, as amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas. Após obtenção dos dados, os cálculos foram realizados seguindo a Equação 4.

$$TV = \frac{m_{105} - m_{950}}{m_{105}} \times 100 \quad (4)$$

Onde: TV = teor de voláteis
m105= massa da amostra após secagem a 105 C° (g)
m950 = massa da amostra, após aquecimento a 950 °C (g)

4.3.2.2. Teor de Cinzas

Para determinação do conteúdo de cinzas da biomassa, os cadinhos foram colocados no interior da mufla, à temperatura de 750° C por 6 horas, resfriados e pesados. Os cálculos serão efetuados de acordo com a Equação 5.

$$TZ = \frac{m750}{m105} \times 100 \quad (5)$$

Onde: TZ = teor de cinzas
m105= massa da amostra após secagem a 105 C° (g)
m750 = massa do material, após aquecimento a 750° C (g)

4.3.2.3. Teor de Carbono Fixo

Por fim, a determinação do teor de carbono fixo foi obtida pela diferença, descontando os teores de materiais voláteis e cinzas, conforme especificado na Equação 6.

$$TC = 100 - (TV + TZ) \quad (6)$$

Onde: TC = teor de carbono fixo (%)

4.3.3. Análise Termogravimétrica da biomassa

A técnica de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (TGA) é utilizada para avaliar a estabilidade térmica do material combustível. Para esta análise, utilizou-se um analisador da marca Mettler, modelo STA 499, F3 Jupiter (Figura 3), do laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBio), da Universidade de Caxias do Sul.



Figura 3. Analisador termogravimétrico (TG e TGA).

Para esta técnica, uma amostra de 10mg do material foi submetida a atmosfera específica de nitrogênio de alta pureza, com fluxo de 20 ml/min^{-1} , em um intervalo de 50 a 800° C . A razão de aquecimento utilizada foi de $20^\circ \text{ C/min}^{-1}$, em um intervalo de 50 a 800° C .

Posteriormente à esta análise, o teor de resíduo obtido em 800° C foi determinado a partir da massa do resíduo após a análise e a massa da amostra utilizada, assim descrita na Equação 7.

$$R = \frac{m_r}{m_a} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

- R = teor de resíduo (%)
- m_r = massa do resíduo de amostra após a análise (g)
- m_a = massa da amostra utilizada (g)

4.4. PRODUÇÃO DO *BIOCHAR*

Após o preparo e caracterização da biomassa, a mesma foi conduzida até o Laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBio), da Universidade de Caxias do Sul, onde ocorreu a produção do *Biochar*.

Foram produzidos três tipos de *biochar* de cada um dos resíduos (posteriormente descritos como compartimentos) da espécie *Pinus taeda*, gerados a partir da simulação da colheita florestal. As biomassas residuais selecionadas foram seccionadas em três distintos compartimentos, sendo estes como: i) acículas de pinus (AP); ii) casca de pinus (CP); e iii) madeira de pinus (MP) (Tabela 2).

Tabela 2. Desenho experimental para produção do *biochar*.

<i>Biochar</i>	Composição (%)			Granulometria
	Acículas	Casca	Madeira	mm
Bap	100	0	0	≥ 5
Bcp	0	100	0	≥ 5
Bmp	0	0	100	≥ 5
Bacm*	35	15	50	≥ 5

*: A proporção de cada material foi determinada em função da porcentagem de cada resíduo que é gerada por árvore na colheita, feita após estimativa na simulação de colheita realizada no presente estudo.

A partir deste seccionamento e separação da biomassa residual elencada, a produção do *biochar* ocorreu com auxílio de um reator de pirólise localizado em fazenda experimental da Universidade de Caxias do Sul (Figura 4).



Figura 4. Reator de pirólise do tipo rosca transportadora-screw reator (Pirólise de biomassas/resíduos). Nota: ZE= zona de entrada; ZI= zona intermediária; ZS= zona de saída; CO= coletor.

Para este reator, a pirólise das partículas do material ocorre por sua passagem numa rosca transportadora que possui 2m de comprimento, diâmetro e passo ambos de 195mm. O material se desloca por 1,34m até a saída de descarga do *biochar* num coletor de 40 litros. O motor que aciona a rosca transportadora é controlado por um inversor de frequência que permite controlar a velocidade de alimentação e, com isso, o tempo de residência dos sólidos no processo de pirólise. A Figura 5 apresenta um fluxograma do reator, onde é possível identificar cada uma das partes que o compõem.

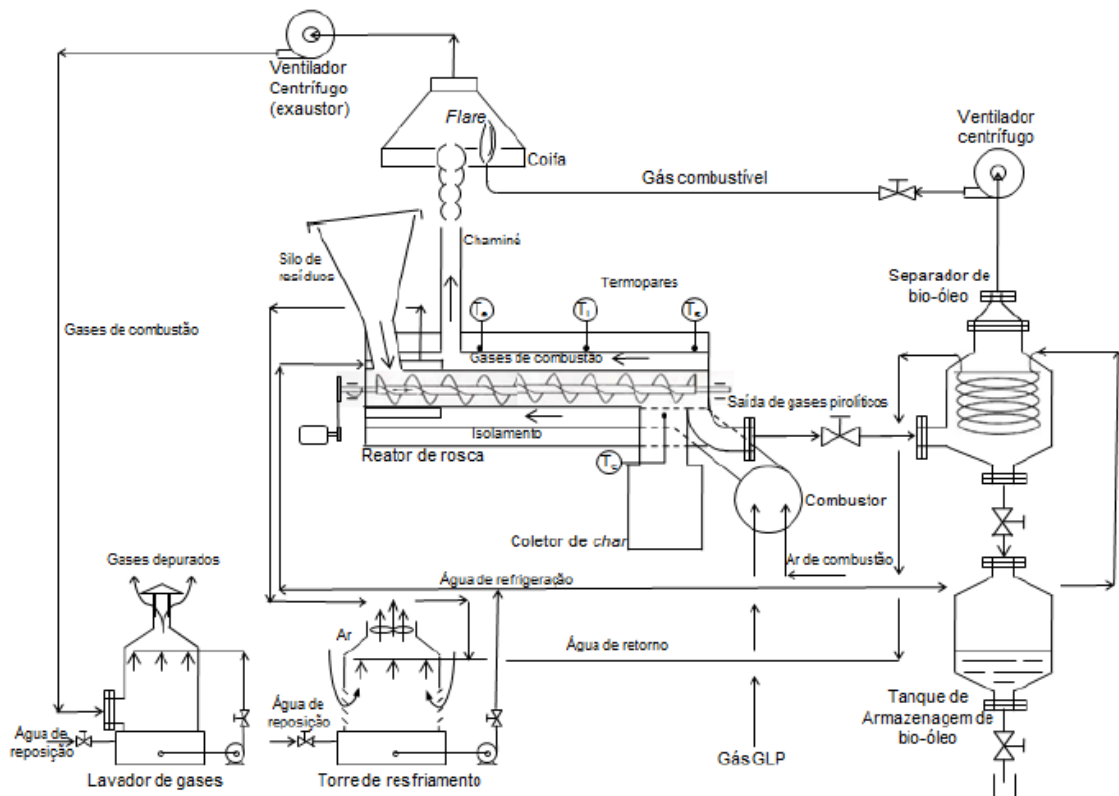


Figura 5. Fluxograma do reator de pirólise do tipo rosca transportadora. Fonte: Ferreira, 2013.

O corpo do reator consiste numa câmara de combustão anelar cilíndrica de diâmetro interno de 200 mm e diâmetro externo de 300 mm. Essa câmara é aquecida por um combustor alimentado com gás GLP e possui 3 zonas de aquecimento onde as temperaturas são monitoradas e controladas por termopares: entrada; intermediária e saída (Figura 4). Neste caso, as pirólises são realizadas em ausência de oxigênio e com inversor de frequência regulado em 1 Hz, o que resulta em um tempo de, aproximadamente, 30 min entre a alimentação e descarga do material.

A avaliação ocorreu apenas com relação ao tipo de biomassa utilizada no processo de produção (acículas, cascas e madeira), onde os parâmetros utilizados no decorrer do processo de pirólise foram os mesmos. A temperatura utilizada foi de 350 °C, onde a partir de um ensaio a frio determinou-se um tempo de residência da biomassa, desde alimentação até saída no coletor, de 30 min, resultando, desta maneira, em uma taxa de aquecimento de 11 °C/min. Para as acículas e cascas, foram realizados 4 ensaios, já para a madeira, foram 3 ensaios.

4.4.1. Rendimento gravimétrico do *biochar*

Após a finalização do processo, em cada tomada de amostras foram pesados a quantidade de biomassa ao entrar no reator e, posterior, a quantidade de *biochar* produzida, onde foi possível calcular a produção de massa do *biochar*, de acordo com a equação 8. A produção de massa e/ou rendimentos gravimétricos (RG) foram calculados a partir da massa do *biochar* produzido pela massa das amostras secas (CCS) em estufa a 103 ± 1° C (Equação 15).

$$RG = \left[100 \times \left(\frac{\text{massa biochar}}{\text{biomassa seca } 105^{\circ}} \right) \right] \quad (8)$$

Onde: RG = rendimento do *biochar* (%)
Mcp = massa do *biochar* produzido (g)
Mccs = massa das amostras (g)

Após a produção do *biochar*, o bioóleo foi quantificado, sendo este coletado e pesado. Os gases não condensáveis foram quantificados por diferença.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DO *BIOCHAR*

A caracterização do *biochar* consistiu na determinação das análises físicas e químicas. A análise química consistiu na análise imediata, onde nesta foram determinados os seguintes parâmetros: teor de umidade, matéria volátil, cinzas, teor de carbono fixo e rendimento em carbono fixo; do poder calorífico superior (PCS). As análises físicas foram área superficial, tamanho e volume de poros (análise BET) e análise por Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), conforme descrito abaixo.

4.5.1. Análise Imediata

A determinação da análise imediata do *biochar* foi conforme os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM D1762 – 84 (2013), seguindo o roteiro descrito na caracterização da biomassa, conforme o item 4.3.2, que consistiu na determinação do teor de matéria volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo.

4.5.1.1. Rendimento em carbono fixo

A partir dos resultados do rendimento gravimétrico e da análise imediata do *biochar*, efetuou-se o cálculo do rendimento em carbono fixo, conforme a Equação 9.

$$RCF = RG \times CF_{cp} \quad (9)$$

Onde: RCF = rendimento em carbono fixo (%)
RG = rendimento gravimétrico (%)
CF_{cp} = carbono fixo do carvão produzido (%)

4.5.2. Poder Calorífico Superior (PCS)

Na estimativa do poder calorífico superior, foram utilizados os dados gerados a partir da análise química imediata e, para realização dos cálculos, utilizou-se a equação desenvolvida por Parikh *et al.* (2005).

Esta foi desenvolvida para estimar o PCS de biomassa, carvão e outros combustíveis sólidos, utilizando os teores de carbono fixo, matéria volátil e cinzas e é descrita pela Equação 10.

$$PCS = [(0,3536 * TC + 0,1559 * TV - 0,0078 * TZ) * 238,8] \quad (10)$$

Onde: PCS = poder calorífico superior (Kcal/kg)
TC = teor de carbono fixo (%)
TV = teor de voláteis (%)
TZ = teor de cinzas (%)

4.5.3. Propriedades físicas e químicas do *biochar*

Foram determinados os parâmetros físico-químicos dos quatro *biochar* produzidos (BAP, BMP, BCP e BACM), a fim de caracterizar o material, no intuito de determinar seu melhor uso posteriormente.

As análises físico-químicas foram realizadas seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma europeia UNE-EN 12579 (2000), que diz respeito à melhoradores de solo e substratos de cultivo. As análises foram realizadas no Laboratório de Edafologia, na Faculdade de Farmácia, da Universidade de Santiago de Compostela, e estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis de determinação das propriedades físicas e químicas do substrato.

Caracterização física	
Variável	Metodologia
Densidade aparente seca	UNE-EN 13041 (1999)
Volume de ar	UNE-EN 13041 (1999)
Volume de água	UNE-EN 13041 (1999)
Valor de contração	UNE-EN 13041 (1999)
Porosidade total	UNE-EN 13041 (1999)
Caracterização química	
Variável	Metodologia
Potencial hidrogênico (pH)	UNE-EN 13037 (1999)
Condutividade elétrica	UNE-EN 13038 (1999)
Conteúdo de matéria orgânica e cinzas	UNE-EN 13039 (1999)
Extração de nutrientes e elementos solúveis em água	UNE-EN 13652 (2001)
Extração de nutrientes e elementos totais	UNE-EN 13652 (2001)
Relação C/N	UNE-EN 13654-1 (2001)
Metais pesados	UNE-EN 13650 (2002)

4.5.4. Determinação da área superficial e tamanho de poros do *biochar* (BET)

A superfície e a área de superfície de microporos e volume de poros do *biochar* produzido foi estimado utilizando as isotermas de Brunauer, Emmett and Teller (BET), e os métodos t-plot, respectivamente.

As determinações de BET dos *biochars* foram realizados em um analisador de área de superfície e tamanho de poros, fornecido pela Quantachrome Instruments, modelo New 1200e, por adsorção de N₂ a 77k (Figura 6).



Figura 6. Analisador de superfície Quantachrome Instruments, modelo New 1200, análise BET.

O volume total de poros foi estimado como volume líquido de N_2 , a uma alta pressão relativa (quando comparada a pressão atmosférica) unidade próxima 0,99. O método t-plot foi aplicado para o volume de microporos e o volume de mesoporos foi obtido pela dedução do volume de microporos para o volume total de poros. As análises foram realizadas no Laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBio), da Universidade de Caxias do Sul.

4.5.5. Análise por Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A fim de verificar os grupos funcionais presentes no *biochar*, bem como as possíveis alterações devido ao aumento de temperatura durante o processo de pirólise, foi realizada a análise por Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), na Universidade Federal de Santa Maria, utilizando um espectrofotômetro FTIR, da marca Shimadzu, modelo IR Prestige 21. O método utilizado foi por pastilha de KBr, transmitância direta, com 45 scans e uma faixa de leitura entre 400 e 4500 cm^{-1} (Figura 7).



Figura 7. Espectrofotômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR, Shimadzu, IR Prestige 21.

Uma pequena quantidade de amostra de *biochar*, secas e moídas, foram misturadas com bromato de potássio (KBr) e prensada sob vácuo, a aproximadamente 5t. O espectro infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi desenvolvido em modo de transmitância com faixa de número de onda de 4000-500 cm^{-1} .

4.6. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE *BIOCHAR* NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS DE CULTIVO

4.6.1. Preparo do substrato de cultivo

O substrato base utilizado como controle e para combinação com os diferentes tipos de *biochar* produzidos neste trabalho foi um substrato comercial da empresa Mecplant Florestal tipo 1C, apresenta umidade média entre 54 e 58%, sua densidade (peso/volume) sem compactação situa-se entre 360 e 400 g/litro, com média de 375 g/litro. De granulometria 6mm, composto por casca de *Pinus*, vermiculita, calcário, NPK e supersimples. O processo de formulação do substrato de cultivo (substrato comercial + *biochar*) foi realizado conforme os padrões utilizados em viveiro comercial. Os tratamentos e suas respectivas proporções foram determinados em função da literatura, de misturas já realizadas e do que se percebe como sendo ideal, sendo estabelecido o delineamento experimental, descrito na Tabela 3, apresentada no item 4.7.1.

4.6.2. Caracterização físico-química dos substratos

Foram determinados os parâmetros físico-químicos do substrato comercial (tratamento testemunha), sendo este denominado de SB100 para fins experimentais, juntamente com os tratamentos de plantio, que apresentaram *biochar* em sua composição

(demais tratamentos), no intuito de avaliar os efeitos de sua incorporação nas propriedades finais dos substratos.

As análises físico-químicas foram realizadas seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma europeia UNE-EN 12579 (2000), que diz respeito à melhoradores de solo e substratos de cultivo. As análises foram realizadas no Laboratório de Edafologia, na Faculdade de Farmácia, da Universidade de Santiago de Compostela.

4.6.2.1. Propriedades físicas

Em um primeiro momento, as amostras foram pesadas em recipientes, para realização dos cálculos de seu volume, medidos os respectivos diâmetros e altura correspondente da amostra (Equação 11).

$$V1 = \{\pi x(0,5d1)^2 x h1\} \quad (11)$$

Onde: V_1 = volume do recipiente (cm³)
 d_1 = diâmetro do recipiente (cm)
 h_1 = altura da amostra (cm)

Após os cálculos de volume, determinou-se a densidade aparente seca das amostras, conforme a Equação 12.

$$Dbd = \frac{m3 - m1}{V1} x 1000 \quad (12)$$

Onde: Dbd = densidade aparente seca (kg/m³)
 m_1 = massa do recipiente (g)
 m_3 = massa da amostra seca mais o recipiente (g)
 V_1 = volume do recipiente (cm³)

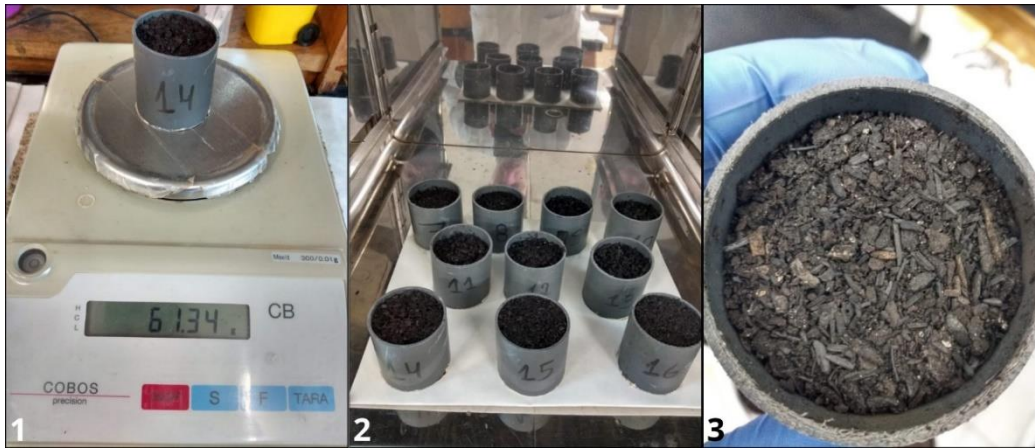


Figura 8. Procedimentos de determinação do Volume e Densidade Básica Aparente

Calculados os parâmetros de volume e densidade do material, foram determinadas as concentrações de matéria orgânica e cinzas. Para estas, em um primeiro momento, foram colhidos cadinhos de porcelana, anteriormente calcinados, colhidos sua massa e pesadas aproximadamente 5g de amostras. Em seguida, as amostras foram colocadas na mufla e submetidas a uma temperatura de 450° C, por 6h. Após este período, as amostras foram retiradas, colocadas em dessecador e posteriormente pesadas. Os cálculos foram determinados conforme as Equações 13 e 14.

$$W_{mo} = \frac{m1 - m2}{m1 - m0} \times 100 \quad (13)$$

$$W_{cen} = \frac{m2 - m0}{m1 - m0} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

- W_{mo}= conteúdo de matéria orgânica (% m/m)
- W_{cen}= conteúdo de cinzas (% m/m)
- m₀= peso do cadinho (g)
- m₁= peso do cadinho mais amostra (g)
- m₂= peso do cadinho mais amostra a 450°C (g)

A determinação da densidade de partícula do material procedeu-se utilizando da Equação 15.

$$Pd = \frac{1}{\left\{ \frac{W_{mo}}{100 \times 1550} \right\} + \left\{ \frac{W_{cen}}{100 \times 2650} \right\}} \quad (15)$$

Onde: Pd= densidade de partícula (kg/m³)
 1550= densidade da matéria orgânica (kg/m³)
 2650= densidade das cinzas (kg/m³)



Figura 9. Obtenção do conteúdo de Matéria Orgânica e Cinzas.

O cálculo da porosidade total do material é determinado após a obtenção da densidade aparente seca e densidade de partículas, e é dado pela Equação 16.

$$P_s = \frac{1000 - Dbd}{Pd} \times 100 \quad (16)$$

Onde: Ps= porosidade total (% V/V)

Por fim, para determinação do volume de água e volume de ar dos materiais, as amostras foram encharcadas, postas em recipientes com volume de 50 ml e pesadas. Estas foram submetidas a uma mesa de sucção do tipo leito de areia, a uma pressão hidrostática de -10 cm. Dado o período, as amostras foram retiradas e submetidas a secagem em estufa, a uma temperatura de 60 °C, por 24h e posteriormente pesadas. Os cálculos foram realizados a partir da Equação 17.

$$W_v = \frac{(m_2 - m_3) + m_3 \times \left(\frac{TU}{100}\right)}{V_1 \times 100} \quad (17)$$

Onde: Wv= volume de água (% V/V)
 V1= volume do recipiente (cm³)

m_2 = massa da amostra úmida mais o recipiente, a uma pressão hidrostática de -10cm

m_3 = massa da amostra seca mais o recipiente, a uma pressão hidrostática de -10cm

O volume de ar das amostras é calculado a partir da diferença entre a porosidade total e o volume de água, conforme a Equação 18.

$$A_v = P_s - W_v \quad (18)$$



Figura 10. Procedimento para obtenção do volume de água e volume de ar das amostras.

4.6.2.2. Propriedades químicas

Foram determinados o pH e condutividade elétrica dos materiais. Para este procedimento, em um primeiro momento, as amostras foram pesadas a um volume correspondente a 60ml, completadas com 300ml de água destilada. As amostras foram levadas a um agitador, por aproximadamente 1h a $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Após agitadas, as amostras foram filtradas. Para determinação do pH utilizou-se de um medidor de pH (A) e para condutividade elétrica, um medidor de condutividade (B) (Figuras 11 e 12).

