UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

CURSO DE AGRONOMIA

BIOCHAR DE BAMBU: EFEITO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS

IVAN GABRIEL ROCHA DA SILVA

BRASÍLIA, DF

2024

IVAN GABRIEL ROCHA DA SILVA

BIOCHAR DE BAMBU: EFEITO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo

BRASÍLIA, DF

2024

Silva, Ivan Gabriel Rocha da

Biochar de bambu: Efeito da temperatura de pirólise e do tempo de residência nas características químicas e físicas / Ivan Gabriel Rocha da Silva; orientador Cícero Célio de Figueiredo - Brasília, 2024. 45 páginas.

Monografia de Graduação em Agronomia - Universidade de Brasília, 2024.

1. biochar 2. pirólise 3. bambu

I. Figueiredo, Cícero Célio de. II. Drº

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do autor: Ivan Gabriel Rocha da Silva

Título: Biochar de bambu: Efeito da temperatura de pirólise e do tempo de residência nas características químicas e físicas

Ano: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias dessa monografia e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação, e nenhuma parte desse relatório pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

IVAN GABRIEL ROCHA DA SILVA

BIOCHAR DE BAMBU: EFEITO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Aprovado em ____ de _____ de _____

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília

Orientador

_____

Dra. Camila Rodrigues Costa

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília

Examinadora

_____

Dr. José Ferreira Lustosa Filho

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília

Examinador

Dedico este trabalho a Deus, meu criador, a Jesus Cristo, meu salvador, e às pessoas mais importantes da minha vida: meus pais, Adriana e Ivan, e meu irmão, João Vitor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido o dom da vida, por essa oportunidade e por todas as realizações feitas por ele.

À minha mãe, Adriana Rocha da Silva, ao meu pai, Ivan Nunes da Silva, pela educação que me deram, pelos ensinamentos passados, que foram cruciais para a realização desse curso e desse trabalho. Ao meu irmão, João Vitor, meu melhor amigo. E à minha namorada Anna Júlia, minha companheira de vida.

Agradeço à Universidade de Brasília, que foi minha casa nos últimos 5 anos, tenho orgulho de me formar nesta instituição. Agradeço ao meu orientador e professor Dr. Cícero Célio de Figueiredo, que me orientou na execução desta pesquisa de forma minuciosa, agradeço por ter me recebido em 2022, quando ainda estava no meu 6º semestre do curso, me orientando com muito cuidado e paciência.

A todos os meus amigos, em especial ao meu amigo e parceiro de atividades Thiago Vinhaes, que sempre me auxiliou e ajudou em diversos momentos. Ao meu companheiro de laboratório, Roberto, e em especial um grande agradecimento à Camila Costa e Priscila Reis, minhas companheiras e auxiliadoras de laboratório por toda paciência e todos os ensinamentos que me passaram para o desenvolvimento do meu trabalho. Grato a todo o apoio dos professores e funcionários da Universidade que contribuíram muito para minha formação, em especial ao Prof. Marcelo Fagioli.

Obrigado a todos!

“Todo agricultor faz visitas à sua plantação; da mesma maneira, Deus aduba a vida daqueles que frutificam.”

(Helgir Girodo)