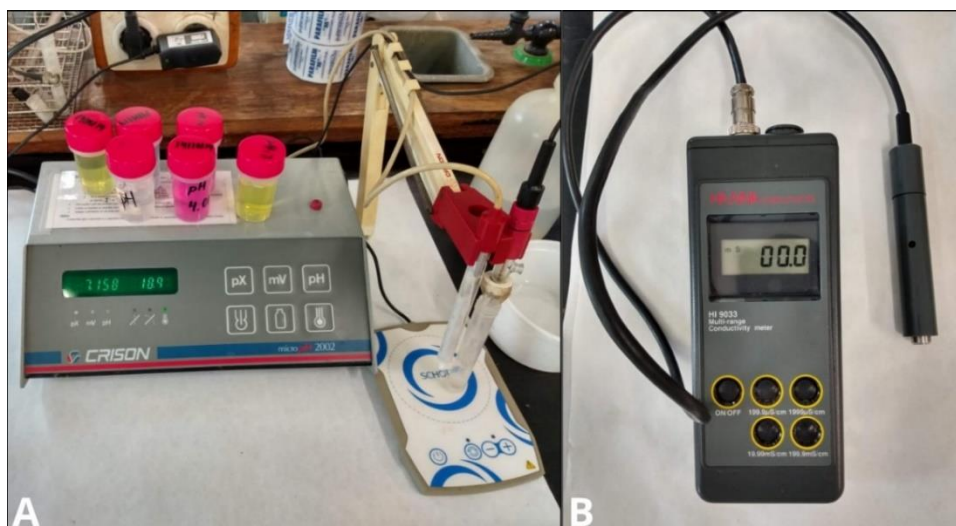


Figura 11. Medidor de pH e medidor de Condutividade elétrica

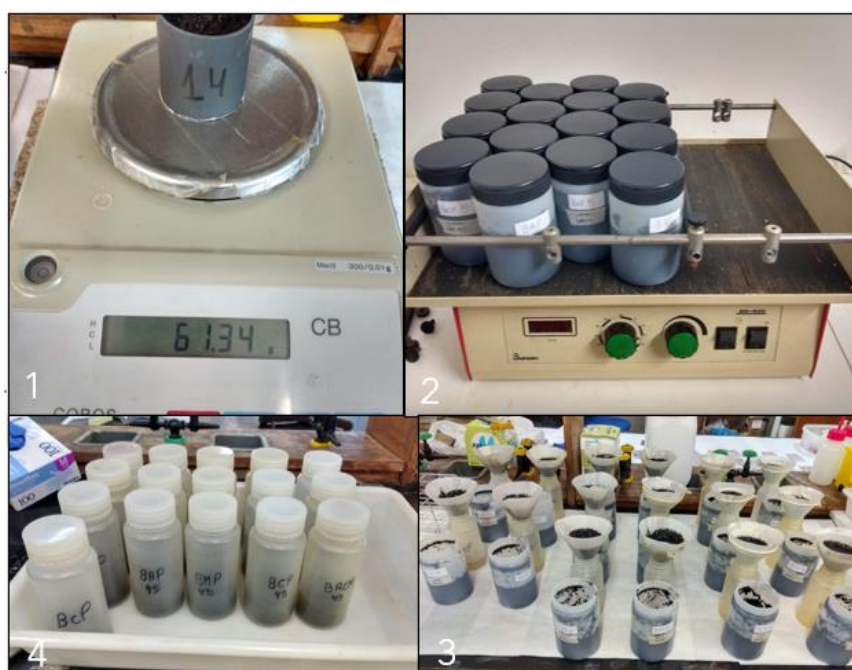


Figura 12. Procedimento para medição do pH das amostras.

Foi realizada a extração dos nutrientes solúveis em água, sendo estes P, Nitrato e Amônio, Ca, Mg, K e Na, dos substratos preparados. Primeiramente, se extraiu uma massa da amostra, em recipientes com 300ml de água destilada. O material foi submetido ao agitador, por 1h e posteriormente as amostras foram filtradas. Quando necessário, as amostras eram diluídas, utilizando Sulfato de Amônio (NH_2SO_4). Os elementos solúveis em água, exceto fósforo, mais os metais pesados, foram determinados utilizando do método da Espectrometria de emissão por chama (ISSO 9964-3:1993). Para o fósforo

utilizou-se o método da Cromatografia Iônica (ISO 10304-2:1995) Os passos para determinação dos elementos estão ilustrados na Figura 13.



Figura 13. Procedimento para determinação dos elementos solúveis em água e fósforo.

A determinação da concentração de metais Pb, Cu, Ni, Cr e Cd, foi utilizada o método de extração de elementos solúveis em água régia, em que as amostras foram pesadas e extraídas a partir de uma solução mesclada de ácido clorídrico e ácido nítrico. Por ser um material com alta concentração de matéria orgânica, as amostras, primeiramente, foram pesadas (1 a 3g) e colocadas na mufla, a 450°C, utilizando para as determinações, apenas as cinzas. Após, estas foram colocadas em tubos de ensaio de vidro, adicionando 21ml de ácido clorídrico, seguido por 7ml de ácido nítrico, agitando.

As amostras foram submetidas a um aparato aquecedor, dentro de uma capela a fim de aquecer as amostras de reação. Após reagir, as amostras são filtradas, adicionando 100ml de água milico, conforme os passos ilustrados na Figura 14.

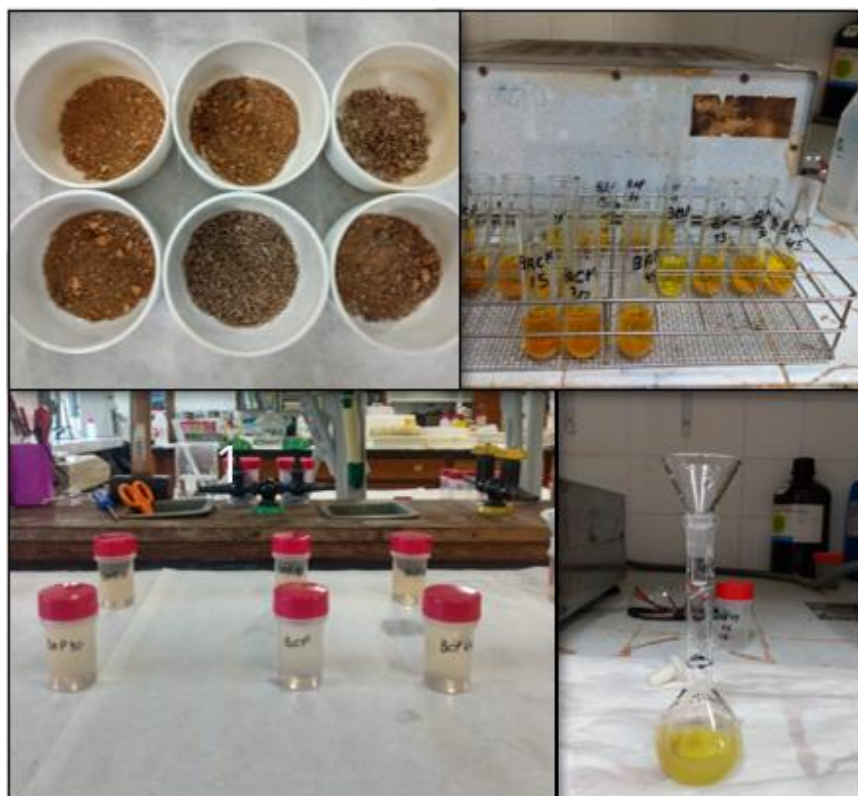


Figura 14. Extração dos elementos solúveis em água régia.

4.7. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO *BIOCHAR* NO DESENVOLVIMENTO DAS MUDAS DE *EUCALYPTUS BENTHAMII*

4.7.1. Delineamento experimental

O experimento utilizando proporções de *biochar* na composição do substrato foi realizado e testado com a espécie *Eucalyptus benthamii*, em casa de vegetação, situada no viveiro da Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO, campus Irati-PR.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC), em esquema fatorial (4 x 3) + 1, sendo composto por quatro tratamentos de diferentes substratos de cultivo, composto pela testemunha (somente substrato comercial) e pelos tratamentos de mistura dos quatro tipos de *biochar* (tipos de *biochar* + testemunha) testados em três diferentes proporções (15, 30 e 45%) de *biochar* na composição dos substratos, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Esquema de montagem do experimento.

Tratamentos	Proporções (% V/V)	
	Substrato de cultivo	Substrato comercial
SB100	0	100
Bap15	15	85
Bap30	30	70
Bap45	45	55
Bcp15	15	85
Bcp30	30	70
Bcp45	45	55
Bmp15	15	85
Bmp30	30	70
Bmp45	45	55
Bacm15	15	85
Bacm30	30	70
Bacm45	45	55

Onde: Substrato de cultivo: com *biochar* na composição; Substrato comercial: substrato base utilizado como testemunha; Bap= *Biochar* de acículas de pinus; Bcp= *Biochar* de casca de pinus; Bmp= *Biochar* de madeira de pinus; Bacm= *Biochar* da mistura dos três.

A avaliação dos efeitos do *biochar* na composição de substratos para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*. foi composta conforme delineamento, onde os tratamentos foram dispostos em tubetes de material polipropileno, com volume de 50 cm³, utilizando oito bandejas de 187 células cada. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições, composto de 13 tratamentos, sendo que cada unidade experimental foi composta por 12 tubetes, com uma planta cada, totalizando 624 avaliações (Figura 15).

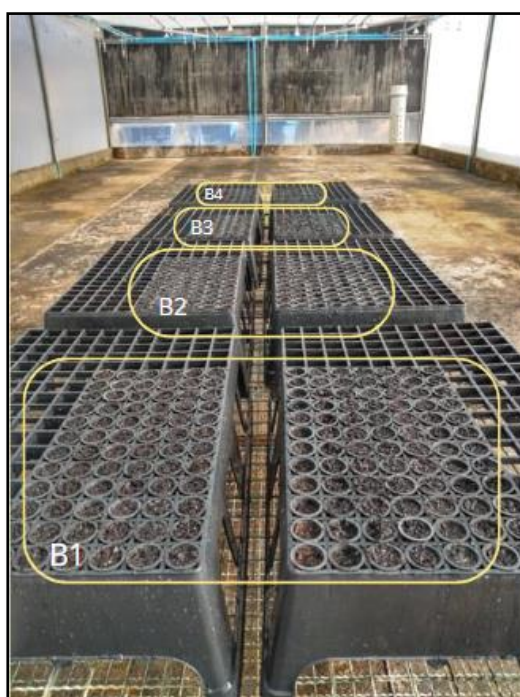


Figura 15. Esquema do delineamento em Blocos ao acaso para o experimento em casa de vegetação.

4.7.2. Produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*.

Após o preenchimento dos tubetes, foi realizada a semeadura direta, utilizando-se aproximadamente 3 sementes de *Eucalyptus benthamii* por tubete.

Os tubetes foram acondicionados em casa de vegetação, sob condições ambientais controladas, com irrigação por aspersão automática numa frequência de três vezes ao dia e, três semanas após a germinação, realizou-se o desbaste, mantendo apenas o indivíduo mais vigoroso por tubete. Aos 120 dias após a semeadura, foram realizadas as avaliações da qualidade das plantas.

4.7.3. Análise do desenvolvimento e qualidade das plantas

Os parâmetros aferidos para avaliar o desenvolvimento e qualidade das plantas foram a altura da parte aérea (H), aferida desde o colo até a inserção da última folha e o diâmetro do colo (D) a 0,5 cm de altura do substrato. As medições foram realizadas aos 30, 60, 90 e 120 dias após a semeadura, com auxílio de um paquímetro digital e uma régua graduada, ilustrados na Figura 16.

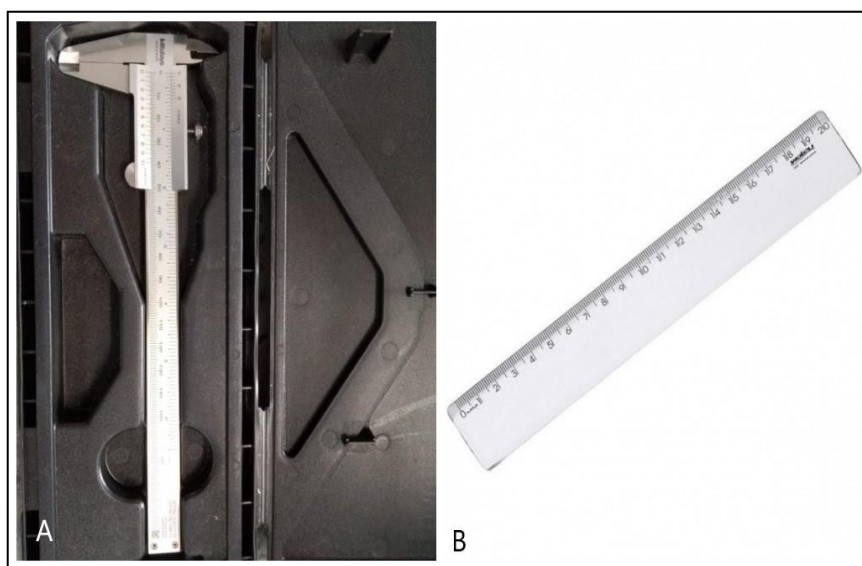


Figura 16. Materiais utilizados para mensurar os parâmetros das plantas. A= Paquímetro digital; B= Régua graduada.

A avaliação da qualidade das plantas, ao final dos 120 dias de experimento, consistiu na determinação da relação entre altura da parte aérea e diâmetro do colo (H/D), relação entre altura da parte aérea e comprimento do sistema radicular (H/SR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca do sistema radicular (MSR), volume de raiz (R), massa

seca total (MS), relação entre a massa seca da parte aérea e massa seca do sistema radicular (RMPAR) e o índice de qualidade de Dickson (IQD).

A massa seca da parte aérea foi obtida através do corte das mudas próximo ao substrato. Para obtenção da massa seca do sistema radicular, as raízes foram lavadas em água corrente, sobre uma peneira e acondicionadas em sacos de papel. Posteriormente, o material foi submetido a secagem em estufa de circulação forçada de ar, a temperatura de 70° C por um período de 72h, e, posteriormente, efetuou-se a pesagem, com auxílio de uma balança eletrônica de precisão (0,01g), até atingir peso constante (Figura 17).



Figura 17. Análise destrutiva para obtenção dos parâmetros de qualidade das mudas.

Para obtenção do índice de qualidade de Dickson (IQD), foi utilizado modelo determinado por Dickson *et al.* (1960), descrito a seguir (Equação 11).

$$IQD = \frac{MST(g)}{\frac{H(cm)}{DC(cm)} + \frac{PMSPA(g)}{PMSRA(g)}} \quad (11)$$

Onde: MST = massa seca total (g)
H = altura (cm)
DC = diâmetro do colo (cm)
PMSPA = massa da matéria seca da parte aérea (g)
PMSRA = massa da matéria seca do sistema radicular (g)

4.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todos os resultados obtidos, provenientes das análises de caracterização das biomassa residuais e *biochar*, bem como do experimento em viveiro, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando o Software estatístico Statistical Package for Social Science for Windows (SPSS). Constatadas diferenças estatísticas para as médias, prosseguiu-se então para o teste de comparação de médias de Duncan ($\alpha=5\%$).

Para as variáveis biométricas das plantas e as características físicas e químicas dos substratos, foi realizada análise fatorial $(4 \times 3) + 1$, sendo os 4 tipos de *biochar* em três diferentes concentrações (15, 30 e 45), a fim de verificar se existe interação entre os fatores, onde, para os valores de $p < 0,05$ considerou-se como sendo significativos e $p > 0,05$ como não significativos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

5.1.1. Teor de Umidade e Densidade a Granel

Os valores médios para teor de umidade e densidade a granel da biomassa residual de *Pinus taeda* estão apresentados na Tabela 5, onde é possível observar, que houve diferença estatística para a densidade a granel, entre as diferentes biomassas.

Tabela 5. Valores médios para teor de umidade e densidade a granel da biomassa residual de *Pinus taeda*.

Biomassa	TU (%)	Dgran (g/cm ³)
Mp	38,45 a	0,190 a
Ap	43,93 a	0,063 c
Cp	46,73 a	0,129 b
ANOVA		
F valor	2,360	151,417
P valor	0,129	0,000**
Sd	6,279	0,054
CV (%)	14,30	42,02

Onde: Mp= madeira de pinus; Ap= acículas de pinus; Cp= casca de pinus; TU= teor de umidade; Dgran= densidade a granel; Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; **= significativo ao nível de 5% de significância.

Observou-se que, para os teores de umidade da biomassa estudada não houve diferença estatística, isto porque, após a coleta, o material foi selecionado e acondicionado sob as mesmas condições de temperatura e umidade. A umidade do material encontra-se elevada pois foi obtida logo após a colheita. Para densidade, a madeira apresentou o maior valor, isto devido às suas características inerentes. A densidade do compartimento ‘madeira’ pode estar relacionada com a idade das árvores e, para os compartimentos ‘casca’ e ‘acículas’, relacionada à granulometria (TRUGILHO *et al.*, 2015). Oliveira *et al.* (2017) encontrou valor médio para densidade da biomassa residual do processamento de *Pinus* sp. de 0,149 g/cm³. As acículas apresentaram os menores valores para densidade, sendo esta uma característica desejável para a posterior produção do *biochar*. Salienta-se que, os valores de densidade da biomassa residual são importantes, ainda, em função da logística e transporte, pois influencia em termos de volume.

5.1.2. Análise Imediata

Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios da análise imediata da biomassa residual de *Pinus taeda*. Após análise da variância e teste de comparação de médias, onde constatou-se diferença estatística entre as médias testadas, entre as três biomassas.

Tabela 6. Valores médios para análise imediata da biomassa residual de *Pinus taeda*.

Biomassa	TU (%)	TZ (%)	TV (%)	TC (%)	PCS (kJ kg)
Mp	12,61 b	0,49 b	78,25 a	21,26 b	19695,84 b
Ap	11,79 c	3,12 a	76,22 a	20,66 b	19147,53 c
Cp	15,55 a	1,16 b	71,15 b	27,69 a	20856,15 a
ANOVA					
F valor	582,342	14,339	33,632	69,598	73,087
P valor	0,000**	0,005**	0,001**	0,000**	0,000**
Sd	1,716	1,301	3,302	3,445	184,241
CV (%)	12,88	81,83	4,39	14,84	3,87

Onde: Mp= madeira de pinus; Ap= acículas de pinus; Cp= casca de pinus; TU= teor de umidade; TZ= teor de cinzas; TV= teor de voláteis; TC= teor de carbono fixo; PCS= poder calorífico superior; Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; **= significativo ao nível de 5% de significância.

O teor de umidade encontra-se dentro do nível, segundo Ghani *et al.* (2013), que é entre 7 e 15%. As acículas apresentaram o maior teor de cinzas, característica desejável quando se busca incorporar o *biochar* na composição de substratos, uma vez que, nas cinzas é onde concentram-se os elementos químicos que constituem aquela biomassa, tais como Ca, K, P, Mg, Fe e Na. O teor de materiais voláteis foi igual para a madeira e acículas. Quanto maior o teor de matéria volátil, significa que maior foi a carbonização do material. Este parâmetro está relacionado com a queima no processo de carbonização, pois, capacidade de ignição e queima é proporcional a este teor da biomassa (TAVARES e SANTOS, 2013). Para biomassa de *Pinus sp.*, Oliveira *et al.* (2017), Belini (2018), Oliveira *et al.* (2019) e Carvalho *et al.* (2020) encontraram teores médios para matéria volátil de 82, 80, 81 e 83%, respectivamente, valores semelhantes aos do presente estudo, pois a fração madeira utilizada foi proveniente de partes mais juvenis da árvore, tais como galhos e ponteiros.

As cascas apresentaram em sua composição os maiores teores de carbono fixo (27,69%) e poder calorífico superior (4984,74 Kcal/kg). Oliveira *et al.* (2017) encontraram teor médio de 17,4% e 20,9 MJ.kg⁻¹, para biomassa de *Pinus sp.*, valores próximos aos encontrados neste estudo, os quais atribui-se às características químicas intrínsecas da madeira, que, em sua grande maioria, apresenta valores nesta faixa. O poder calorífico indica a quantidade de energia liberada pela madeira em sua combustão, isto é, sua capacidade energética (SANTOS *et al.*, 2011), estando relacionado com o teor de carbono fixo, uma vez que, quanto maior o teor de carbono fixo, maior é o poder calorífico do material. Sobretudo, elevados teores de carbono fixo presente na composição da biomassa, atribui, conseqüentemente, maiores teores de carbono fixo no *biochar*.

5.1.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 18 representa o comportamento dos três compartimentos de biomassa residual da colheita do *Pinus taeda* para perda percentual de massa (TGA) e suas respectivas curvas de derivadas (DTG), onde as regiões do gráfico de TGA se transformam em picos de fácil interpretação.

A biomassa residual, em sua composição química, é constituída basicamente por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas, sendo determinadas, principalmente, pelas condições ambientais e características das espécies (SERAPIGLIA *et al.*, 2015). A composição química é variável e estes componentes influenciam nas reações químicas, determinando a eficiência do processo de conversão termoquímica da biomassa residual (CARRIER *et al.*, 2011).

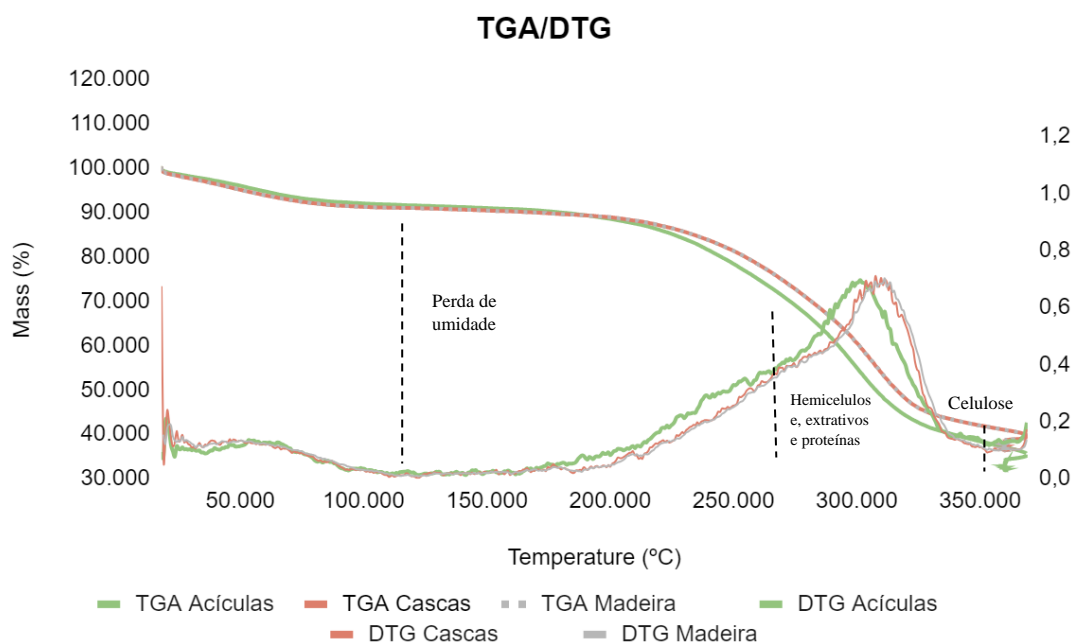


Figura 18. Análise termogravimétrica (TG) e suas derivadas (DTG) para os três compartimentos residuais de *Pinus taeda*.

Observa-se a partir da Figura 18 que, em um primeiro momento, na faixa inicial de temperatura de 120° C, ocorre a perda de umidade do material, devido às suas características hidrofílicas, assim como a degradação de compostos de baixo peso molecular, que em temperaturas mais baixas, devido ao seu grau de volatilidade, aceleram o processo de degradação e promovem a inflamabilidade (POLETTI; ORNAGHI JÚNIOR; ZATTERA, 2015; COELHO DE CARVALHO BENINI *et al.*, 2016). O

segundo período de degradação, que está representado na faixa de temperatura entre 120 a 300° C, representa a degradação da hemicelulose e outros constituintes, como extrativos e proteínas. A hemicelulose é o polímero menos estável da madeira, sendo totalmente decomposta à 350°C (BIANCHI *et al.*, 2010; HOSSEINAEI *et al.*, 2012).

O pico mais baixo, que pode ser visto na faixa de temperatura de 350 °C refere-se à decomposição da celulose, que, normalmente, acontece à essa faixa de temperatura. A celulose apresenta estrutura cristalina, o que confere uma maior estabilidade (HOSSEINAEI *et al.*, 2012; POLETTO *et al.*, 2012) A lignina, por se tratar de uma molécula termicamente mais estável, devido às ligações aromáticas na sua estrutura (HOSSEINAEI *et al.*, 2012), sua faixa de degradação ocorre do início ao fim do processo térmico, onde acontece a formação das cinzas, que consiste na decomposição da lignina.

Às temperaturas acima de 400°C, temos um pico relacionado aos processos de decomposição, que envolve reações químicas simultâneas, como quebra de ligações C-C da lignina, desidratação, produção de derivados com cadeias insaturadas laterais e liberação de água, CO₂, CO e metano (COELHO DE CARVALHO BENINI *et al.*, 2016).

O modelo de degradação observado pode ser comparado à via de reação de Waterloo, onde os componentes sólidos são decompostos em voláteis e carvão. Por exemplo, a celulose (sólida) se decompõe em voláteis (gás) e carvão (sólido). O carvão restante (sólido) se decompõe em voláteis (gás). Este modelo foi usado com sucesso por alguns autores (ALI; BAHATHAM; NAIBULHARAM, 2017; CABEZA *et al.*, 2015) e parece representar a decomposição de biomassas de modo similar.

5.2. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO *BIOCHAR*

5.2.1. Rendimento Gravimétrico

Os parâmetros utilizados no processo de conversão termoquímica da biomassa e os resultados obtidos para o rendimento gravimétrico, na produção do *biochar*, estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de processo e valores de rendimento gravimétrico na produção do *biochar*.

Biomassa	Ensaio		Rendimento			
	Temperatura	Massa amostra (kg)	Massa <i>biochar</i> (kg)	Bioóleo (%)	Gás não condensável (%)	<i>Biochar</i> (%)
Ap	350° C	13,3	4,202	22,07	46,62	30,30
Mp	350° C	11,1	3,945	19,36	45,14	35,46
Cp	350° C	9,3	4,600	15,12	36,73	40,08

Onde: Mp= madeira de *Pinus*; Ap= acículas de *Pinus*; Cp= casca de *Pinus*.

A biomassa que obteve o maior rendimento em *biochar* foram as cascas de *Pinus taeda*. Isto se deve às características deste material, tais como tamanho, formato das partículas e baixa densidade, que contribuíram para o melhor rendimento. Alguns estudos demonstraram que os maiores rendimentos de *biochar* ocorrem nas faixas de temperaturas entre 350 e 500°C (GOMES *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2017).

O processo pode ser classificado como torrefação, que consiste no primeiro nível de pirólise, classificado conforme os parâmetros utilizados no processo, que consistiram na temperatura de 350 °C, tempo de residência de 30 min, resultando em uma taxa de aquecimento de 11 °C/min. Os parâmetros utilizados ao longo do processo foram os mesmos, avaliando-se, desta maneira, apenas as características das três biomassas distintas. A partir disto, denotou-se que, cada material apresentou um comportamento diferente no decorrer do processo, o que pode ser visto através dos seus respectivos rendimentos.

Estes resultados podem ser atribuídos às características dos três compartimentos estudados, como densidade, volume, composição gravimétrica, tamanho, formato das partículas e granulometria. Cada matéria-prima apresenta características diferentes, podendo, no processo, serem influenciadas pela quantidade de matéria orgânica, teor de extrativos e demais componentes como hemicelulose e celulose (KIM *et al.*, 2010; MELZER *et al.*, 2013; DOMINGUES *et al.*, 2014).

5.2.2. Análise Imediata e Poder Calorífico Superior (PCS)

Os resultados da Análise Imediata e Poder Calorífico Superior do *biochar*, após análise estatística, estão apresentados na Tabela 8. Evidencia-se, outrossim, a distinção existente entre os três compartimentos estudados.

Tabela 8. Valores médios para análise imediata e poder calorífico superior do *biochar*.

<i>Biochar</i>	TU (%)	TZ (%)	TV (%)	TC (%)	RCF (%)	PCS (kJ kg)
Bap	5,84 b	6,36 a	45,80 a	47,83 c	1449,02 b	23982,95 c
Bmp	6,73 b	1,15 c	34,74 c	64,11 a	2274,75 a	28052,10 a
Bcp	7,89 a	3,33 b	36,99 b	59,67 b	2389,64 a	26817,50 b
ANOVA						
F valor	12,24	23,17	112,76	71,18	6,49	55,31
P valor	0,008**	0,002**	0,000**	0,000**	0,032**	0,000**
Sd	0,995	2,410	5,129	7,439	537,27	443,397
CV (%)	14,60	66,65	13,09	13,00	26,36	7,05

Onde: Bmp= *biochar* de madeira de *Pinus*; Bap= *biochar* de acícula de *Pinus*; Bcp= *biochar* de casca de *Pinus*; TU= teor de umidade; TZ= teor de cinzas; TV= teor de voláteis; TC= teor de carbono fixo; PCS=

poder calorífico superior; RCF= rendimento em carbono fixo. Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; **= significativo ao nível de 5% de significância.

Foi constatada diferença estatística, ao nível de significância $\alpha = 5\%$ (0,05), o que evidencia que a matéria-prima tem influência direta na obtenção do produto final, uma vez que possuem características distintas entre elas, observadas a partir da sua caracterização. O *biochar* da fração madeira, de *Pinus taeda*, apresentou a menor média para teor de cinzas, o qual está correlacionado com o teor de matéria volátil, onde a madeira também apresentou a menor média. Já as acículas apresentaram os maiores valores para teor de cinzas no *biochar* e, conseqüentemente, os maiores índices de material volátil, que está relacionado com a carbonização. Varma e Modal (2017) observaram, também, elevados teores de cinzas para as acículas. O teor de cinzas, tendo em vista o objetivo de utilização do *biochar* no presente estudo, é uma propriedade importante, pois é nela que constam os minerais presentes naquela biomassa e que, posteriormente, ao serem adicionados na composição de substratos para produção de mudas, podem fornecer estes nutrientes às plantas. Já os teores de voláteis, quando em elevados valores (acima de 75%), podem reduzir as taxas germinativas de plantas (GONZAGA *et al.*, 2017), não sendo o caso observado para a biomassa residual de *Pinus taeda*.

Os teores de carbono fixo diferiram estatisticamente entre os três materiais, e, por suas características químicas naturais, a madeira apresentou os maiores conteúdos de carbono fixo e, como consequência, maiores valores para poder calorífico superior. Este resultado corrobora com os valores encontrados na caracterização da biomassa, onde a madeira apresentou, também, o maior teor de carbono fixo. O teor de carbono fixo, com a produção do *biochar* e posterior incorporação no substrato, significa maior tempo para decomposição, armazenamento e não emissão para a atmosfera, propriedade adquirida através do processo de produção do *biochar*. O teor de carbono fixo indica a quantidade de carbono que ficou retido na forma sólida após o processo de pirólise (COSTA *et al.*, 2017). Os teores de carbono fixo são proporcionais ao rendimento gravimétrico, fato este constatado também por Pires *et al.* (2018) e, ainda, depende da matéria-prima utilizada (IPPOLITO *et al.*, 2020). Nota-se que, a diferença existente na composição e constituintes químicos de cada resíduo é refletida nos resultados de cada análise. Oliveira (2017) encontrou valores semelhantes para *biochar* da serragem de *pinus spp.*, 33% para material volátil, 1,28% para cinzas e 64% para os teores de carbono fixo. Os valores observados

por Varma e Mondal (2017) também são semelhantes, sobretudo para os teores de carbono fixo e poder calorífico superior.

5.2.3. Área superficial e Tamanho de Poros (Porosidade) (BET)

Os resultados da análise BET para os *biochars* demonstrou que ambos (acículas, cascas e madeira) apresentaram baixa área superficial, conforme ilustrado na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados da análise de Volume de Poros e Área superficial do *Biochar*.

<i>Biochar</i>	Análise BET	
	Área superficial (m ² g ⁻¹)	Volume de Poros (cm ³ g ⁻¹)
Bap	nd*	0,002
Bmp	1,868	0,002
Bcp	1,462	0,001

Nota: Bap= *Biochar* de acículas de *Pinus*; Bmp= *Biochar* de madeira de *Pinus*; Bcp= *Biochar* de cascas de *Pinus*; *= valor encontrado foi abaixo do limite de detecção do ajuste de isoterma.

Os baixos valores de volume de poros e área superficial do *biochar* ocorreram devido ao processo de pirólise empregado, mais precisamente ao parâmetro tempo de residência, no qual foi muito baixo e, conseqüentemente, o tempo de carbonização das amostras também foi baixo. Desta maneira, a baixa área superficial e volume de microporos no *biochar* das três biomassas residuais estudadas é explicado em função dos parâmetros empregados no processo de pirólise. Conforme a temperatura do processo é elevada, o volume de poros do *biochar* aumenta, e, como consequência, a área superficial específica do *biochar* irá aumentar também (LENG *et al.*, 2021; TOMCZYK *et al.*, 2020). Um *biochar* com grande área superficial pode contribuir para mudanças significativas nas propriedades físicas, como textura, estrutura, consistência, porosidade, tamanho dos poros, distribuição e densidade (MELOROSE *et al.*, 2015). Os microporos, quando presentes, são responsáveis pela capacidade de sorção (retenção de água, gases, metais pesados, orgânicos e nutrientes). Ainda, apresentam capacidade de criar micro habitats para microrganismos, fornecendo outros ambientes e favorecendo o desenvolvimento da biodiversidade (OK *et al.*, 2015).

Portanto, a porosidade do *biochar* é um parâmetro importante, pois é ela quem determinar sua estrutura física e, a partir dela, sua posterior aplicação (NOVOTNY *et al.*, 2023), podendo afetar as propriedades do meio em que será aplicado, bem como no desenvolvimento e qualidade das mudas. A qualidade física do material está relacionada à granulometria, uma vez que terá influência no arranjo de partículas, porosidade e

capacidade de retenção de água (KLOSS *et al.*, 2014). Diante disto, partículas menores que 2,5 mm apresentam melhores resultados (ULYETT *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2018; MOTA, 2020). Ainda, estes mesmos autores observaram que a área superficial, tamanho de poros e granulometria do *biochar* tem influência direta nos parâmetros Dendrométricos de produção de mudas.

Os poros do *biochar* podem ser divididos em três grupos, de acordo com a norma IUPAC, que classifica em microporos (< 2 nm); mesoporos (2-50 nm); e macroporos (> 50 nm) (LENG *et al.*, 2021). Durante o processo de pirólise, ocorre a degradação da celulose, hemicelulose e lignina (compostos orgânicos) e, a partir desta degradação é que a estrutura de poros do *biochar* é criada, especialmente sob altas temperaturas. No entanto, alguns autores observaram que, o *biochar* de madeira apresenta área superficial específica maior quando comparados a outras matérias-primas (CAO e HARRIS, 2010; TOMCZYK *et al.*, 2020), conforme foi observado no presente estudo.

5.2.4. Análise por Espectroscopia no Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos *biochars*, resultantes da pirólise são apresentados na Figura 19. É possível observar que, os três *biochar* apresentaram comportamento similares.

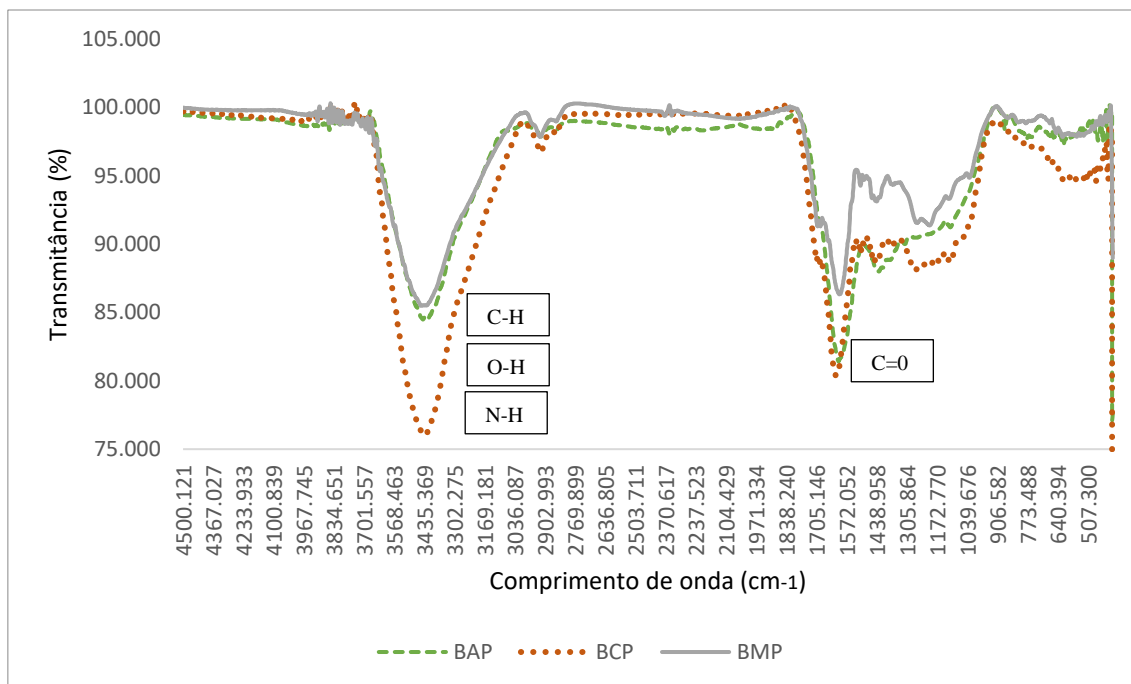


Figura 19. Espectros FTIR dos *Biochars* estudados. Onde: BAP= *Biochar* de acículas de *Pinus*; BCP= *Biochar* de cascas de *Pinus*; BMP= *Biochar* de madeira de *Pinus*.

Foi identificado uma banda larga de 2800 a 3400 cm^{-1} , sugerindo a presença de grupos hidroxila (COOH e -COH) (YAN *et al.*, 2015). Diferente, de BAP, o BCP e BMP apresentaram picos nas regiões de 2800 a 2900 cm^{-1} , podendo ser atribuído ao grupo cetona C=O. Dentre as semelhanças, os três *biochar* apresentaram alongamentos semelhantes nas faixas de 1000 a 1700 cm^{-1} . Estes picos demonstram que a ligação C=C do alceno e dos compostos aromáticos está presente no *biochar* (FERREIRA *et al.*, 2018). Da mesma maneira, ambos *biochar* apresentaram uma banda forte com pico em 1600 cm^{-1} . A banda da região de 1600 cm^{-1} é atribuída ao estiramento da carbonila, componente presente, sobretudo, na hemicelulose, podendo também ser encontrada em outros componentes da madeira, tais como os extrativos (POLLETO *et al.*, 2012; CAVINATO, 2018). Isto pode ser explicado devido a presença de estruturas aromáticas (GHANI *et al.*, 2013), o que é possível observar nos picos na Figura 19.

Os três *biochars* apresentaram picos similares nas regiões de 1370 a 1490 cm^{-1} . Na região próxima a 1500 cm^{-1} ocorre a vibração aromática C=C do anel benzênico, fato este característico da lignina (HOSSEINAEI *et al.*, 2012), bem como dos grupos funcionais aromáticos (ABDEL-FATHAH *et al.*, 2015). Para o BCP e BMP observou-se picos nas regiões de 1030 a 1270 cm^{-1} , o que não foi observado para o BAP. A presença de lignina pode ser um fator a ser considerado e também das vibrações dos carboidratos, presentes

nas regiões abaixo de 1300 cm^{-1} (HOSSEINAEI *et al.*, 2012), onde estão presentes também ligações C-O aromáticas e O-H fenólicos dos grupos funcionais (ABDEL-FATHAH *et al.*, 2015). A partir de 1200 cm^{-1} ocorrem as vibrações aromáticas do C-H de alcanos de CH e CH₂, na deformação da celulose e hemicelulose (POLLETO *et al.*, 2012). Estas são observadas para ambos os três *biochar* nas bandas de 1300 a 1500 cm^{-1} . As respostas químicas observadas entre os três tipos de *biochar* aqui estudados se dá devido a presença de componentes orgânicos em sua composição. Para o BAP e BMP observou-se um pico em 874 e 860, respectivamente, os quais se correlaciona com alongamento C-H aromático (WANG e GRIFFITHS, 1985). Sob temperaturas abaixo dos 500°C é possível manter os grupos funcionais dos produtos. Os grupos funcionais álcoois, fenóis e éteres são vistos, geralmente, independente da temperatura (PENG *et al.*, 2011), os quais percebe-se a presença nos *biochar* estudados.

Desta maneira, para melhor identificar, as atribuições químicas das principais bandas observadas na análise FTIR (Figura 19), estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Atribuições das bandas observadas a partir da análise FTIR dos três tipos de *Biochar*.

Bandas e Picos cm^{-1}			Atribuição*
BAP	BCP	BMP	
3472 - 3386	3445 – 3424	3569	OH
-	-	3449 – 3426	OH
-	2925	2925 – 2854	Alcanos
-	2854	-	Alcanos
	1706 – 1688	1701 - 1654	Aril-Cetona; Amida terciária
1608	1620	1604	Alceno
1499	1512	1512	ArH
1429-1379	1462 – 1441	1461 – 1439	Haletos de alquila
-	1379	1262	CH ₃ ; Aril-Alquil-Amina
-	1271	-	Aril-Alquil-Amina
1115		1121	Álcool
	1204 – 1034	1031	Alquil-Amina; Álcool
874	-	860 – 814	Benzeno e derivados
779	-	-	Benzeno e derivados
618	-	648	Benzeno e derivados
-	583	-	Haletos de alquila

*Nota: De acordo com Lopes e Fascio (2004). Fonte: Autor (2024).

5.2.5. Propriedades físicas do *biochar*

Os valores médios obtidos para as propriedades físicas do *biochar*, estão apresentados na Tabela 11. Após a análise da variância, constatou-se diferença estatística entre os três tipos de *biochar*, demonstrando a distinção entre as características das matérias-primas utilizadas.

Tabela 11. Valores médios para as propriedades físicas do *biochar* da biomassa residual de *Pinus taeda*.

<i>Biochar</i>	Propriedades físicas									
	pH	CE (mS/cm)	Dbd (kg/m³)	TU (%)	Wmo (%)	Wcen (%)	Pd (kg/m³)	Ps (V/V)	Wv (V/V)	Av (V/V)
Bap	7,63 a	165,53 a	99,02 c	3,16 a	90,066 c	9,933 a	1721,13 a	52,354 b	22,218 a	30,136 b
Bmp	6,17 b	72,33 b	132,77 a	2,60 a	98,295 a	1,704 c	1576,92 c	54,999 a	17,554 ab	37,445 a
Bcp	6,02 b	71,70 b	114,84 b	4,54 a	96,480 b	3,520 b	1606,60 b	55,096 a	14,204 b	40,892 a
ANOVA										
P valor	8,061	158,958	25,095	0,975	125,547	125,547	117,40	16,010	5,311	8,012
F valor	0,020**	0,000**	0,000**	0,414 ^{ns}	0,000**	0,000**	0,000**	0,001**	0,030**	0,010**
Sd	0,901	47,198	16,639	2,038	3,752	3,752	66,174	1,501	4,665	5,853
CV (%)	13,63	45,73	13,53	59,47	3,95	74,25	4,04	2,77	25,92	16,18

Onde: pH= potencial hidrogeniônico; CE= condutividade elétrica; Dbd= densidade aparente seca; TU= teor de umidade; Wmo= teor de matéria orgânica; Wcen= teor de cinzas; Pd= densidade de partículas; Ps= porosidade total; Wv= volume de água; Av= volume de ar. Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; médias analisadas pelo teste de Duncan (5%); **= significativo a nível de 5%; ^{ns}= não significativo.

O *biochar* de acículas de *Pinus taeda* apresentou as maiores médias para pH e conteúdo de cinzas e menores médias para densidade aparente seca, características importantes tendo em vista sua aplicação. Alguns fatores dependem do pH, tais como conteúdo de cinzas e nutrientes disponíveis (DING *et al.*, 2016). O aumento do pH pode estar associado a perda progressiva da superfície ácida dos grupos funcionais presentes (REEVES *et al.*, 2007), o que pôde ser observado a partir da análise FTIR. Estas são propriedades importantes para composição de substratos, uma vez que o pH determina a acidez ou alcalinidade daquele meio, e sua condição está relacionada à disponibilidade de nutrientes, nos quais estão presentes no conteúdo das cinzas. *Biochar* produzido a altas temperaturas (> 400 °C), tendem a apresentar alto valor de pH, devido à condensação do hidrogênio e a perda de material volátil, quando comparado àqueles produzidos sob temperaturas mais baixas, provenientes da mesma matéria-prima (SINGH *et al.*, 2017). Os baixos valores de pH observados no presente estudo podem ser atribuídos à baixa temperatura empregada no processo de conversão termoquímica.