RESUMO

BIOCHAR DE BAMBU: EFEITO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS

O bambu, conhecido por seu rápido crescimento, é um recurso importante na produção agrícola e industrial. No contexto agrícola, apesar de pesquisas ainda incipientes, o bambu pode ser transformado em biochar por meio da pirólise, um processo de aquecimento na ausência de oxigênio, resultando em um produto que pode ser usado como condicionador de solos. A pirólise de diferentes matérias primas gera biochars com características distintas, e poucos estudos investigaram o efeito da temperatura de pirólise nas propriedades físicas e químicas do biochar da espécie *Dendrocalamus asper*. Este trabalho teve como objetivo avaliar essas características do biochar de bambu produzido em diferentes temperaturas de pirólise e tempos de residência, usando a biomassa de bambu *in natura* como referência. Um delineamento inteiramente casualizado foi utilizado, com três repetições por tratamento, variando a temperatura de pirólise (300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C) e o tempo de residência (30 minutos e 2 horas) para cada temperatura. As médias das análises elementares, proximais e dados de caracterização química foram comparados pelo teste LSD de Fisher ($P<0,05$). Os resultados mostraram que a temperatura de pirólise e o tempo de residência afetaram significativamente as propriedades do biochar de bambu, com o aumento da temperatura resultando em menor rendimento de biochar e maior produção de biogás e bio-óleo. Além disso, com o aumento da temperatura houve uma redução do material volátil e um aumento no teor de cinzas, carbono fixo, pH, densidade e condutividade elétrica do biochar. As variações nos teores de macro e micronutrientes foram mínimas, exceto para o potássio, que aumentou com a temperatura. Os maiores rendimentos de biochar foram nas temperaturas de 300 ºC, bio-óleo e bio-gás nas temperaturas de 600 ºC por 30 minutos e 2 horas, respectivamente. Devido a essas variações a escolha da temperatura será determinada de acordo com o uso que se pretende dar ao biochar.

Palavras-chave: biochar, pirólise, bambu, bio-gás, bio-óleo, temperatura.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12
2.1 Biochar: definições e importância agroambiental 12
2.2 Características do bambu 13
2.3 Produção de biochar a partir do bambu 14
2.4 Características químicas e físicas do biochar de bambu de acordo com a temperatura de pirólise 15
3 MATERIAL E MÉTODOS 16
3.1 Obtenção e preparo do bambu 16
3.2 Pirólise do bambu 18
3.3 Caracterização das amostras de bambu e biochar 21
3.3.1 Rendimento dos produtos de pirólise 22
3.3.1.1 Rendimento do biochar 22
3.3.1.2 Rendimento do bio-óleo 22
3.3.1.3 Rendimento do bio-gás 22
3.3.2 Umidade do biochar 22
3.3.3 Materiais voláteis do biochar de bambu 24
3.3.4 Teor de cinzas do biochar de bambu 25
3.3.4 Análise elementar 26
3.3.5 Determinação do pH 26
3.3.6 Teores de macros e micronutrientes 28
3.4 Delineamento experimental e análises de estatísticas 29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 30
4.1 Rendimento de matéria seca 30
4.2 Composição elementar e propriedades químicas de biochar de bambu 31
5. CONCLUSÃO 38
6. REFERÊNCIAS 39

1 INTRODUÇÃO

O século XXI apresenta desafios ambientais sem precedentes, incluindo a escassez de recursos naturais e a crescente gravidade da contaminação do solo por poluentes orgânicos e inorgânicos, como os metais pesados (MAIA et al., 2021; SU et al., 2024). Além disso, a poluição ambiental atual e o aquecimento global representam ameaças significativas à atividade agrícola, podendo desencadear uma séria crise ecológica (SEOW et al., 2022) Nesse contexto, a transformação de resíduos orgânicos e biomassas diversas em biochar emerge como uma promissora opção para mitigar tais problemas (SEOW et al., 2022).

A produção de biochar é realizada pelo processo de pirólise, que é um processo de decomposição térmica sob altas temperaturas e condições limitadas de oxigênio, resultando na conversão da biomassa em três frações: bio-óleo (fração líquida), biochar (fração sólida) e biogás (fração gasosa) (LORA et al., 2012). Esse processo não apenas reduz a quantidade de resíduos sólidos, mas também diminui as emissões de gases de efeito estufa, aproveitando materiais que, no passado, eram descartados (SEABRA, 2023). O bambu, por exemplo, é uma fonte promissora de biomassa para a produção de biochar, devido ao seu rápido crescimento, baixo custo e adaptação a diversas condições ambientais (TEIXEIRA et al., 2017).