A baixa densidade do material atribui ao substrato uma menor densidade, característica desejável, que contribui para o melhor desenvolvimento das plantas, uma vez que, substratos de menor densidade são mais indicados devido à sua eficiência, principalmente com relação ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas. As acículas apresentaram a maior média para densidade de partículas, correlacionada a sua baixa densidade, e atribuído às suas características, tais como tamanho e formato. Esta densidade de partículas proporcionou uma maior porosidade e, conseqüentemente, maior volume de água, devido à presença de macroporos, tornando as acículas um resíduo potencial para produção de *biochar* e incorporação na composição de substratos. A densidade não é uma característica intrínseca, mas depende do tamanho, forma e compactação das partículas (JOSEPH *et al.*, 2018), conforme observado nos resultados.

Já o *biochar* de cascas apresentou as maiores médias para volume de ar, atribuído às características das partículas, de formato arredondado, de espessura maior, quando comparado às demais biomassas. Sua baixa porosidade explica os baixos valores para retenção de água. O *biochar* de madeira apresentou-se superior aos demais para condutividade elétrica, conteúdo de matéria orgânica e porosidade total. A condutividade elétrica é um parâmetro importante, na qual mede a capacidade inerente a algum material de transportar cargas elétricas. Leva em conta os aspectos microscópicos do material, portanto, tem relação com a estrutura do *biochar*, como porosidade, área superficial específica e pH, representando os grupos ácidos presentes na superfície do *biochar*, ou

seja, nas cinzas (ABDEL-FATTAH *et al.*, 2015; WEBER e QUICKER, 2018). O meio de cultivo é um composto que contém cargas positivas e negativas, conseguirá, assim, interagir com estas cargas (cátions e ânions), conforme estas estiverem ali presentes. Diante disto, de acordo com Ferreira *et al.* (2018), características do *biochar* como pH, CE, CTC podem favorecer a germinação de sementes, bem como no crescimento e desenvolvimento de plantas.

5.2.6. Propriedades químicas do *biochar*

Para as propriedades químicas do *biochar*, após análise da variância, verificou-se que, para a maioria das variáveis resposta analisadas, não houve diferença entre os tipos de *biochar*. Os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores médios para as propriedades químicas do *biochar* a biomassa residual de *Pinus taeda*.

<i>Biocha</i>		Propriedades químicas mg kg ⁻¹														
<i>r</i>	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	P ^s	Ca ^s	Mg ^s	K ^s	Na ^s	C	H	N	C/N	H/C	Ca ^t	Mg ^t	K ^t	P ^t
Bap	7,0 a	-34,3 a	233,9 a	147,9 a	58,4 a	1314,1 a	148,6 a	62,6 ab	2,36 b	1,9 a	32,1 b	0,03 c	7581,3 a	2847,8 5 a	5704,3 a	2791,5 a
Bmp	43,8 a	-20,5 a	81,0 a	213,2 a	49,1 a	123,2 b	92,3 a	64,8 a	3,52 a	0,21 c	311,6 a	0,05 b	2680,5 b	1162,2 a	2482,3 a	142,9 c
Bcp	26,7 a	-7,0 a	120,6 a	148,4 a	41,2 a	123,6 b	100,6 a	60,1 b	3,57 a	0,61 b	98,1 b	0,06 a	735,5 c	2011,9 a	2758,2 a	690,0 b
ANOVA																
P valor	4,612	0,985	2,840	0,146	0,469	75,498	2,820	17,086	207,49 3	2386,4 1	33,586	152,27 3	626,02	0,753	3,353	2223,5
F valor	0,122 ⁿ s	0,469 ⁿ s	0,203 ⁿ s	0,870 ⁿ s	0,665 ⁿ s	0,003* *	0,205 ⁿ s	0,023* *	0,001* *	0,000* *	0,009* *	0,001* *	0,000* *	0,543 ^{ns}	0,172 ^{ns}	0,000* *
Sd	18,95	19,37	87,77	112,66	15,78	620,97	33,63	2,20	0,613	0,814	133,54	0,010	3159,0 2	1304,1 9	1921,7 2	1251,0 2
CV (%)	73,31	93,98	60,44	66,32	31,82	119,33	29,54	3,53	19,45	87,99	90,68	20,13	86,17	64,97	52,67	103,54
<i>Biocha</i>		Concentração de metais pesados mg kg ⁻¹														
<i>r</i>	Pb ⁺	Cu ⁺	Zn ⁺	Ni ⁺	Cr ⁺	Cd ⁺										
Bap	19,7 a	5,8 a	161,2 a	39,9 a	9,8 a	1,8 a										
Bmp	12,6 a	1,2 b	103,6 b	12,8 b	7,2 a	0,8 a										
Bcp	11,9 a	2,6 b	96,3 b	9,6 b	3,7 a	1,3 a										
ANOVA																
P valor	0,540	13,958	10,303	15,897	0,413	4,511										
F valor	0,630 ^{ms}	0,030**	0,045**	0,025**	0,694 ^{ns}	0,125 ^{ns}										
Sd	7,47	2,22	33,99	15,63	5,83	0,49										
CV (%)	50,64	68,55	28,23	75,15	84,23	37,04										

Nota: **= significativo ao nível de 5% de significância; ^{ns}= não significativo; ^s= elementos solúveis em água; ^t= elementos totais; Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação.

Conforme observado na Tabela 12, a maioria dos elementos não apresentaram diferença estatística, exceto para os nutrientes totais de Cálcio, Magnésio, Potássio e Fósforo, onde o *biochar* de acículas apresentou as maiores médias. Este resultado corrobora com os resultados para as propriedades físicas, demonstrando, igualmente, que as acículas apresentam características que se sobressaíram dos demais tipos de *biochar*, e se apresenta como uma alternativa eficaz, conforme os objetivos do estudo. Entre os elementos presentes, o fósforo é um dos mais importantes para a nutrição das plantas (KIRKBY e JOHNSTON, 2008). No solo, este está disponível para as plantas principalmente na forma de H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} (GUL e WHALEN, 2016; GLASER e LEHR, 2019). É um elemento extremamente reativo e, geralmente, presente na forma de fosfato mineral na natureza, baixa mobilidade, em que as características físico-químicas irão influenciar diretamente sua disponibilidade e solubilidade. Desta maneira, é importante salientar que, a quantidade de Fósforo presente irá depender da matéria-prima utilizada na produção do *biochar*. Isto foi possível identificar, a partir de alguns estudos, onde alguns autores compararam sua presença em algumas matérias-primas e verificaram que: biossólidos > resíduos animais > resíduos biológicos > resíduos de culturas (GLASER e LEHR, 2019; LI *et al.*, 2019).

As concentrações de nutrientes totais no *biochar* são, necessariamente, reflexo de sua liberação para as plantas, sendo estes diferentes conforme o tipo de biomassa utilizada no processo (CHAN e XU, 2009). No entanto, a velocidade de liberação de elementos como P, K e Mg, dependem de associações que estes elementos estabelecem com o *biochar*, sendo, no caso do P, mais lenta quando comparado aos demais. Para o *biochar*, a concentração total de C é frequentemente elevada, uma vez que as matérias-primas apresentam altas concentrações, portanto, a matéria-prima afetará significativamente o conteúdo de carbono do *biochar*. *Biochar* a base de madeira, em geral, apresenta maior concentração de Carbono, quando comparados à outras matérias-primas, isto devido à falta de outros elementos, tais como N, P, K S Ca e P, contribuindo para o menor efeito da diluição do carbono em *biochar* a base de madeira (IPPOLITO *et al.*, 2020). Quando aplicados ao meio de cultivo, por exemplo, o carbono de característica recalcitrante tende a durar centenas e milhares de anos, desempenhando, desta maneira, o papel de mitigação das mudanças climáticas (BOLAN *et al.* 2012; WERNER *et al.* 2018; WOOLF *et al.* 2018; SCHMIDT *et al.* 2019).

O *biochar*, por possuir grupos funcionais (COOH, OH, etc.), presentes na sua superfície porosa, pode interagir com as moléculas orgânicas e nutrientes, facilitando

assim sua disposição e absorção pelas plantas, posteriormente, quando presente nos substratos (ANGST e SOHI, 2013; PATEL, 2018). A concentração de carbono e a relação C/N estão associadas a formação da superfície dos grupos funcionais e tem influência direta na sorção de metais por este material (UCHIMIYA; CHANG, 2011). *Biochar* com proporções H/C < 0,7 tendem a apresentar estruturas de anéis aromáticos fundidos, alterados quimicamente, quando comparados ao *biochar* com proporções H/C > 0,7. (IBI, 2015). A relação H/C consiste em um fator chave, no qual define seu potencial de mitigação de N₂O, sendo os *biochars* com proporções H/C < 0,3 os mais eficazes (CAYUELA *et al.*, 2015). É o que apresentaram os três tipos de *biochar* do presente trabalho, atuando na função ambiental também.

A concentração de metais avaliados na composição do *biochar* identificou, da mesma maneira, as maiores concentrações para a biomassa de acículas, demonstrando que, apesar de apresentar potencial como matéria-prima, a concentração de metais na composição das acículas, pode constituir um problema de utilização, sendo necessário, desta maneira, verificar a disponibilidade e potencial toxicidade destes elementos, e, se, podem acarretar problemas a partir da sua aplicação. A presença destes elementos se deve ao fato de o *biochar* apresentar em sua composição compostos fenólicos ou poliaromáticos, que, quando adicionados ao substrato, por exemplo, como é o caso do presente estudo, podem aumentar a fitotoxicidade e prejudicar o desenvolvimento das mudas (GHEZZEHEI *et al.*, 2014; FIGUEREDO *et al.*, 2017). Diante deste fato, ressalva a importância de caracterizar a matéria-prima para respectiva produção de *biochar*, pois irá determinar seu uso mais adequado. Ainda, o *biochar* apresenta potencial como remediador de solos e meios de cultura, devido a sua alta área superficial específica, concentração de carbono, aromaticidade e estabilidade, onde consegue adsorver substâncias inorgânicas, poluentes e metais pesados a partir de sua aplicação (NARTEY e ZHAO, 2014; WANG e WANG *et al.*, 2019; ONI *et al.*, 2019; YAASHIKAA *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021; GELARDI e PARIKH, 2021). Conforme observado a partir da análise BET, porém, o *biochar* deste estudo apresentou baixa área superficial específica, determinando assim, limites na sua aplicação e uso. A concentração de metais presentes no *biochar* do presente estudo, de acordo com a resolução CONAMA nº 420/2009, na lista de valores orientadores para solos e águas subterrâneas, observou-se que as concentrações de Ni e Cd para o *biochar* de acículas de *Pinus* estão acima dos valores de prevenção estabelecidos, que são, respectivamente 30 e 1.3.

5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SUBSTRATOS DE CULTIVO APÓS ADIÇÃO DO *BIOCHAR*

5.3.1. Efeito do *biochar* nas propriedades físicas dos substratos

As propriedades físicas dos substratos, avaliadas após a incorporação do *biochar* da biomassa residual de *Pinus taeda*, estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Valores médios para as propriedades físicas dos substratos de cultivo compostos por *biochar* da biomassa residual da colheita de *Pinus taeda*.

Trat.	Propriedades físicas									
	pH	CE (mS/cm)	Dbd (kg/m ³)	TU (%)	Wmo (%)	Wcen (%)	Pd (kg/m ³)	Ps % (V/V)	Wv % (V/V)	Av % (V/V)
SB100	5,9 b	716 a	255,1 a	5,9 a	79,1 d	20,8 a	1961,4 a	38,0 f	29,8 a	8,2 c
Bap15	6,2 ab	200 bcd	182,1 de	4,7 a	85,5 bc	14,5 bc	1816,5 bc	45,1 bcd	31,7 a	13,4 bc
Bap30	6,4 ab	205 bc	165,4 f	4,6 a	86,0 bc	14,0 bc	1803,1 bc	46,3 bc	29,8 a	16,5 bc
Bap45	6,8 a	196 bcde	145,3 g	4,2 a	85,9 bc	14,1 bc	1808,9 bc	47,3 b	30,0 a	17,3 b
Bmp15	5,8 b	208 b	213,4 bc	8,9 a	84,2 bcd	15,7 abc	1849,0 ab	42,7 de	30,0 a	12,7 bc
Bmp30	6,0 ab	136 de	208,8 c	7,4 a	88,5 ab	11,5 cd	1752,1 bc	45,2 bcd	28,9 a	16,2 bc
Bmp45	6,2 ab	134 e	190,2 d	7,2 a	92,1 a	7,9 d	1682,9 c	48,1 ab	28,2 ab	19,9 b
Bcp15	6,0 ab	156 bcde	206,1 c	8,3 a	80,3 cd	19,7 ab	1940,5 a	41,1 e	29,8 a	11,3 bc
Bcp30	6,3 ab	168 bcde	168,7 ef	7,2 a	86,6 ab	13,4 cd	1791,3 bc	46,4 bc	26,3 ab	20,1 b
Bcp45	6,5 ab	134 e	148,0 g	7,2 a	92,2 a	7,7 d	1680,0 c	50,7 a	22,1 b	28,6 a
Bacm15	6,1 ab	213 b	226,5 b	6,7 a	86,2 bc	13,8 bc	1798,7 bc	43,0 cde	28,0 ab	15,0 bc
Bacm30	6,5 ab	189 bcde	208,3 c	6,5 a	85,7 bc	14,3 bc	1810,8 bc	43,7 cde	30,9 a	12,8 bc
Bacm45	6,7 ab	142 cde	189,3 d	4,9 a	88,2 ab	11,8 cd	1758,3 bc	46,1 bcd	25,9 ab	20,2 b
ANOVA										
F valor	1,459	60,951	41,106	0,364	4,183	4,183	4,030	9,116	1,661	3,536
P valor	0,203 ^{ns}	0,000**	0,000**	0,969 ^{ns}	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	0,114 ^{ns}	0,001**
Sd	0,494	151,914	31,683	4,548	4,886	4,886	106,943	3,682	4,270	6,955
CV (%)	7,87	70,44	16,42	70,38	5,66	35,39	5,92	8,19	14,93	42,56

Onde: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram estatisticamente, a 5% de probabilidade pelo teste de comparação de médias de Duncan; pH= potencial hidrogeniônico; CE= condutividade elétrica; Dbd= densidade aparente seca; TU= teor de umidade; Wmo= teor de matéria-orgânica; Wcen= teor de cinzas; Pd= densidade de partículas; Ps= porosidade total; Wv= volume de água; Av= volume de ar. Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; **= significativo a 5% de significância; ^{ns}= não significativo.

Observou-se que, a adição do *biochar* influenciou diretamente no pH, sendo que, quanto maior a proporção de *biochar* na composição dos substratos, maiores foram os valores de pH. Isso demonstra a capacidade do *biochar* em elevar os níveis de pH quando em contato com solos ácidos (pH abaixo de 5,5). O aumento do pH pode estar relacionado devido a seu efeito corretivo, com presença de cinzas ricas em óxidos e hidróxidos de metais alcalinos (ZELAYA *et al.*, 2019) e, ainda, alterar a forma que os nutrientes estarão disponíveis para as plantas (DING *et al.*, 2016). Apesar do aumento do pH das misturas, todos os valores encontram-se dentro do ideal para as plantas (na faixa de 6 a 7). A condutividade elétrica foi inversamente proporcional a proporção de *biochar* na composição do substrato, isto é, conforme aumentou a proporção de *biochar*, a condutividade elétrica diminuiu.

A densidade básica aparente diminuiu com adição do *biochar*, bem como a densidade de partículas, sendo este, um fator benéfico, pois, substratos menos densos contribuem para o melhor desenvolvimento das plantas, pois facilitam o crescimento das raízes. Xiang *et al.* (2017) verificaram que, a presença de *biochar* beneficia o desenvolvimento morfológico da raiz, e, ainda, contribui para que não haja deficiência de água e nutrientes. Como consequência, os valores de porosidade e volume de ar aumentaram em função da adição do *biochar* na composição dos substratos, devido a relação presente entre estas propriedades. Observou-se ainda que, o tamanho e formato das partículas do *biochar* influenciaram nesta propriedade, demonstrando o potencial do *biochar* em melhorar as características físicas dos substratos, agindo como um condicionador. Partículas menores do *biochar* contribuem para estes fatores (OLIVEIRA *et al.*, 2018; MOTA, 2020). Resultados similares, para todas as propriedades avaliadas, foram encontrados por Basílio *et al.* (2020) ao produzir mudas de *Eucalyptus urophylla* utilizando *biochar* de casca de pequi. A alta porosidade, baixa densidade e alta superfície específica do *biochar* foi observada também por outros autores (Sankura *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2017; e Tonks *et al.*, 2017).

O conteúdo de matéria orgânica dos substratos aumentou com a adição do *biochar*. A matéria orgânica desempenha papel fundamental nas funções do solo, influenciando na estrutura, atividade biológica, retenção de água e fonte de nutrientes. Portanto, para o bom manejo sustentável de meios de cultura, a manutenção e aumento da matéria orgânica é fundamental, sendo isto possível a partir da incorporação e estabilização de compostos orgânicos a estes (GLISCZYNSKI *et al.*, 2016), tais como o *biochar*. Já o conteúdo de cinzas dos substratos foi influenciado pela adição de *biochar*, onde o substrato comercial

apresentou maior conteúdo do que aqueles com *biochar* na composição. Apesar disto, o *biochar* proveniente da biomassa residual de *Pinus taeda* demonstrou potencial em compor substratos, uma vez que, melhorou as características físicas e biológicas, características necessárias para um bom desenvolvimento de plantas.

A manutenção do volume de água e umidade no substrato é primordial para o bom crescimento e desenvolvimento das plantas em estágio inicial (NELSON *et al.* 2021). Os tratamentos com *biochar* apresentaram maiores ou iguais volumes de água quando comparados à testemunha. As características das partículas do *biochar* foram determinantes para esta propriedade, uma vez que apresentaram baixo volume de poros, o que, conseqüentemente, elevou os valores de volume de ar dos substratos (A_v % (v/v) (Tabela 11), embora, com isto, tenha diminuindo a capacidade em reter água, atribuído a baixa área superficial e porosidade do *biochar*. De maneira geral, substratos com granulometria distribuída uniformemente apresentam maior retenção de água (ZORZETO *et al.*, 2014), ao contrário do observado no presente estudo. Ainda, em casos de baixa porosidade e alta capacidade de retenção de água, pode acarretar na falta de oxigênio, impedindo o desenvolvimento das raízes, uma vez que, o *biochar* apresenta característica hidrofóbica, além da hidrofílica.

5.3.2. Efeito do *biochar* nas propriedades químicas dos substratos

As propriedades químicas dos substratos de cultivo, com adição de *biochar* da biomassa residual de *Pinus taeda* em sua composição, após análise estatística, estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14. Valores médios para as propriedades químicas dos substratos de cultivo compostos por *biochar* da biomassa residual da colheita de *Pinus taeda*.

Propriedades químicas dos substratos (mg kg ⁻¹)														
Tratamentos	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	P ^s	Ca ^s	Mg ^s	K ^s	Na ^s	C	N	C/N	Ca ^t	Mg ^t	K ^t	P ^t
SB100	46 a	10 a	220 a	218 ab	412 a	587 b	75 a	38,35 d	0,43 bc	87,14 bcd	2565 a	3642 abc	2798 abc	2021 a
Bap15	8 b	2 ab	104 b	37 ab	60 bcde	566 b	108,5 a	44,36 bcd	0,89 abc	52,25 d	1399 a	3090 abc	4899 ab	1645 abc
Bap30	31 ab	-21 abc	132 ab	32 b	32 ef	807 a	160,4 a	49,15 abc	1,08 abc	45,62 d	3221 a	4011 abc	4180 abc	2019 a
Bap45	45 a	-39 c	178 ab	43 ab	17 f	990 a	192,2 a	50,78 abc	1,14 ab	44,50 d	3391 a	3616 abc	5443 a	2016 a
Bmp15	19 ab	-7 abc	109 b	127 ab	91 b	254 e	120,1 a	50,51 abc	0,39 c	127,22 ab	1539 a	3685 abc	1672 c	884 ef
Bmp30	14 ab	-12 abc	100 b	63 ab	35 ef	194 e	91,4 a	54,39 a	0,85 abc	63,68 cd	2483 a	1143 c	1875 bc	900 ef
Bmp45	19 ab	-13 abc	114 b	46 ab	52 cdef	269 de	104,4 a	52,86 ab	0,37 c	141,57 a	2477 a	1804 bc	2368 abc	771 f
Bcp15	18 ab	-8 abc	166 ab	184 ab	90 b	308 cde	201,4 a	45,42 abcd	0,56 abc	82,64 cd	1478 a	5376 a	1733 c	1622 bcd
Bcp30	45 a	-32 bc	149 ab	37 ab	73 bcd	375 bcde	110,6 a	47,87 abc	1,21 a	61,06 d	1403 a	2209 bc	2567 abc	1243 de
Bcp45	33 ab	-30 bc	162 ab	101 ab	39 def	524 bc	154,7 a	42,71 cd	0,41 bc	106,44 abc	1649 a	3773 abc	2973 abc	1239 de
Bacm15	9 b	-2 ab	149 ab	107 ab	93 b	394 bcde	154,8 a	46,40 abcd	0,54 abc	84,54 cd	3456 a	2625 abc	2498 abc	1809 ab
Bacm30	25 ab	-14 abc	162 ab	625 a	80 bc	544 bc	131,9 a	50,13 abc	0,66 abc	75,08 cd	1497 a	4649 ab	3614 abc	1342 cd
Bacm45	21 ab	-7 abc	159 ab	93 ab	22 f	496 bcd	89,2 a	52,02 ab	0,66 abc	78,69 cd	3820 a	4617 ab	4608 abc	1419 cd
ANOVA														
F valor	2,009	2,033	1,785	0,889	85,465	10,459	0,747	2,845	1,968	5,622	0,763	1,978	2,013	14,695
P valor	0,113 ^{ns}	0,109 ^{ns}	0,157 ^{ns}	0,577 ^{ns}	0,000**	0,000**	0,690 ^{ns}	0,037**	0,120 ^{ns}	0,002**	0,677 ^{ns}	0,118 ^{ns}	0,113 ^{ns}	0,000**
Sd	16,388	17,356	42,453	232,358	100,674	233,279	60,773	5,190	0,361	31,883	1318,8	1467,7	1531,4	449,4
CV (%)	62,60	127,17	28,90	175,91	118,96	48,04	46,60	10,79	50,73	39,45	54,63	43,12	48,28	30,85

Nota: ^s= elementos solúveis em água; ^t= elementos totais; Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; **= significativo ao nível de 5% de significância; ^{ns}= não significativo.

Segundo Nelissen *et al.* (2014), em regra, tratamentos com a presença de *biochar* tendem a reduzir a disponibilidade de NO_3^- , seja por imobilização biótica do nitrogênio (N), mineralização reduzida de matéria orgânica do solo, nitrificação reprimida, aumento de perdas gasosas ou imobilização abiótica de NH_4^+ e / ou NO_3^- . Foi exatamente o observado no presente estudo, onde as concentrações de *biochar* reduziram a disponibilidade de nitrato (NO_3^-). O nitrogênio por estar presente em uma série de mecanismos metabólicos da planta, como a síntese de fotoassimilados, agindo diretamente no processo de divisão e expansão celular (Varvel *et al.*, 1997), tende a reduzir conforme a menor disponibilidade deste nutriente, conseqüentemente, isto irá afetar diretamente o crescimento e diâmetro da planta (Smerthurst *et al.*, 2004). As maiores concentrações de Nitrogênio foram observadas nas doses de 30% de *biochar* na composição dos substratos. Alguns estudos demonstraram que a aplicação de *biochar* não afeta a concentração de N do substrato, porém, aumenta de forma significativa a concentração de P (FARHANGI-ABRIZ e TORABIAN, 2018; WANG *et al.*, 2018). Ainda, conforme Razaq *et al.* (2017), o *biochar* têm influência direta na disponibilidade de nitrogênio e morfologia das raízes das plantas. Neste estudo, observou-se que, em alguns tratamentos com *biochar*, houve acréscimo e outros o decréscimo destes elementos, quando comparados ao substrato comercial.

O carbono presente no *biochar* é estável e de difícil decomposição, sendo assim, a recalcitrância deste é favorecida (LORENZ; LAL, 2014). Foi possível observar que as taxas de carbono aumentaram significativamente nos tratamentos com *biochar*, quando comparado ao substrato comercial (SB100). Isto se deve às suas características, possibilitando maior estabilização do carbono a partir da biomassa pirolisada, permanecendo por mais tempo, reduzindo as emissões para atmosfera (LEHMANN *et al.*, 2006). O *biochar* consiste em uma tecnologia eficiente na captura e armazenamento de carbono, desempenhando um papel importante na redução dos níveis de CO_2 na atmosfera (LEHMANN, 2007; DING *et al.* 2023).

A capacidade do *biochar* em fornecer ou aumentar a disponibilidade de nutrientes está relacionada à sua composição (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013), sendo a concentração de cada nutriente relacionada ao tipo de matéria-prima utilizada no processo de produção (GASKIN *et al.*, 2008). Esta capacidade está diretamente relacionada à porosidade do *biochar* (BATISTA *et al.*, 2018; SULLIMAN, *et al.*, 2018), onde, conforme menor for a granulometria, maior será a adsorção de nutrientes e conseqüentemente, menor perda por lixiviação. Observou-se então, um aumento nas

concentrações de bases (Ca+, Mg+, K+) no substrato com a adição do *biochar*. Quando aplicado ao meio de cultura, o *biochar* pode aumentar significativamente a concentração de alguns elementos, como P, K, e Ca e Mg, conforme observado por Soares *et al.* (2019). No entanto, Zemanová *et al.* (2017) observou redução de alguns nutrientes (Ca, Mg e Na). Sobretudo, a concentração de elementos do *biochar* está associada à matéria-prima utilizada, onde determinadas matérias-primas irão apresentar maiores concentrações de minerais e outras menores concentrações.

Os valores médios para a concentração de metais pesados dos substratos estão apresentados na Tabela 15. A concentração de metais determinará a correta destinação e uso do material, e, ainda, afetarão no desenvolvimento das plantas.

Tabela 15. Valores médios para a concentração de metais dos substratos de cultivo compostos por *biochar* da biomassa residual da colheita de *Pinus taeda*.

Trat.	Metais pesados totais					
	mg kg ⁻¹					
	Pb ^t	Cu ^t	Zn ^t	Ni ^t	Cr ^t	Cd ^t
SB100	12,4 a	5,3 abc	23,1 f	19,3 ab	33,4 ab	0,9 a
Bap15	13,4 a	5,2 abc	70,9 b	30,1 ab	38,9 ab	0,4 a
Bap30	15,4 a	4,7 abc	57,2 cd	29,9 ab	29,1 ab	1,0 a
Bap45	18,4 a	5,7 ab	90,1 a	30,9 ab	21,8 b	0,9 a
Bmp15	10,6 a	6,4 a	26,7 f	16,7 b	25,1 ab	1,1 a
Bmp30	10,4 a	4,1 bc	40,6 e	16,7 b	39,5 ab	0,7 a
Bmp45	15,0 a	3,5 bc	46,2 de	26,1 ab	28,0 ab	0,3 a
Bcp15	18,8 a	4,1 bc	42,8 e	24,7 ab	36,8 ab	0,2 a
Bcp30	14,4 a	3,8 bc	55,9 cd	22,0 ab	34,0 ab	0,6 a
Bcp45	15,6 a	3,3 c	86,6 a	16,5 b	22,8 b	0,8 a
Bacm15	15,2 a	4,1 bc	48,1 de	29,4 ab	44,1 a	0,8 a
Bacm30	17,4 a	3,9 bc	64,9 bc	36,2 a	41,6 ab	0,3 a
Bacm45	18,6 a	4,4 abc	85,5 a	36,4 a	36,4 ab	0,8 a
ANOVA						
F valor	0,499	1,976	38,802	2,038	1,534	0,810
P valor	0,881 ^{ns}	0,119 ^{ns}	0,000**	0,109 ^{ns}	0,227 ^{ns}	0,640 ^{ns}
Sd	4,907	1,111	21,790	8,740	9,295	0,442
CV (%)	32,58	24,57	38,32	33,98	27,97	62,38

Nota: **= significativo ao nível de 5% de significância para o teste de Duncan; ^{ns}= não significativo; ^t= elementos totais; Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação.

Apenas para o Zn foi observado diferença estatística entre os tratamentos. Para os demais elementos, reportou-se, de maneira geral, um acréscimo conforme as proporções de *biochar* na composição dos substratos. A concentração de metais no *biochar* da biomassa residual de *Pinus taeda* encontram-se abaixo do limite permitido pela Resolução CONAMA 420/09.21, onde estabelece valores orientadores para solos,

inclusos águas subterrâneas, a não ser os valores de Níquel (Ni) para os tratamentos Bacm30 e Bacm45, que apresentaram valores acima dos valores de prevenção (VP), que são de 30 mg kg⁻¹. Em seu estudo, Zelaya *et al.* (2019) observou valores semelhantes aos encontrados neste estudo. O mesmo foi notado comparando os resultados encontrados por Kulczycki *et al.* (2020) ao produzir *biochar* de *Pinus*.

O *biochar* proveniente de diferentes matérias-primas apresentam, da mesma maneira, características físicas e químicas inerentes diferentes umas das outras, que, posteriormente, estarão relacionadas à composição química, que, por conseguinte, trarão consigo estas características quando incorporados na composição de substratos.

Nas Tabelas 15, 16 e 17 estão apresentados os valores médios para análise dos componentes principais, das propriedades físicas e químicas dos substratos. Para as propriedades físicas foi possível observar interação para as propriedades CE, Dbd e Ps, isto é, as doses influenciaram nas variáveis, onde conforme aumentou a concentração de *biochar*, diminuiu a CE e Ps, sendo que conforme aumentou a concentração do *biochar*, diminuiu a Dbd.

Já com relação às propriedades químicas, apenas para a concentração de Fósforo (P^t) total foi constatada interação entre os fatores estudados, uma vez que, conforme acréscimo na concentração de *biochar*, houve um decréscimo na concentração de Fósforo. Para as demais propriedades, não houve interação.

Para a concentração de metais, foi constatada interação entre os fatores apenas para a concentração de Zinco, evidenciando o aumento na concentração do elemento, conforme aumentada a concentração de *biochar*. A partir destes resultados, evidencia-se que as características do *biochar* são distintas entre as biomassas estudadas e que, em diferentes concentrações, alteram algumas das propriedades quando na composição dos substratos.

Tabela 16. Análise fatorial para as propriedades físicas para os fatores componente e dose.

Fator	Composição	pH	CE (mS/cm)	Dbd (kg/m ³)	TU (%)	Wmo (%)	Wcen (%)	Pd (kg/m ³)	Ps % (V/V)	Wv % (V/V)	Av % (V/V)
Componentes (<i>Biochar</i>)	BAP	6,49 a	201,00 a	164,24 a	4,49 a	85,79 a	14,20 a	1809,54 a	46,27 a	30,50 a	15,77 a
	BMP	6,00 b	159,58bc	204,14 c	7,86 a	88,28 a	13,31 a	1761,34 a	45,35 ab	29,07 ab	16,28 a
	BCP	6,29ab	153,36 c	174,28 b	7,57 a	86,37 a	13,62 a	1803,96 a	46,09 ab	26,07 b	20,01 a
	BACM	6,45ab	181,94ab	208,07 c	6,08 a	86,68 a	13,31 a	1789,25 a	44,29 b	28,29 ab	16,00 a
Doses (%)	15	6,04 b	194,87 a	207,05 a	7,17 a	84,04 b	15,95 a	1851,20 b	43,00 c	29,89 a	13,11 b
	30	6,29ab	174,98 b	187,81 b	6,44 a	86,70 b	13,39 a	1789,34 a	45,42 b	29,00 ab	16,42 b
	45	6,60 a	152,07 c	168,19 c	5,90 a	89,60 a	10,39 b	1732,53 a	48,08 a	26,56 b	21,51 a
Interação	C x D	0,998 ^{ns}	0,036 ^{**}	0,038 ^{**}	1,000 ^{ns}	0,071 ^{ns}	0,071 ^{ns}	0,072 ^{ns}	0,053 ^{**}	0,508 ^{ns}	0,221 ^{ns}

Onde: BAP= *Biochar* de acículas de Pinus; BMP= *Biochar* de madeira de Pinus; BCP= *Biochar* de casca de Pinus; BACM= mistura; ^{ns}= não significativo; ^{**}= significativo.

Tabela 17. Análise fatorial para as propriedades químicas dos fatores componente e dose.

Fator	Composição	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	P ^s	Ca ^s	Mg ^s	K ^s	Na ^s	C	N	C/N	Ca ^t	Mg ^t	K ^t	P ^t
Componentes (<i>Biochar</i>)	BAP	28,37 a	-19,83 a	138,53 ab	37,54 a	36,73 b	787,93 a	153,72 a	48,09 ab	1,03 a	47,45 c	2670,39 a	3572,59 ab	4840,75 a	1893,84 a
	BMP	18,03 a	-11,01 a	108,02 b	79,11 a	59,34 a	239,51 c	105,32 a	52,58 a	0,54 b	110,82 a	2166,78 a	2211,18 b	1971,88 b	851,78 d
	BCP	32,47 a	-23,59 a	159,49 a	107,56 a	65,63 a	402,87 b	155,55 a	45,33 b	0,72 ab	83,38 b	1510,43 a	3786,13 ab	2424,61 b	1368,39 c
	BACM	18,97 a	-8,18 a	157,01 a	275,34 a	67,49 a	478,04 b	125,35 a	49,51 ab	0,62 b	79,44 b	3258,01 a	3964,17 a	3573,77 ab	1523,67 c
Doses (%)	15	13,86 a	-3,94 b	132,26 a	114,08 a	83,87 a	380,71 b	146,20 a	46,67 a	0,60 a	86,66 a	1968,41 a	3694,17 a	2700,85 a	1490,29 a
	30	29,48 b	-20,24 a	136,21 a	189,49 a	55,19 b	480,40 ab	123,63 a	50,38 a	0,64 a	61,36 b	2401,03 a	3003,35 a	3059,18 a	1376,48 ab
	45	30,04 b	-22,78 a	153,83 a	71,09 a	32,82 c	570,15 a	135,13 a	49,59 a	0,95 a	92,80 a	2834,77 a	3453,03 a	3848,23 a	1361,50 b
Interação	C X D	0,356 ^{ns}	0,583 ^{ns}	0,790 ^{ns}	0,499 ^{ns}	0,118 ^{ns}	0,171 ^{ns}	0,661 ^{ns}	0,639 ^{ns}	0,536 ^{ns}	0,107 ^{ns}	0,870 ^{ns}	0,099 ^{ns}	0,944 ^{ns}	0,001 ^{**}

Onde: ^s= elementos solúveis em água; ^t= elementos totais; *Biochar* de acículas de Pinus; BMP= *Biochar* de madeira de Pinus; BCP= *Biochar* de casca de Pinus; BACM= mistura; ^{ns}= não significativo; ^{**}= significativo ao nível de 5%.

Tabela 18. Análise fatorial para os metais pesados dos fatores componente e dose.

Fator	Composição	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd
Componentes (<i>Biochar</i>)	BAP	15,74 a	5,22 b	72,78 a	30,32 b	29,96 a	0,79 a
	BMP	12,02 a	4,66 ab	37,88 c	19,52 a	30,89 a	0,73 a
	BCP	16,29 a	3,76 a	61,82 b	21,11 a	31,26 a	0,57 a
	BACM	17,06 a	4,17 a	66,17 b	34,03 b	40,73 b	0,66 a
Doses (%)	15	14,53 a	4,96 a	47,15 c	25,00 a	36,23 b	0,64 a
	30	14,40 a	4,15 a	54,70 b	26,31 a	36,09 b	0,70 a
	45	16,91 a	4,25 a	77,14 a	37,43 a	27,30 a	0,71 a
Interação	C X D	0,948 ^{ns}	0,103 ^{ns}	0,003 ^{**}	0,611 ^{ns}	0,379 ^{ns}	0,201 ^{ns}

Onde: BAP= *Biochar* de acículas de Pinus; BMP= *Biochar* de madeira de Pinus; BCP= *Biochar* de casca de Pinus; BACM= mistura; ^{ns}= não significativo; ^{**}= significativo ao nível de 5%.

Diante dos resultados observados, constatou-se que, com relação ao fator componente (tipo de *biochar*), o produzido a partir das acículas apresentou os melhores resultados. Para o fator doses (concentrações do *biochar* na composição dos substratos – 15, 30 e 45%), o aumento da concentração proporcionou melhorias em algumas propriedades físicas e químicas, tais como pH, Dbd e Wmo. Oliveira *et al.* (2018) encontrou os menores valores de densidade e maiores em retenção de água utilizando doses de 3.5 t ha⁻¹ de *biochar*. Apesar disto, o aumento das concentrações também apresentara efeitos negativos em algumas propriedades, como foi o caso da CE, Wv e concentrações de Ca e Mg. O Fósforo pode ser considerado um dos elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas (MORENO *et al.*, 2021), assim como Ca, Mg, K, Zn e N.

Matt *et al.* (2018) observaram também a diversidade de *biochar*, com características físicas e químicas distintas, que, de alguma maneira, afetarão o crescimento das plantas. Fato este comprovado no presente estudo, onde ficou evidente as diferenças entre os três tipos de *biochar* produzidos, reflexo das diferentes características das biomassas residuais utilizadas como matéria-prima. A caracterização da biomassa, portanto, é fator chave, no intuito de identificar e orientar o uso mais eficiente e adequado do produto final.

5.4. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO *BIOCHAR* NO DESENVOLVIMENTO E QUALIDADE DAS MUDAS DE *EUCALYPTUS BENTHAMII*

O *biochar* da biomassa residual de *Pinus taeda* foi incorporado, em três diferentes proporções, na composição do substrato comercial, a fim de verificar o seu potencial uso como condicionador. Os efeitos do *biochar* resultaram em melhorias nas propriedades dos substratos, resultando em efeitos positivos no crescimento das mudas de *Eucalyptus benthamii*, como pode ser observado a partir dos valores demonstrados na Tabela 16.

Estes resultados já vêm sendo evidenciados em alguns estudos ao longo dos anos, tais como Chidumayo (1995); Oliveira *et al.* (2009); Benites *et al.* (2009); Souchie *et al.* (2011); Herbert *et al.* (2012); Lima *et al.* (2013); Pluchon *et al.* (2014); Lima *et al.* (2016); Rezende *et al.* (2016); Santos *et al.* (2022), testando em diferentes espécies florestais, demonstrando resultados que se unem aos encontrados neste estudo, onde demonstra que o *biochar* consiste em uma alternativa de renovação, de viabilização econômica e também de modo sustentável. Esta utilização faz com que seu uso na composição de substratos torne uma prática semelhante a de logística reversa, pois, o resíduo gerado no final do ciclo produtivo florestal (a colheita florestal) é submetido à processos de conversão (pirólise) e retorna ao início do ciclo produtivo florestal, na produção de mudas.

Sobretudo, seu uso no sistema de produção de mudas altera as propriedades do substrato de cultivo, proporcionando melhor qualidade às mudas, além de influenciar diretamente nos retornos econômicos na produção de mudas florestais (CHO *et al.*, 2017). Ao avaliar a adição de *biochar* no crescimento de diferentes espécies de árvores, Gao *et al.* (2022) verificaram que a adição de *biochar* a uma taxa de 4% na composição dos substratos apresentou a melhor performance no desenvolvimento das plantas. Resultados estes reportados também por Tarin *et al.* (2020), onde observaram que a adição do *biochar* contribuiu para melhoria das características fisiológicas das plantas, aumentando a biomassa da espécie *Fokienia hodginsii*. *Biochar* produzido a partir de diferentes resíduos obteve diferentes efeitos no crescimento de plantas de *Khaya senegalenses* (Mogno Africano), observando que o *biochar* produzido a partir da casca de amendoim propiciou os melhores resultados para emergência, peso e número de folhas, demonstrando seu potencial de uso em viveiros (BAATUWIE *et al.*, 2020). Resultado similar foi observado por Palviainen *et al.* (2020), onde constaram que o *biochar* não apenas melhora o estoque de carbono, como também a produção de biomassa. Estes mesmos autores observaram, ainda, que o *biochar* derivado da madeira de *Picea abies* propiciou resultados positivos no crescimento de *Pinus sylvestris*.

Tabela 19. Valores médios das variáveis mensuradas para verificação do crescimento e qualidade das mudas de *Eucalyptus. benthamii*.

Trat.	Variáveis mensuradas								
	H (cm)	Dc (mm)	H/D	Lsr (mm)	MSPa (g)	MSr (g)	MSt (g)	Folhas	IQD
SB100	9,37 a	1,25 a	7,605 abc	150,36 abc	0,160 ab	0,576 ab	0,737 ab	15 ab	0,096 ab
Bmp15	14,02 bc	1,24 a	11,243 cd	159,33 abc	0,154 ab	0,516 abc	0,671 abc	13 b	0,090 ab
Bmp30	6,12 d	1,07 abc	5,770 d	153,48 abc	0,112 ab	0,292 de	0,405 cd	15 ab	0,067 abc
Bmp45	6,86 cd	1,10 ab	6,330 bcd	143,80 abc	0,120 ab	0,313 cde	0,434 bcd	16 a	0,063 abc
Bap15	6,96 cd	0,97 bc	7,274 abcd	151,92 abc	0,173 ab	0,358 cd	0,532 bc	15 ab	0,072 abc
Bap30	8,12 abc	1,04 abc	8,041 a	148,89 abc	0,260 a	0,633 a	0,894 a	15 ab	0,110 a
Bap45	8,75 ab	1,14 ab	8,027 a	165,49 a	0,212 ab	0,520 abc	0,732 ab	15 ab	0,090 ab
Bcp15	6,04 d	0,88 c	7,046 abcd	162,12 ab	0,088 b	0,115 e	0,203 d	15 ab	0,026 c
Bcp30	6,92 cd	1,21 a	5,888 d	139,07 c	0,197 ab	0,219 de	0,416 cd	15 ab	0,054 bc
Bcp45	8,01 abc	1,24 a	6,670 abcd	147,06 abc	0,172 ab	0,337 cd	0,510 bc	14 ab	0,072 abc
Bacm15	7,33 bcd	1,20 a	6,277 bcd	153,66 abc	0,171 ab	0,278 de	0,450 bcd	16 a	0,069 abc
Bacm30	7,84 bc	1,18 ab	6,603 abcd	151,53 abc	0,162 ab	0,401 bcd	0,564 bc	16 a	0,081 ab
Bacm45	7,87 bc	1,05 abc	7,781 ab	141,84 bc	0,217 ab	0,315 cde	0,532 bc	16 a	0,069 abc
ANOVA									
F valor	4,044	3,020	2,905	1,299	1,031	4,731	3,653	1,515	2,164
P valor	0,000**	0,001**	0,001**	0,225 ^{ns}	0,424 ^{ns}	0,000**	0,000**	0,125 ^{ns}	0,016**
Sd	6,415	0,248	5,194	23,708	,0157	0,269	0,356	2,663	0,051
CV (%)	24,41	22,10	25,40	15,65	92,90	71,74	65,42	17,01	68,91

Onde: H= altura (mm); Dc= diâmetro do colo (mm); H/D= relação altura diâmetro; Lsr= Largura do sistema radicular (mm); MSPa= massa seca da parte aérea(g); MSr= massa seca radicular (g); MSt= massa seca total (g); IQD= Índice de qualidade de Dickson; Sd= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; ^{ns}= não significativo; **= significativo ao nível de 5%.

Tabela 20. Análise fatorial para as variáveis dendrométricas das mudas para os fatores componente e dose.

Fator	Composição	H (cm)	Dc (mm)	H/D	LSr	MSPa	MSr (g)	MSt (g)	Nº Folhas	IQD
Componentes (Biochar)	BAP	7,947 A	1,052 A	7,781 A	155,437 A	0,215 A	0,504 A	0,719 A	15,28 B	0,090 A
	BMP	9,008 A	1,141 A	7,780 A	152,207 A	0,129 C	0,374 B	0,503 B	15,33 B	0,074 AB
	BCP	6,996 A	1,115 A	6,534 A	149,423 A	0,152 AB	0,224 C	0,377 B	15,33 B	0,051 B
	BACM	7,686 A	1,148 A	6,887 A	149,015 A	0,183 AB	0,331 B	0,515 B	16,72 A	0,073 AB
Doses (%)	15	8,594 a	1,077 a	7,960 a	156,761 a	0,147 a	0,317 a	0,464 a	15,10 a	0,064 a
	30	7,255 a	1,129 a	6,575 a	148,247 a	0,183 a	0,387 a	0,570 a	15,83 a	0,078 a
	45	7,878 a	1,135 a	7,201 a	149,554 a	0,180 a	0,371 a	0,552 a	16,06 a	0,074 a
Interação	C x D	0,112 ^{ns}	0,000 ^{**}	0,346 ^{ns}	0,146 ^{ns}	0,614 ^{ns}	0,003 ^{**}	0,017 ^{**}	0,347 ^{ns}	0,151 ^{ns}

Nota: ^{ns}= não significativo ao teste de significância; ^{**}= significativo a 5% pelo teste de comparação de médias de Duncan.

A altura e diâmetros são parâmetros importantes, pois determinam as condições de uma planta em ser estabelecida no campo, sua sobrevivência e crescimento (SOUZA *et al.*, 2006), isto é, plantas com alturas elevadas e diâmetros pequenos, quando no campo, tendem a tombar, ocasionando, conseqüentemente, na sua perda. Por isso, a variável relação h/d é importante, e, segundo Birchler *et al.* (1998), deve apresentar valores abaixo de 10%, o que, neste estudo, todos os tratamentos encontraram-se dentro do estabelecido. Cho *et al.* (2017) verificaram em seu estudo que a adição de *biochar* influenciou diretamente o crescimento em altura para a espécie de *Zelkova serrata*.

O tratamento Bap45 apresentou os melhores resultados para a variável Lsr. Isto por que, um dos efeitos do *biochar* está na morfologia do sistema radicular da planta (ZELAYA *et al.*, 2019). De acordo com Olmo *et al.* (2016) o comprimento de raiz muitas vezes está relacionado diretamente com a biomassa do sistema radicular. Kayama *et al.* (2022) verificaram, ao avaliar o crescimento de mudas de teca, que as raízes que crescem no eixo horizontal se desenvolvem sobre a área de aplicação do *biochar*, e, portanto, este deve ser aplicado sobre uma grande área para que seja eficaz. A concentração de fósforo (P) na composição do *biochar* pode ter influenciado no crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, uma vez que este elemento é responsável por esta variável no estágio inicial, observando que os tratamentos que obtiveram menores concentrações deste elemento (Bmp 15, 30 e 45) também se desenvolveram menos. Souchie *et al.* (2011) observou que o número de folhas, diâmetro do colo, massa seca da parte aérea, massa seca do sistema radicular e massa seca total das mudas de *Tachigali vulgaris* aumentaram conforme adição de *biochar* ao substrato. Solís *et al.* (2021) reportaram aumento no diâmetro, peso e número de folhas de *Cedrela odorata* ao aplicar doses de 25 e 50 ton/ha de *biochar* de madeira de *Tectona grandis*. O que corrobora com os resultados encontrados no presente estudo, onde os tratamentos com *biochar* de cascas e acículas, nas proporções 30 e 45% apresentaram os maiores valores para estas variáveis.

Os índices de qualidade de Dickson (IQD) apresentaram valores abaixo do mínimo estabelecido. Hunt (1990) e Birchler *et al.* (1998), recomendam que o índice de qualidade de Dickson para espécies florestais em viveiro seja menor que 10 e maior que 0.2, para que estas apresentem alta qualidade, ou seja, crescimento e sobrevivência após o plantio no campo. Apesar disso, alguns tratamentos foram iguais ou superiores quando comparado à testemunha (substrato comercial). Apesar dos índices terem apresentados valores baixos, denotou-se que houve um crescimento padrão entre os tratamentos, não havendo diferença notória para a testemunha, por exemplo, em comparação aos demais

tratamentos. O crescimento das plantas abaixo do esperado pode ser atribuído às condições ambientais do viveiro, tais como temperatura, umidade e frequência de irrigação, que interferindo nas condições do substrato, bem como da qualidade das sementes plantadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Cho *et al.* (2017), onde os tratamentos com *biochar* não tiveram efeitos significativos no crescimento das plantas. Moreno *et al.*, (2021) verificaram os maiores índices de qualidade quando o *biochar* de acácia em proporções de 40 e 50%. Os tratamentos Bacm, nas três composições, apresentaram maior número de folhas quando comparados aos demais tratamentos. Este fato deve ser atribuído a maior concentração de matéria orgânica no substrato, a partir da mistura dos três tipos de *biochar*. Assim como no estudo de Lima *et al.* (2013), o uso do *biochar* na composição dos substratos foi efetivo em termos de redução de custos de produção e melhor aproveitamento dos resíduos, além de melhorar as propriedades dos substratos, proporcionando melhor desenvolvimento das mudas.

As figuras 20, 21 e 22 mostram a ação do *biochar* na composição dos substratos. Com exceção da altura e diâmetro, os tratamentos com *biochar* na composição se mostraram superiores ao substrato comercial (testemunha), demonstrando o potencial de uso como componente e condicionador, pois, além de proporcionar incremento na matéria orgânica fresca, apresenta melhorias nas propriedades físicas e biológicas do substrato. Estas evidências são semelhantes as já observadas por outros autores (Marimon-Júnior *et al.*, 2012; Petter *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2013; Puentes-Escobar *et al.* 2022).

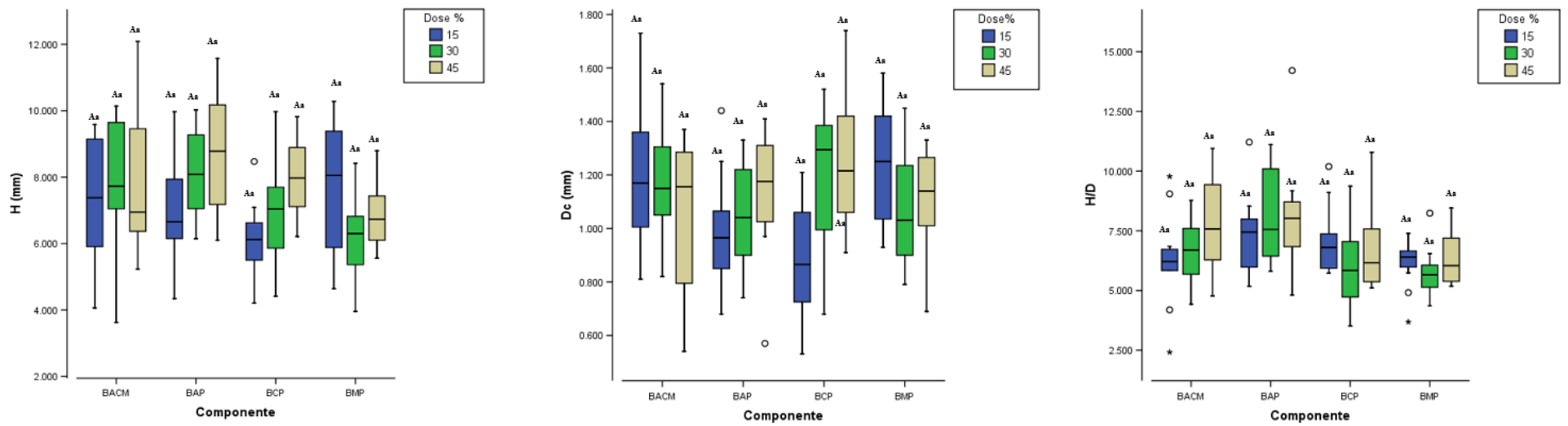


Figura 20. Análise dos fatores “tipo de *biochar*” e “doses”. Onde: BACM= *Biochar* de mistura de *Pinus*; BAP= *Biochar* de acículas de *Pinus*; BCP= *Biochar* de cascas de *Pinus*; BMP= *Biochar* de madeira de *Pinus*. Letras maiúsculas: componentes; Letras minúsculas: doses.

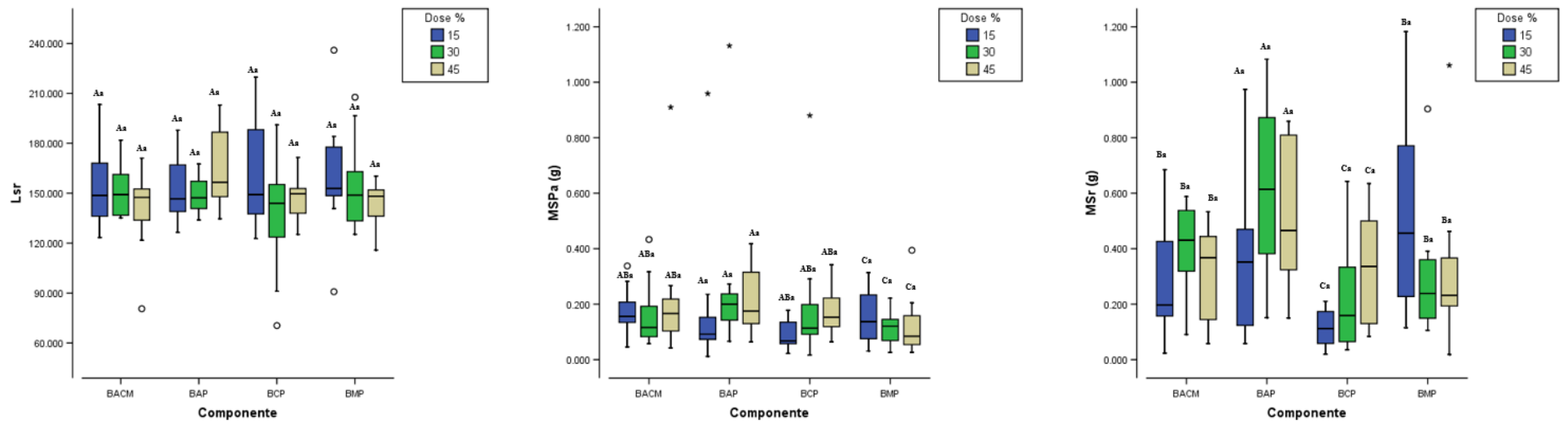


Figura 21. Análise dos fatores “tipo de *biochar*” e “doses”. Onde: BACM= *Biochar* de mistura de *Pinus*; BAP= *Biochar* de acículas de *Pinus*; BCP= *Biochar* de cascas de *Pinus*; BMP= *Biochar* de madeira de *Pinus*. Letras maiúsculas: componentes; Letras minúsculas: doses.

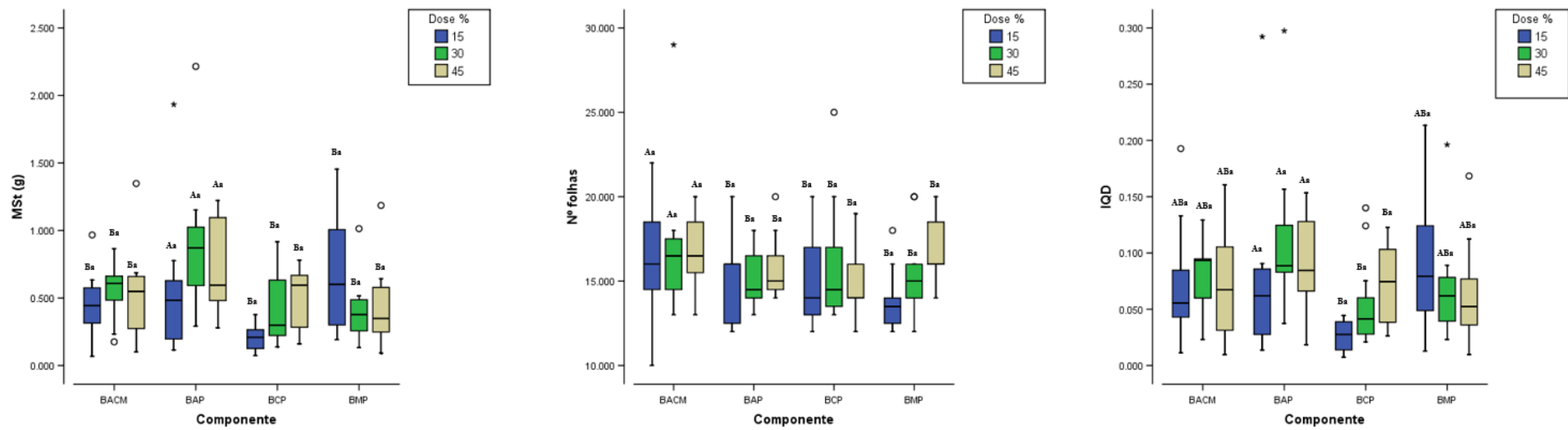


Figura 22. Análise dos fatores “tipo de *biochar*” e “doses”. Onde: BACM= *Biochar* de mistura de *Pinus*; BAP= *Biochar* de acículas de *Pinus*; BCP= *Biochar* de cascas de *Pinus*; BMP= *Biochar* de madeira de *Pinus*. Letras maiúsculas: componentes; Letras minúsculas: doses.

Gosh *et al.* (2015) observaram resposta significativa no crescimento das plantas de *Samanea saman* e *Suregada multiflora* quando combinadas com *biochar* na composição de substratos. Este propiciou um incremento nas concentrações de N, P e K, refletindo assim em maiores concentrações de N, P e K nas plantas. Ainda, o uso do *biochar* resultou em melhorias na qualidade do meio de cultivo e das plantas. Zoghi *et al.* (2019) verificaram incremento no crescimento das plantas de *Quercus castaneifolia* utilizando *biochar* de cavacos de madeira de álamo.

Yaebiyo *et al.* (2023) observaram, ao produzir mudas de *Camellia sinensis* e *Yushinia alpina* com *biochar* em combinação com déficit de irrigação, um bom desenvolvimento no peso, diâmetro e ramos das espécies. O *biochar*, ainda, afetou a transpiração e fotossíntese das espécies e proporcionou melhorias nas condições de umidade. Estudos similares foram realizados por Fraç *et al.* (2022), onde verificaram que o uso do *biochar* combinado com fertilização orgânica pode ser recomendado pra produção de espécies frutíferas, uma vez que obtiveram efeitos positivos no crescimento e rendimento de produção das espécies e por Lefebvre *et al.* (2019), que utilizando *biochar* na produção de duas espécies tropicais, indicou que sua combinação com fertilizantes apresentou os melhores crescimentos das plantas. Sorrenti *et al.* (2019) verificaram, ainda, que o *biochar* melhorou o status nutricional de árvores frutíferas. No presente estudo não se utilizou de fertilizantes e fertirrigação. O uso de fertilizantes e fertirrigação na produção contribui para o melhor crescimento das plantas.

6. CONCLUSÕES

Em síntese, os resultados encontrados no presente estudo permitem concluir que:

Os resíduos provenientes da colheita florestal de *Pinus taeda*, divididos em três compartimentos, sendo estes as acículas, cascas e madeira, apresentaram características potenciais como matéria-prima para produção de *biochar*, tais como alta disponibilidade, alto teor de cinzas (acículas), tamanho e formato das partículas (cascas) e elevados teores de carbono e matéria orgânica (madeira).

Por meio da técnica de pirólise, classificada como lenta, a uma temperatura de 350 °C, constatou-se que o *biochar* produzido a partir dos resíduos da colheita florestal de *Pinus taeda*, embora tenha apresentado comportamentos distintos entre as biomassas, em virtude das suas características distintas entre si, apresentou bom rendimento e características desejáveis, tais como baixa densidade, teor de cinzas, carbono, matéria orgânica e nutrientes. O *biochar* de acículas apresentou as maiores concentrações de nutrientes, o *biochar* de cascas apresentou maior porosidade e volume de ar, e o *biochar* de madeira, os maiores teores de carbono e matéria orgânica.

A avaliação dos efeitos da adição do *biochar*, nas proporções de 15, 30 e 45% na composição dos substratos de cultivo, evidenciou o seu potencial de uso como condicionador, pois proporcionou incremento nas propriedades físicas e biológicas do substratos, tais como porosidade, volume de ar, baixa densidade e aumento na retenção de água, características estas que são importantes e requeridas a fim de elevar a qualidade dos substratos.

Tendo em vista os aspectos observados no crescimento e qualidade das mudas de *Eucalyptus benthamii*, estas foram afetadas positivamente a partir da adição de *biochar* na composição dos substratos de cultivo. As maiores variáveis dendrométricas, tais como largura do sistema radicular (Lsr), massa seca radicular (MSr), massa seca da parte aérea (MSPa), massa seca total (MSt) e índice de qualidade de Dickson (IQD), foram observadas para o substrato de cultivo com adição de *biochar* das acículas, nas proporções de 30 e 45%.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em vista dos fatos mencionados, embora a biomassa residual da colheita florestal de *Pinus taeda* permaneça em grande parte no campo, por questões de manejo e manutenção das qualidades do solo, esta biomassa apresenta um potencial mais elevado de utilização, tendo em vista suas características a alta disponibilidade, podendo ser transformado em um produto com maior valor agregado.

Embora, por questões práticas de campo haja a necessidade de um estudo mais amplo, a conversão termoquímica desta biomassa residual é uma alternativa promissora, transformando um material que, pelos métodos convencionais atualmente utilizados, emitem gases do efeito estufa, onde por meio da pirólise estes gases não são emitidos. O *biochar* produzido a partir desta técnica, apresenta em sua composição, elevado teor de carbono de característica recalcitrante, de lenta decomposição, atuando no sequestro de carbono e armazenamento deste no solo.

Por todos estes aspectos, o uso do *biochar* é amplo, atuando desde a remoção de contaminantes da água e solo, auxílio na mitigação dos gases de efeito estufa, além de apresentar potencial de remediação e condicionador de solo, na disponibilização de nutrientes e melhorias nas propriedades físicas e biológicas, podendo substituir parcialmente o uso de fontes não renováveis de nutrientes, tais como os fertilizantes. Além disto, seu uso na composição de substratos de cultivos torna-se outra alternativa, frente aos aspectos observados, diante das melhorias das propriedades dos substratos e incremento no crescimento e qualidade das plantas.

O presente trabalho traz como contribuições a utilização diferente daquela já utilizada, de um resíduo que apresenta elevada taxa de geração e com potencial grande de uso. Além disso, permite utilizar um produto que auxilie na redução das emissões de gases do efeito estufa, contribuindo com as questões ambientais. Dado o exposto, o uso do *biochar* testando diferentes parâmetros do processo de produção, avaliação de mais tempo nos substratos de cultivo, diferentes granulometrias e também o uso de fertirrigação na produção de mudas são sugestões para futuros estudos.

8. BIBLIOGRAFIA

ABDEL-FATTAH, T.; MAHMOUD, M.; AHMED, S.; HUFF, M.; LEE, J.; KUMAR, S. *Biochar* from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 22, 103–109, 2015.

ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAN, M.; WESSOLEK, G. Impact of *biochar* and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. Elsevier B. v. All Rights Reserved., Berlin, Germany, p.183-191, 24 abr. 2013. **Geoderma** 202–203183–191, 2013.

AHMAD, M.; LEE, S. S.; RAJAPAKSHA, A. U.; VITHANAGE, M.; ZHANG, M.; CHO, J. S.; LEE, S.; OK, Y. S. Trichloroethylene adsorption by pine needle *biochars* produced at various pyrolysis temperatures. **Bioresource Technology** 143, 615-622, 2013.

AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. *Biochar* as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, 99, 19-33, 2014.

AHMED, N.; ZEESHAN, M.; IQBAL, N.; FAROOQ, M. Z.; SHAH, S. A. Investigation on bio-oil yield and quality with scrap tire addition in sugarcane bagasse pyrolysis, **Journal of Cleaner Production**, Volume 196, Pages 927-934, ISSN 0959-6526, 2018.

ALMEIDA, B. O. de. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais**. 2016. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa: Recursos florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2016.

ALMEIDA, S. R. **Pirólise de casca de arroz: estudo de parâmetros e caracterização de produtos**, 2010. 74f. Dissertação (Mestrado em ciências dos materiais) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

ASTM Standard D1762 – 84. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2013.

ATEŞ, F.; MISKOLCZI, N.; BORSODI, N. Comparision of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part I: product yields, gas and pyrolysis oil properties. **Bioresource Technology**, 133, pp. 443–454, 2013.

BAATUWIE, B. N.; NASARE, L. I.; TEFUTOR, E. G. *Biochar* as an alternative growth medium for tree seedlings in the Guinea Savanna Zone of Ghana. **African Journal of Plant Science**, Vol. 14(7), 248-253, July 2020.

BASÍLIO, J. J. N.; RODRIGUES, L. A.; SILVA, M. S. A.; COLEN, F.; OLIVEIRA, L. S. *Biochar* de casca de pequi como componente de substrato para produção de mudas de *Eucalyptus urophylla* S. T. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 12, p. 01–10, 2020.

BASTOS, D. C.; PIO, R.; SCARPARE FILHO, J. A.; LIBARDI, M. N.; ALMEIDA, L. F. P.; ENTELMANN, F. A. Diferentes substratos na produção de porta-enxertos de caramboleira. **Ciência e Agro tecnologia**, v. 31, n. 2, p. 312-316, 2007.

BATISTA, E. M., SHULTZ, J., MATOS, T. T., FORNARI, M. R., FERREIRA, T. M., SZPOGANICZ, B., MANGRICH, A. S. Effect of surface and porosity of *biochar* on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Scientific Reports**, v8, p.1-9, 2018.

BELINI, G. B. **Termogravimetria aplicada para caracterização da biomassa**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, SP, 2018.

BENITES, V. M.; TEIXEIRA, W. G.; REZENDE, E. M.; PIMENTA, A. S. Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: Aprendendo com as terras Pretas de Índio. In: TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 285-296.

BIANCHI, O.; CASTEL, C. D.; DE OLIVEIRA, R. V. B.; BERTUOLI, P. T.; HILLIG, E. Avaliação da degradação não- isotérmica de madeira através de termogravimetria-TGA. **Polímeros**, v. 20, n. 5, p. 395–400, 2010.

BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. *Biochar* and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **Global Change Biology. Bioenergy**, v. 5, p. 202–214, 2013.

BIRCHLER, T.; ROSE, R. W.; ROYO, A.; PARDOS, M. La planta ideal: revision del concepto, parámetros definitorios e implementacion practica. **Investigacion Agraria, Sistemas y Recursos Forestales**, v.7, n.1/2, p.109-121, 1998.

BLASI, C. DI. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.34, p.47–90, 2008.

BOLAN, N. S.; KUNHIKRISHNAN, A.; CHOPPALA, G.; THANGARAJAN, R.; CHUNG, J. Stabilization of carbon in composts and *biochars* in relation to carbon sequestration and soil fertility. **Science of the Total Environment**, 424:264–270, 2012.

BON, E. P. S.; FERRARA, M. A.; CORVO, M. L. Enzimas em biotecnologia: produção, aplicação e Mercado. Rio de Janeiro: **Interciência**: UFRJ: CAPES: FAPERJ: FTC, Portugal, p.506, 2008.

BRAZ, L. R.; NUTTO, L.; BRUNSMEIER, M.; BECKER, G.; SILVA, D. A. da. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia - uma análise da cadeia produtiva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 5, n. 2, p. 168-181, Mai. 2014.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012.

BRUN E. J.; BRUN, F. G. K.; SCHUMACHER, M. V.; SILVA, G. M. A. da. Contribuição de nutrientes ao solo por resíduos de serraria de Pinus. **Disciplinarum Scientia**, 22(1): 1-17, 2021.

CABEZA, A.; SOBRÓN, F.; YEDRO, F. M.; GARCÍA-SERNA, J. Autocatalytic kinetic model for thermogravimetric analysis and composition estimation of biomass and polymeric fractions. **Fuel**, v. 148, p. 212–225, 2015.

CAO, X.; HARRIS, W. Properties of dairy-manure-derived *biochar* pertinent to its potential use in remediation. **Bioresource Technology**, 101 (14), 5222–5228, 2010.

CARRIER, M.; LOPPINET-SERANI, A.; DENUX, D.; LASNIER, J. M. HAM-PICHAVANT, F., CANSELL, F.; AYMONIER, C. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 298–307, 2011.

CASTRO A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. H. F.; CÂNDIDO, W. L.; SANTOS, R. C. Quantification of forestry and carbonization waste. **Renewable Energy**, 103(4): 432-438, 2017.

CAYUELA, M. L.; JEFFERY, S.; VAN ZWIETEN, L. The molar H: corg ratio of *biochar* is a key factor in mitigating N₂O emissions from soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 202:135–138, 2015.

CHAIB, J. G. **Produção de *biochar* por pirólise de resíduos verdes de um horto e avaliação do seu potencial no crescimento de *Lactuca sativa***. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto. Departamento de Engenharia Mecânica. 2019.
CHAN K. Y.; XU Z. *Biochar* nutrient properties and their enhancement. **En *Biochar for Environmental Management-Science and Technology***. Editores: Lehmann J, Joseph S. pp 68-84, 2009.

CHANG, L.; WANG, B.F.; LIU, X. H.; CALLAHAM, M.A.; GE, F. Recovery of collembola in pinus tabula e formis plantations. **Pedosphere**, v. 27, p. 129–137, 2017.

CHEN, W.; LIU, X.; HE, R. L.; LIN, T.; ZENG, Q. F.; WANG, X. G. Activated carbon powders from wool fibers. **Powder Technology**, 234, 76-83, 2013.

CHIDUMAYO, E. N. Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 70, p. 353-357, 1994.

CHO, M. S.; MENG, L.; SONG, J.; HAN, S. H.; BAE, K.; PARK, B. B. The effects of *biochars* on the growth of *Zelkova serrata* seedlings in a containerized seedling production system. **Forest Science and Technology**, vol. 13, n° 1, 25-30, 2017.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. 2001. Food additives and contaminants. ALINORM 01/12A:1-289. Geneva: Joint FAO/ WHO **Food Standards Programme**. Available from: <<http://www.codexalimentarius.org/>>. Accessed: Set. 2023.

COELHO DE CARVALHO BENINI, K. C.; VOORWALD, H. J. C.; CIOFFI, M. O. H.; MILANESE, A. C.; ORNAGHI JR, H. L. Characterization of a New Lignocellulosic Fiber from Brazil: Imperata brasiliensis (Brazilian Satintail) as an Alternative Source for Nanocellulose Extraction. **Journal of Natural Fibers**, v. 14, n. 1, p. 112–125, 2016.

COLEN, F.; FIGUEIREDO, F. F.; FERNANDES, L. A.; SAMPAIO, R. A.; MOTA, M. F. C.; SOUZA, L. H. Temperatura e tempo de residência na produção de *biochar* oriundo de dejetos de galinhas poedeiras. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 12, p. 01-08, 2020.

COSTA, A. C. S.; OLIVEIRA, A. C.; FREITAS, A.; LEAL, C. S.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializado em Cuiabá-MT. **Nativa**, Sinop, v. 5, n. 6, p. 456-461, 2017.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, p. 10-13, 1960.

DING, X., LI, G., ZHAO, X., *et al.*, “*Biochar* application significantly increases soil organic carbon under conservation tillage: an 11-year field experiment”, **Biochar**, v. 5, pp. 28, 2023.

DING, Y.; LIU, Y.; LIU, S.; LI, Z.; TAN, X.; HUANG, X.; ZENG, G.; ZHOU, L.; ZHENG, B. *Biochar* to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, 36 (2), 2016.

DOKE, K. M.; CHAVAN, A.; NALAWADE, R.; KHAN, E. M. Kinetics and Equilibrium Isotherm for adsorption of Basic Blue 9 Dye onto Activated Charcoal prepared from Bhagar Seed Husk. **Journal of Materials and Environmental Science**, 4, 374-383, 2013.

DOMINGUES, M. T.; BUENO, C. C.; WATANABE, C. H.; FRACETO, L. F.; LOYOLA, C.; CROWLEY, D.; ROSA, A. H. Polymeric Alginate microspheres containing *biochar* to immobilize phosphate ions. **Chemical Engineering Transactions**, 114p, 2014.

DUMROESE, K.R.; HEISKANEN, J.; ENGLUND, K.; TERVAHAUTA, A. Pelleted *biochar*: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. **Biomass and Bioenergy**, 35: 2018-2027, 2011.

EDUSSURIYA, R.; RAJAPAKSHA, A. U.; JAYASINGHE, C.; PATHIRANA, C. VITHANAGE, M. Influence of *biochar* on growth performances, yield of root and tuber crops and controlling plant-parasitic nematodes. **Biochar**, 5:68, 2023.

ELKHLIFI, Z.; IFTIKHAR, J.; SARRAF, M.; ALI, B.; SALEEM, M. H.; IBRANSHAHIB, I.; BISPO, M. D.; MEILI, L.; ERCISLI, S.; KAYABASI, E. T.; ANSARI, N. A.; USOVÁ, A. H.; CHEN, Z. Potential Role of *Biochar* on Capturing Soil Nutrients, Carbon Sequestration and Managing Environmental Challenges: A Review. **Sustainability**, 15, 2527, 2023.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 212p, 1997.

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J., Characterization of *biochars* to evaluate recalcitrance and agronomic performance, **Bioresource Technology**, 114, 644-553, 2012.

FARHANGI-ABRIZ, S.; TORABIAN, S. *Biochar* improved nodulation and nitrogen metabolism of soybean under salt stress. **Symbiosis**. v. 74:215-223; 2018.

FERREIRA, S. D. **Estudo da viabilidade da conversão térmica de resíduos de fibra de média densidade (MDF)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

FERREIRA, S. D.; MANERA, C.; SILVESTRE, W. P.; PAULETTI, G. F.; ALTAFINI, C. R.; GODINHO, M. Use of *Biochar* Produced from Elephant Grass by Pyrolysis in a Screw Reactor as a Soil Amendment. **Waste and Biomass Valorization**, 2018.

FERREIRA, S.; MOREIRA, N.; MONTEIRO, E. Bioenergy overview for Portugal. **Biomass and Bioenergy**, 33, 1567-1576, 2009.

FIGUEREDO, N. A.; COSTA, L. M.; MELO, L. C. A.; SIEBENEICHLERD, E. A.; TRONTO, J. Characterization of *biochars* from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, p.395-403, 2017.

FRAÇ, M.; SAS-PASZT, L.; SITAREK, M. Influence of *biochar* on the vegetative and generative growth of “Meredith” peach trees. **Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus**, Vol. 21, No. 5, 2022.

FREITAS, G. A.; SILVA, R. R.; BARROS, H. B.; MELO, A. V.; ABRAHÃO, W. A. P. Produção de mudas de alface em função de diferentes combinações de substratos. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, p.159-166, 2013.

from *Eucalyptus* bark using amine-sulfonate functionalized ioni liquids. **Green Chemistry**, London, v. 17, p. 4913-4920, 2015.

GAO, T.; ZHU, Q.; ZHOU, Z.; WU, Y.; XUE, J. Effects of *Biochar*-Based fertilizers on energy characteristics and growth of Black Locust seedlings. **Sustainability**, 14, 5045, 2022.

GASKIN, J.W.; STEINER, C.; HARRIS, K.; DAS, K.C.; BIBENS, B. Effect of low temperature pyrolysis conditions on *biochar* for agricultural use. **Trans Asabe**, v. 51, p. 2061–2069, 2008.

GAUNT, J.; COWIE A. *Biochar*, greenhouse gas accounting and emissions trading. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management: science and Technology**. London: Earthscan, p. 317-340, 2009.

GELARDI, D.; PARIKH, S. Soils and beyond: optimizing sustainability opportunities for *biochar*. **Sustainability** 13 (18), 2021.

GEORGES, F. **Caracterização da palha da cana-de-açúcar do Rio Grande do Sul e de seus produtos de pirólise** (Dissertação de Mestrado); Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2011.

GHANI, W. A. W. A. K.; MOHD, A.; da SILVA, G.; BACHMANN, R. T.; TAUFIQ-YAP, Y. H.; RASHID, U.; AL-MUHTASEB, A. A. H. *Biochar* production from waste rubber wood sawdust and its potential use in C sequestration: Chemical and physical characterization. **Industrial Crops and Products**, 44p., 2013.

GHEZZEHEI, T.A.; SARKHOT, D. V.; BERHE, A. A. *Biochar* can be used to capture essential nutrients from dairy wastewater and improve soil physico-chemical properties. **Solid Earth**, v.5, p. 953-962, 2014.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. **Biology and fertility of soils**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2002.

GLASER, B.; LEHR, V. *Biochar* effects on phosphorus availability in agricultural soils: a meta-analysis. **Scientific Reports**. 9 (1), 2019.

GLISCZYNSKI, F. V.; PUDE, R.; AMELUNG, W.; SANDHAGE-HOFMANN A. *Biochar*-compost substrates in short-rotation coppice: effects on soil and trees in a three-year field experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, p 574–583, 2016.

GOMES, I. A. S.; OLIVEIRA, M. E. C.; VERAS, C. A. G.; COLATTO, I. V. W. **Aumento no Rendimento de Carvão Vegetal da Casca de Arroz por Meio da Carbonização Pressurizada a 2 bar.** 3º RS, Brasil, pg. 8, 2012.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C. ALMEIDA, A. Q. de.; JÚNIOR, J. I. T. de. C. Sewage sludge derived *biochar* and its effect on the growth and morphological traits of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden SEEDLINGS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 687-695, Abr - jun., 2018.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C. L.; COMERFORD, N. B.; MOLINE, E. F. V.; SHIRLEY, J. P.; GUIMARAES, N. B. Pyrolysis methods impact biosolids derived *biochar* composition, maize growth and nutrition. **Soil & Tillage Research**, 165: 59–65, 2017.

GOSH, S.; OW, L. F. WILSON, B. Influence of *biochar* and compost on soil properties and tree growth in a tropical urban environment. **International Journal of Environment Science and Technology**, 12:1303-1310, 2015.

GUL, S.; WHALEN, J. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in *biochar*-amended soils. **Soil Biology and Biochemistry**. 103, 1–15, 2016.

GWENZI, W.; CHAUKURA, N.; NOUBACTEP, C.; MUKOME, F. N. D. *Biochar*-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. **Journal of environmental management**, v. 197, p. 732-749, 2017.

GWENZI, W.; NYAMBISHI, T. J.; CHAUKURA, N.; MAPOPE, N. Synthesis and nutrient release patterns of a *biochar*-based N-P-K slow-release fertilizer. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 15:405-414, 2018.

HASSEN-TRABELSI, A. B.; KRAIEM, T.; NAOUI, S.; BELAYOUNI, H. Pyrolysis of waste animal fats in a fixed-bed reactor: Production and characterization of bio-oil and bio-char, **Waste Manage**, 34, 210, 2014.

HERBERT, L.; HOSEK, I.; KRIPALANI, R. **The Characterization and Comparison Of biochar Produced from A Decentralized Reactor Using Forced Air and Natural Draft Pyrolysis**. Dissertação. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2012.

HOSSEINAEI, O.; WANG, S.; ENAYATI, A. A.; RIALS, T. G. Effects of hemicellulose extraction on properties of wood flour and wood-plastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 4, p. 686–694, 2012.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2019. S.l: Indústria Brasileira de Árvores, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2020. S.l: Indústria Brasileira de Árvores, 2020. 80 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2022. S.l: Indústria Brasileira de Árvores, 2022. 96 p.

INTERNATIONAL *BIOCHAR* INITIATIVE (IBI). Standardized product definition and product testing guidelines for *biochar* that is used in soil, 2015.

INYANG, M. B.; GAO, Y.; YAO, Y.; XUE, A. R.; ZIMMERMAN, P.; PULLAMMANAPPALLIL, X. CAO. Removal of heavy metals from aqueous solution by *biochars* derived from anaerobically digested biomass. **Bioresource Technology**, 110, pp. 50–56, 2012.

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

JAMRADLOEDLUK, J.; LERTSATITTHANAKORN, C. Characterization and Utilization of Char Derived from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes, **Procedia Engineering**, 69, 1437, 2014.

JOSEPH, S.; TAYLOR, P.; REZENDE, F.; DRAPER, K.; COWIE, A. The Properties of Fresh & Aged *Biochar*. Retrieved 2022-02-14, from, 2018.

KAYAMA, M.; NIMPILA, S.; HONGTHONG, S.; YONEDA, R.; HIMMAPAN, W.; NODA, I. Effects of *biochar* on the early growth characteristics of teak seedlings planted in sandy soil in northeast Thailand. **Bulletim of FFPRI**, Vol 21, n°1, 73-81, 2022.

KIM, U. J.; EOM, S. H.; WADA, M. Thermal decomposition of native cellulose: influence on crystallite size. **Polymer Degradation and Stability**, v.95, p.778-781, 2010.

KIRKBY, E.; JOHNSTON, A. Soil and fertilizer phosphorus in relation to crop nutrition. In: White, P., Hammond, J., White, P., Hammond, J. (Eds.), *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions*. **Springer Netherlands- The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions** pp. 177–223, 2008.

KLOSS, S.; ZEHETNER, F.; OBURGER, E.; BUECKER, J.; KITZLER, B.; WENZEL, W.W.; WIMMER, B.; SOJA, G. Trace element concentrations in leachates and mustard plant tissue (*Sinapis alba* L.) after *biochar* application to temperate soils. **Science of the Total Environment**, v. 481, p. 498–508, 2014.

KONG, L.; GAO, Y.; ZHOU, Q.; ZHAO, X.; SUN, Z. *Biochar* accelerates PAHs biodegradation in petroleum-polluted soil by bio stimulation strategy. **Journal of Hazard Materials**, 343, 276e284, 2017.

KULCZYCKI, G.; MAGNUCKA, E. G.; OKSINSKA, M. P.; KUCINSKA, J.; KOBYLECKI, R.; PAWESKA, K.; ZARZYCKI, R.; KACPRAZK, A.; PIETR, S. J. The effect of various types of *biochar* mixed with mineral fertilization on the development and ionome of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings and soil properties in a pot experiment. **Agronomy**, 10, 1903, 2020.

LAGHARI, M.; NAIDU, R.; XIAO, B.; HU, Z.; MIRJAT, M.S.; HU, M.; KANDHRO, M.N.; CHEN, Z.; GUO, D.; JOGI, D.; ABUDI, Z.N.; FAZAL, S. Recent developments in *biochar* as an effective tool for agricultural soil management: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 96: 4840–4849, 2016.

LAIRD, D. A.; BROWN, R. C.; AMONETTE, J. E.; LEHMANN, J. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and bio-char, **Biofuels Bioproducts and Biorefining**, 3, 547-562, 2009.

LAIRD, D. A.; FLEMING, P.; DAVIS, D. D.; HORTON, R.; WANG, B.; KARLEN, D. L. Impact of *biochar* amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 443–449, set. 2010.

LAVIOLA, B. G.; LIMA, P. A.; JÚNIOR, A. W.; MAURI, A. L.; VIANA, R. S.; LOPES, J. C. Efeito de diferentes substratos na germinação e no desenvolvimento inicial de jiloeiro (*Solanum gilo* RADDI), cultivar verde claro. **Ciência e Agrotecnologia**, v.30, n.3, p. 415-421, 2006.

LEFEBVRE, D.; ROMÁN-DAÑOBAYTIA, F.; SOETE, J.; CABANILLAS, F.; CORVERA, R.; ASCORRA, C.; FERNANDEZ, L. E.; SILMAN, M.; *Biochar* effects on two tropical tree species and its potential as a tool for reforestation. **Forests**, 10, 678, 2019.

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

LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, 447: 143-144, 2007.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p 403-427, 2006.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. *Biochar for Environmental Management*. [s. l: s. n.]. v. 1p. 449, 2009.

LEHMANN, J.; RILLIG, M.C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D. *Biochar* effects on soil biota – a review. **Soil Biology and Biochemistry**, 43, 1812–1836, 2011.

LEHMANN, J.; SKJEMSTAD, J.; SOHI, S.; CARTER, J.; BARSON, M.; FALLOON, P.; COLEMAN, K.; WOODBURY, P.; KRULL, E. Australian climate–carbon cycle feedback reduced by soil black carbon. **Nature Geoscience**, 1, 832–835, 2008.

LENG, L.; XIONG, Q.; YANG, L.; LI, H.; ZHOU, Y.; ZHANG, W.; JIANG, S.; LI, H.; HUANG, H. An Overview on Engineering the surface Area and porosity of *Biochar*. **Science of The Total Environment**, vol. 763, 2021.

LI, S.; HARRIS, S.; ANANDHI, A.; CHEN, G. Predicting *biochar* properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: a review and data syntheses. **Journal of Cleaner Production** 215, 890–902, 2019.

LIMA, S. L.; JUNIOR, B. H. M.; MELO-SANTOS, K. S.; REIS, S. M.; PETTER, F. A.; VILAR, C. C.; MARIMON, B. S. *Biochar* no Manejo de Nitrogênio e Fósforo para a produção de mudas de angico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.2, p.120-131, fev. 2016.

LIMA, S. L.; MARIMON JUNIOR, B. H.; PETTER, F. A.; TAMIOZZO, S.; BUCK, G. B.; MARIMON, B. S. *Biochar* as substitute for organic matter in the composition of substrates for seedlings. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 333- 341, 2013.

LIU, Y. J.; HUANG, W. J. Quantitative Analysis of Graphene Sheet Content in Wood Char Powders during Catalytic Pyrolysis. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 29, n. 5, p. 406–410, Mai. 2013.

LIU, T.; LIU, B.; ZHANG, W. Nutrients and heavy metals in *biochar* produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. **Polish Journal of Environmental Studies**, Poland, v. 23, n. 1, p. 271- 275, 2014.

LOPES, M. A. **Gerenciamento de resíduos madeireiros em pequenas indústrias de produtos de madeira de maior valor agregado**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

LORENZ, K.; LAL, R. *Biochar* application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, p. 651–670, 2014.

LORENZO, N. F.; FUENTE, E.; RUIZ, I. S.; RUIZ, B. KOH activated carbon from conventional and microwave heating system of a macroalgae waste from the Agar–Agar industry. **Fuel Processing Technology**, 121, 25-31, 2014.

MAIA, C. M. B. F.; MADARI, B. E.; NOVOTNY, E. H. Advances in *biochar* research in Brazil. **Dynamic soil, Dynamic plant**, v.5, p.53-58, 2011.

MALTA T. F *et al.* Reaproveitamento de resíduos florestais e industriais de madeira. In: 9º SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – SIEPE, 2017. **Anais...** Santana do Livramento. Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa, 2017.

MARIMON-JUNIOR, B. H.; PETTER, F. A.; ANDRADE, F.; MADARI, B. E.; MARIMON, B. S.; SCHOSSLER, T. R.; GONCALVES, L. G. V.; BELÉM, R. S. Produção de mudas de jiló em substrato condicionado com *Biochar*. **Comunicata Scientiae**, v. 3, n. 2, p. 108-114, 2012.

MAROUSEK, J.; MAROUSKOVA, A.; GAVUROVA, B.; MINOFAR, B. Techno-economic considerations on cement substitute obtained from waste refining. **Journal of Cleaner Production**, 412, 137326, 2023.

MATT, C. P.; KEYES, C. R.; DUMROESE, R. K. *Biochar* effects on the nursery propagation of 4 northern Rocky Mountain native plant species. **Native plants Journal**. V. 19, 14-26, 2018.

MELOROSE, J.; PERROY, R.; CAREAS, S. Implementation of the global efficiency equipment in the machining sector. **Statewide Agricultural Land Use Baseline 1**, 163–172, 2015.

MELZER, M.; BLINA, J.; BENSACKHRIAC, A.; VALETTEB, J.; BROUSTB, F. Pyrolysis of extractive rich agro-industrial residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.104, p. 448-460, 2013.

MÉNDEZ, A.; GÓMEZ, A.; PAZ-FERREIRO, J.; GASCÓ, G. Effects of *biochar* from sewage sludge pyrolysis on Mediterranean agricultural soils. **Chemosphere**, v. 89, n. 11, p. 1354-1359, Nov. 2012.

MOHAN, D.; PITTMAN, C.U.; STEELE, P.H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review, **Energy Fuels**, 20, 848-889, 2006.

MORENO, G. R.; FERNÁNDEZ, M. H.; CONTRERAS, E. D.; Balanced mixture of *biochar* and synthetic fertilizer increases seedling quality of *Acacia mangium*. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 20, 371-378, 2021.

MOTA, Mauro Franco Castro. **Uso do biochar de eucalipto na produção de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) – Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais/Instituto de Ciências Agrárias, 2020.

NARTEY, O.; ZHAO, B. *Biochar* preparation, characterization, and adsorptive capacity and its effect on bioavailability of contaminants: an overview. **Advances in Materials Science and Engineering**, 1–12, 2014.

NATALLI, L. H.; HILLIG, E.; SOUZA de, J. B.; VIDAL, C. M. S.; SALDANHA, L. K. By-Products of the Timber Industries as Raw-Material for the Production of MDP (Medium Density Particleboard). **Floresta e Ambiente**, 29(3), 2022.

NEJELISKI, D. M.; VIEIRA, A. Z.; TESCKE, L. R.; RIGO, F. C. Produção de brinquedos a partir de resíduos de marcenarias. **Boletim Técnico-Científico**, v. 2, n. 1, 28 Nov. 2016.

NELISSEN, V.; RUYSSCHAERT, G.; MÜLLER-STÖVER, D.; BODÉ, S.; COOK, J.; RONSSE, F.; SHACKLEY, S.; BOECKX, P.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Short-Term Effect of Feedstock and Pyrolysis Temperature on *biochar* Characteristics, Soil and Crop Response in Temperate Soils. **Agronomy**, 4: 52–73, 2014.

NELSON, S. D.; NELSON, M. D.; NELSON, D. S.; JOHNSTON, D.; NELSON, S. C.; Veritas Substrates LLC. Plant Substrate Growing Medium. U.S. **Patent** 10,959,384.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPESSAN, C. G. M.; FRIEDERICHS, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Revista de Ciências Agro veterinárias**, 16(2): 155-164, 2017.

NOVOTNY, E. H.; AZEVEDO, E. R. de.; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. de M.; HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian dark earth soils. **Environmental Science and Technology**, v.41, p.400-405, 2007.

NOVOTNÝ, M.; MARKOVIĆ, M.; RAČEK, J.; ŠIPKA, M.; CHORAZY, T.; TOŠIĆ, I.; HLAVÍNEK, P. The use of *biochar* made from biomass and biosolids as a substrate for green infrastructure: A review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, Volume 32, 100999, 2023.

OK, Y. S.; UCHIMIYA, S. M.; CHANG, S. X.; BOLAN, N. *Biochar* production, characterization and applications. **CRC Press**, New York, 2015.

OLIVEIRA, A. B.; HERNANDEZ, F. F. F.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Absorção de nutrientes em mudas de berinjela cultivadas em pó de coco verde. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 2, p. 139-143, 2009.

OLIVEIRA, Daiane de Moura Costa. **Preparação, caracterização e avaliação da incorporação de *biochar* ao solo para germinação de sementes de *Pinus elliottii***. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Sorocaba, SP, 2017.

OLIVEIRA, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; SETTE Jr, C. R. Aproveitamento de resíduos madeireiros de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, vol. 40, n. 3, p. 683-691. 2017.

OLIVEIRA, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; SETTE-JUNIOR, C. R. Aproveitamento de resíduos madeireiro de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**. 40(3), 683-691, 2017.

OLIVEIRA, M. N.; SANTOS, P. A.; COSTA, S. G. G.; BARBOSA, C. M. A.; MOTA, O. E. A. *Biochar* Dosage and Granulometry Influencing Soil Density and Water Retention. **International Journal of Agriculture Sciences**, v.10, p. 5153-5157, 2018.

OLIVEIRA, R. S.; DA SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; GOULART, S. L. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, p. 2019.

ONAY, O.; KOCKAR O. M.; SLOW. Fast and flash pyrolysis of rapeseed. **Renew Energy**, 28, pp. 2417– 2433, 2003.

ONI, B.; OZIEGBE, O.; OLAWOLE, O. Significance of *biochar* application to the environment and economy. **Annals of Agricultural Sciences** (Cairo) 64 (2), 222–236, 2019.

PAGE-DUMROESE, D. S.; BUSSE, M. D.; ARCHULETA, J. G.; MCAVOY, D.; ROUSSEL, E. Methods to reduce forest residue after timber harvesting and produce black carbon. **Scientica**. 1-9, 2017.

PAINEL GOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. Em: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, 2018.

PALVIAINEN, M.; AALTONEN, H.; LAURÉN, A.; KÖSTER.; BERNINGER, F.; OJALA, A.; PUMPANEN, J. *Biochar* amendment increases tree growth in nutrient-poor, young Scots pine stands in Finland. **Forest Ecology and Management**, 474, 118362, 2020.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, 84(5), 487-494, 2005.

PEDROXA, M. M.; GOMES, M. C. F. A.; PAZ, E. C. S.; PEDROSA, A. L.; VIERA, G. E. G. & SOARES, J. E. M. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em processo de pirólise. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, p.184-207, 2017.

PENG, X. Y. L. L.; YE, L. L.; WANG, C. H.; ZHOU, H.; SUN, B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived *biochar*: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. **Soil and Tillage Research**, v. 112, n. 2, p. 159–166, 2011.

PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; JUNIOR, B. H. M.; GONÇALVES, L. G.; SCHOSSLER, T. R. *Biochar* como condicionador de substrato para produção de mudas de Eucalipto. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 4, p. 44-51, out-dez., 2012.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SOLER, M. A.; S. CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T. M.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after *biochar* application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.5, p.699- 706, 2012.

PIMENTA, A. S.; MIRANDA, N. O.; CARVALHO, M. A. B.; SILVA, G. G. C.; OLIVEIRA, E. M. M. Effects of *biochar* addition on chemical properties of a sandy soil from northeast Brazil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 3, p. 70, 2019.

PINCELLI A. L. S. M.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Quantificação dos resíduos da colheita em florestas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, 45(115): 519–526, 2017.

PIRES, I. C. S. A.; NAKASHINA, G. T.; PADILLA, E. R. D.; SANTOS, L. R. O.; VARANDA, L. D.; ALESI, L. S.; YAMAJI, F.M. *Biochar* de Palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e estudo do Processo. **Revista Virtual de Química**. Vol. 10, nº 4, 2018.

PLUCHON, N.; GUNDALE, M. J.; NILSSON, M. C.; KARDOL, P.; WARDLE, D. A. Stimulation of boreal tree seedling growth by wood-derived charcoal: effects of charcoal properties, seedling species and soil fertility. **Functional Ecology**, London, v. 28, p. 766-775, 2014.

POLETTI, M.; ORNAGHI JÚNIOR, H. L.; ZATTERA, A. J. Thermal Decomposition of Natural Fibers: Kinetics and Degradation Mechanisms. **Reactions and Mechanisms in Thermal Analysis of Materials**, p. 515–546, 2015.

POLETTI, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, v. 109, p. 148–153, 2012.

PONTES, S. M. A.; AFONSO, D. G.; NASCIMENTO, D. L. Análise comparativa das propriedades físico-mecânicas da madeira de galho e fuste de 02 espécies florestais com potencial madeireiro. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 4., 2012, Curitiba, 2012. **Anais...** Curitiba: Congresso Florestal Paranaense, 2012.

PUNTES-ESCOBAR, T. C.; RODRÍGUEZ-CARLOSAMA, A.; LÓPEZ, C. A. Effect of *biochar* use as a substrate on granadilla (*Passiflora ligularis* Juss.) growth parameters. **Agronomía Colombiana**, 40(1), 22-28, 2022.

RAO, M. A.; SIMEONE, G. D. R.; SCENZA, R.; CONTE, P. *Biochar* based remediation of water and soil contaminated by phenanthrene and pentachlorophenol. **Chemosphere**, v. 186, p. 193- 201. 2017.

RAZAQ, M.; SALAHUDDIN.; SHEN, H. L.; SHER, H.; ZHANG, P. Influence of *biochar* and nitrogen on fine root morphology, physiology, and chemistry of *Acer mono*. **Scientific Reports**, 7, 5367, 2017.

REEVES, J. B.; MCCARTY, G. W.; RUTHERFORD, D. W.; WERSHAW, R. L. Near infrared spectroscopic examination of charred pine wood, bark, cellulose and lignin:

implications for the quantitative determination of charcoal in soils. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 15, p. 307-315, 2007.

REZENDE, F. A.; SANTOS, V. A. H. F. dos.; MAIA, C. M. B. F.; MORALES, M. M. *Biochar* in substrate composition for production of teak seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1449-1456, 2016.

ROY, M.; KUNDU, K. Production of *biochar* briquettes from torrefaction of pine needles and its quality analysis. **Bioresource Technology Reports** 22, 101-467, 2023.

SAIZ-RUBIO, R.; BALSEIRO-ROMERO, M.; ANTELO, J.; DÍEZ, E.; FIOL, S.; MACÍAS, F. *Biochar* as low-cost sorbent of volatile fuel organic compounds: potential application to water remediation. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 12, p. 11605–11617. 2018.

SANKURA, H.; LEMMA, B.; RAM, N. Effect of changing natural forest and wetland to other land uses on soil properties and stocks of carbon and nitrogen in south Ethiopia. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. 9, p. 259–265, 2014.

SANTIAGO, F. L. S. Aproveitamento de resíduos florestais de Eucalyptus na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica. **Energia na Agricultura**, 29(4), 241-253, 2013.

SANTOS, F. P.; LIMA, A. P. L.; LIMA, S. F.; SILVA, A. A. P.; CONTARDI, L. M.; VENDRUSCOLO, E. P. *Biochar* and biostimulant in forming *Schinus terebinthifolius* seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.7, p.520-526, 2022.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, vol. 39, n. 90, p. 221 -230, 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; DAMASCENO, G. R. F.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; COSTA, L. S. da.; COSTA, S. E. L. Efeito da variabilidade de resíduos madeireiros na produção e qualidade de briquetes. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.6, n.1, p.529-534, 2019.

SCHMIDT, H-P.; ANCA-COUCÉ, A.; HAGEMANN, N.; WERNER, C.; GERTEN, D.; LUCHT, W.; KAMMANN, C. Pyrogenic carbon capture & storage (PyCCS). **GCB Bioenergy** 11:573–591, 2019.

SCHMIDT, T. M.; DO, M. T. H.; DACEY, D.; LUCAS, R.; HATTAR, S.; MATYNIA, A. Melanopsin-positive intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: From form to function. **The Journal of Neuroscience**, 31, 16094–16101, 2011.

SERAPIGLIA, M. J.; MULLEN, C. A.; BOATENG, A. A.; CORTESE, L. M.; BONOS, S. A.; HOFFMAN, L. Evaluation of the impact of compositional differences in switchgrass genotypes on pyrolysis product yield. **Industrial Crops and Products**. 2015, vol.74, n.15, pp.957-968. Nov, 2015.

SILVA, M. A.; CAPUTO, M. M.; PERECIN, D.; BRESSIANI, J. A. Comparação de ambientes na germinação de cariopses de cana-de-açúcar (Environment Comparison in the germination of sugar cane seeds). **Ciência Agro tecnologia**, v. 34, Edição Especial, p. 1604-1609, 2010.

SILVESTRE, W. P.; GALAFASSI, P. L.; FERREIRA, S. D.; GODINHO, M.; PAULETTI, G. F.; BALDASSO, C. Fodder radish seed cake *biochar* for soil amendment. **Environmental Science and Pollution Research**, 25:25143–25154, 2018.

SIMÕES, D.; SILVA, R. B. G.; SILVA, M. R. Composição do substrato sobre o desenvolvimento, qualidade e custo de produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 91-100, 2012.

SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. *Biochar: A Guide to Analytical Methods*. **CSIRO Publishing**, 2017.

SMERTHURST, P.; HOLZ, G.; MORONI, M.; BAILLIE, C. Nitrogen management in *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**, 193: 63–80, 2004.

SOARES, T. F. S. N.; LIMA, I. S.; ALMEIDA de, A. Q.; GONZAGA, M. I. SILVA.; FIALHO, C. A.; GOMES, I. L. R.; MASSARANDUBA, W. M. Substrates formulated with *biochar* for seedlings production of *Moringa oleífera* Lam. **Journal of Agricultural Science**; Vol. 11, No. 4; 2019.

SOLÍS, A. R.; VALVERDE, Y. B.; MOYA, R. Agronomic Effects of *Tectona grandis* *Biochar* from Wood Residues on the Growth of Young *Cedrela odorata* Plants in a Nursery. **Agronomy**, 11, 2079, 2021.

SORRENTI, G.; MUZZI, E.; TOSELLI, M. Root growth dynamic and plant performance of nectarine trees amended with *biochar* and compost. **Scientia Horticulturae**, 257, 108710, 2019.

SOUCHIE, F. F.; JUNIOR, B. H. M.; PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; MARIMON, B. S.; LENZA, E. Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de *Tachigali vulgaris* LG Silva & HC Lima. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 811-821, 2011.

SOUZA, C. A. M.; OLIVEIRA, R. B. de; FILHO, S. M.; LIMA, J. S. S. Crescimento em campo de espécies florestais em diferentes condições de adubações. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 243-249, 2006.

SOUZA, F. E. C.; NATALE, W.; MESQUITA, R. O.; BRAGA, M. M.; LIMA, J. B. P.; COSTA, R. S. Use of *biochar* in the composition of organic substrates for the production of papaya seedlings. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n.4, e9103, 2021.

SOUZA, M. M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda* L.** 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

- SOUZA, N. D.; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; JÚNIOR, A. F. D.; CARVALHO, A. M. Estudo de Caso de uma Planta de Carbonização: Avaliação de Características e Qualidade do Carvão Vegetal Visando Uso Siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, 23(2): 270-277, 2016.
- SPANHOL, A.; NONES, D. L.; KUMABE, F. J. B.; BRAND, M. A. Qualidade dos Pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para geração de energia. **Floresta**. 45(4), 833-844, 2015.
- SULIMAN, W.; HARSH, J.B.; ABUL-LAIL, N.I.; FORTUNA, A.M.; ALLMEYER, I.; PÉREZ, M.G. The role of *biochar* porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. **Science of The Total Environment**. 574: 139–1547, 2017.
- SUN, D.; YU, L.; XU G. E.; JUN, M.; CHEN, W. *Biochar* as a novel niche for culturing microbial communities in composting. **Waste Management, In Press Corrected Proof**. Available online 13 May 2016.
- TANG, L.; YU, J.; PANG, Y.; ZENG, G.; DENG, Y.; WANG, J.; REN, X.; YE, S.; PENG, B.; FENG, H. Sustainable efficient adsorbent: alkali-acid modified magnetic *biochar* derived from sewage sludge for aqueous organic contaminant removal. **Chemical Engineering Journal**. 336, 160e169, 2018.
- TARIN, M. W. K.; FAN, L.; TAYYAB, M.; CHEN. L.; HE, T.; RONG, J.; ZHENG, Y. *Biochar* amendment regulated growth, physiological and biochemical responses of conifer in red soil. **iForest** 13: 490-498, 2020.
- TAVARES, S.; SANTOS, T. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos. **Holos**, v. 5, p. 19-27, 2013.
- TERRA, S. B.; FERREIRA, A. A. F.; PEIL, R. M. N.; STUMPF, E. R. T.; BECKMANN-CAVALCANTE, M. Z. CAVALCANTE, Í, H. L. Alternative substrates for growth and production of potted chrysanthemum (cv. Funny). **Acta Scientiarum Agronomy** 33:465-471, 2011.
- TOMAZ, F. D.; SOUSA, G. V.; JÚNIOR, E. R. S.; RIBEIRO, A. S. Destinação e aproveitamento de resíduo florestal da colheita do eucalipto. **Congresso ABES, FENASAN**, 2017.
- TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. *Biochar* physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 19 (1), 191–215, 2020.
- TONKS, A.J.; APLIN, P.; BERIRO, D.J.; COOPER, H.; EVERS, S.; VANE, C.H.; SJÖGERSTEN S. Impacts of conversion of tropical peat swamp forest to oilpalm plantation on peat organic chemistry, physical properties and carbon stocks. **Geoderma**, v. 289, p. 36–45, 2017.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875-887, abr.- jun., 2018.

TREVIÑO-CORDERO, H. Synthesis and adsorption properties of activated carbons from biomass of *Prunus domestica* and *Jacaranda mimosifolia* for the removal of heavy metals and dyes from water. **Industrial Crops and Products**, 42, 315-323, 2013.

TRIPATHI, M. G. Effect of process parameters on production of *biochar* from biomass waste through pyrolysis: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 55, 467-481, 2016.

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; DE ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, vol. 45, n. 4, p. 661-666, 2015.

UCHIMIYA, M.; CHANG, S.C. Screening *biochars* for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups. **Journal of Hazardous Materials**, v. 190, n. 1/3, p. 432-441, 2011.

ULYETT, J.; SAKRABANI, R.; KIBBLEWHITE, M.; HANN, M. Impact of *biochar* addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, p. 96-104, 2014.

UUSITALO, V. & LEINO, M. Neutralizing global warming impacts of crop production using *biochar* from side flows and buffer zones: A case study of oat production in the boreal climate zone. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 48-57, 2019.

VARMA, A. K.; MONDAL, P. Pyrolysis of pine needles: effects of process parameters on products yield and analysis of products. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 131, 2051-2072, 2017.

VARVEL, G. E.; SCHPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, 61: 1233-1239, 1997.

VATRAZ, S.; BORGES, F. Q. Análise de resíduos florestais após colheita semimecanizada em um plantio de coníferas no paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, 12(1): 65-80, 2019.

VIEIRA, G. E. G.; NUNES, A. P.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, p. 105-212, jul/dez. 2014.

WANG, C.; ALIDOUST, D.; YANG, X.; ISODA A. Effects of bamboo *biochar* on soybean root nodulation in multi-elements contaminated soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2018.

WANG, J.; SHI, L.; ZHAI, L.; ZHANG, H.; WANG, S.; ZOU, J.; SHEN, Z.; LIAN, C.; CHEN, Y. Analysis of the long-term effectiveness of *biochar* immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review. **Ecotoxicology Environmental Safety**, vol. 207, 2021.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of *biochar*: a review. **Journal of Cleaner Production**. 227, 1002–1022, 2019.

WANG, L.; CHEN, D.; ZHU, L. *Biochar* carbon sequestration potential rectification in soils: Synthesis effects of *biochar* on soil CO₂, CH₄ and N₂O emissions. **Science of the Total Environment**, 904, 167047, 2023.

WANG, S-H; GRIFFITHS, P. R. Resolution enhancement of diffuse reflectance i.r. spectra of coals by Fourier self-deconvolution: 1. C-H stretching and bending modes. **Fuel**, Volume 64, Issue 2, Pages 229-236, 1985.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of *biochar*. **Fuel** 217, 240-261, 2018.

WERNER, C.; SCHMIDT, H-P.; GERTEN, D.; LUCHT, W.; KAMMANN, C. Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5°C. **Environmental Research Letters** 13:044036, 2018.

WINK, C.; LANGE, A.; ARAÚJO, K. Z.; SILVEIRA, A. P.; BEHLING, M. WRUCK, F. J. Biomassa e nutrientes de eucalipto cultivado em sistema agrossilvipastoril. **Nativa**, (6): 754-762, 2018.

WINSLEY, P. *Biochar* and bioenergy production for climate change mitigation. **New Zealand Science Review**, Wellington, v. 64, p. 5-10, 2007.

WOICIECHOWSKI, T.; LOMBARDI, K. C.; GARCIA, F. A. de. O.; GOMES, G. S. Nutrientes e umidade do solo após a incorporação de biocarvão em um plantio de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1455-1464, out. - dez., 2018.

WOOLF, D.; LEHMANN, J.; COWIE, A.; CAYUELA, M. L.; WHITMAN, T.; SOHI, S. *Biochar* for climate change mitigation. In: Lal R, Stewart BA (eds) Navigating from science to evidence-based policy. **Advances in Soil Science, Soils and Climate**. CRC Press. ISBN 9781498783651, 2018.

XIANG, Y.; DENG, Q.; DUAN, H.; GUO, Y. Effects of *biochar* application on root traits: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**. 9; 2017.

XIE, T.; REDDY, K. R.; WANG, C.; YARGICOGLU, E. & SPOKAS, K. Characteristics and applications of *biochar* for environmental remediation: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 9, p. 939-969, 2015.

YAASHIKAA, P.; KUMAR, P.; VARJANI, S.; SARAVANAN, A. A critical review on the *biochar* production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. **Biotechnology Reports**. 28, 2020.

YAEBIYO, G.; BIRHANE, E.; TADESSE, T.; KIROS, S.; HADGU, K. M.; EGZIABHER, Y. G.; HABTU, S. Using *biochar* and deficit irrigation enhanced the growth of commercial agroforestry wood species seedlings in drylands (a case study in Saz, northern Ethiopia). **Agroforest Syst**, 2023.

YAN, P.; XU, Z.; ZHANG, C.; LIU, X.; XU, W.; ZHANG, Z. C. Fractionation of lignin YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C.; Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. **Fuel**, 86, 1781-1788, 2007.

YANO, B. B. R.; SILVA, S. A. M. da. Influência da unidade do ar no conforto térmico de usuários de edificações de escritórios em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 329-345, out./dez. 2020.

YOUSAF, B.; LIU, G.; WANG, R.; ABBAS, Q.; IMTIAZ, M.; LIU, R. Investigating the *biochar* effects on C-mineralization and sequestration of carbon in soil compared with conventional amendments using the stable isotope (¹³C) approach. **Global Change Biology Bioenergy** 9, 1085e1099, 2017.

ZAKARIA, M. SOLAIMAN.; MURPHY, D. V.; ABBOTT, L. K. *Biochars* influence seed germination and early growth of seedlings. **Plant Soil**, 353:273-287, 2012.

ZELAYA, K. P. S.; ALVES, B. S. Q.; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A. *Biochar* na produção e nutrição da beterraba. **Ciência Rural**, v. 49, p. 01-09, 2019.

ZEMANOVÁ, V.; BŘENDOVÁ, K.; PAVLÍKOVÁ, D.; KUBÁTOVÁ, P.; TLUSTOŠ, P. Effect of *biochar* application on the content of nutrients (Ca, Fe, K, Mg, Na, P) and amino acids in subsequently growing spinach and mustard. **Plant Soil Environment**, Vol. 63, No. 7: 322-327, 2017.

ZHANG, K. K.; SUN, P.; ZHANG, Y. R. Decontamination of Cr (VI) facilitated formation of persistent free radicals on rice husk derived *biochar*. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**. 13, 22, 2019.

ZOGHI, Z.; HOSSEINI, S. M.; KOUCHAKSARAEI, M. T.; KOOCH, Y.; GUIDI, L. The effect of *biochar* amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress. **European Journal of Forest Research**, 138:967-979, 2019.

ZORZETO, T. Q.; DECHEN, S. C. F.; ABREU, M. F. de.; JÚNIOR, F. F. Caracterização físicas de substratos para plantas. **Solos e Nutrição de Plantas – Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 3, p.300-311, 2014.