Tanto a comunidade científica quanto os agricultores têm concentrado esforços na gestão de resíduos orgânicos para a produção de insumos agrícolas sustentáveis, como o biochar (ZHANG et al., 2018). Este material, rico em carbono e minerais, é produzido pela decomposição térmica da biomassa, e se destacada como um promissor condicionador de solo (MAIA et al., 2021; LI et al., 2022). Além de ser renovável e econômico, o biochar é considerado uma alternativa sustentável com potencial para substituir combustíveis fósseis (HEN et al., 2024). Assim, a produção e a aplicação de biochar estão ganhando destaque em sistemas agrícolas sustentáveis (SEMIDA et al., 2018).

O biochar apresenta características físico-químicas favoráveis como alta capacidade de adsorção de substâncias e uma ampla área superficial específica. Além disso, o biochar contribui para o sequestro de carbono, permanecendo no solo por longos períodos sem ser degradado rapidamente, ajudando na mitigação da contaminação por metais pesados, aumentando a fertilidade do solo e promovendo maior produtividade agrícola (CHEN et al., 2016).

O Brasil destaca-se como o país com a maior diversidade de espécies de bambu no continente americano, sendo muitas delas endêmicas e adaptadas a diferentes climas e solos (DRUMOND et al., 2017). Essa característica posiciona o bambu como uma matéria-prima estratégica para impulsionar a indústria nacional e promover práticas agrícolas sustentáveis (SCHARFENBERG et al., 2024). As áreas nativas de bambu na Amazônia, abrangendo partes do Amazonas e Acre, exemplificam o potencial significativo dessa planta na região (DRUMOND et al., 2017).

O bambu, uma planta de crescimento rápido, possui qualidades excepcionais que o tornam ideal para uma variedade de aplicações: é uma matéria-prima econômica, resistente, leve, flexível e longeva (CHATURVEDI et al., 2023). Segundo Montiel et al. (2006), a espécie asiática *Dendrocalamus asper* se destaca por sua qualidade e resistência, com colmos majestosos que podem atingir até 30 metros de altura e 15 centímetros de diâmetro (ZHAO-HUA et al., 2004). Sua rápida taxa de crescimento, baixo custo e adaptação a diversas condições ambientais fazem do bambu um material ideal para a produção de biochar (PHAM et al., 2023), que possui atributos viáveis como fonte alternativa de energia e para aplicações agrícolas.

As condições de pirólise, como temperatura, duração do processo, taxa de aquecimento e tipo de atmosfera, são cruciais para a composição e rendimento dos produtos gerados, incluindo bio-óleo, biochar e gases (DEMIRBAS, 2004). Temperaturas mais altas tendem a aumentar a produção de gases e líquidos, enquanto temperaturas mais baixas e tempos de residência mais longos favorecem a formação de biochar (DEMIRBAS, 2004). Uma taxa de aquecimento rápida promove a despolimerização e a formação de compostos de baixo peso molecular, e uma atmosfera inerte, geralmente nitrogênio, é crucial para evitar a oxidação dos materiais (BRIDGEWATER, 2012). A otimização desses parâmetros permite ajustar o processo para aplicações específicas, melhorando a eficiência energética e econômica da pirólise (MOHAN et al., 2006).

A tecnologia de produção de biochar já é utilizada há algum tempo. Apesar disso, ainda são necessários estudos sobre a influência das condições de pirólise nas propriedades do biochar obtido da queima do bambu da espécie *Dendrocalamus asper*. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi investigar as características do biochar de bambu, produzidos sob diferentes condições de pirólise.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biochar: definições e importância agroambiental

Biochar é definido como um produto rico em carbono que ocorre quando a biomassa é aquecida em um recipiente fechado sob condições limitadas de oxigênio (LEHMANN et al., 2015). Normalmente, as biomassas utilizadas para a produção de biochar incluem resíduos orgânicos como esterco animal, madeira, lodo de esgoto e plantas lenhosas como o bambu (SEOW et al., 2022). O biochar é um subproduto da pirólise, caracterizado por uma estrutura diversificada composta principalmente de carbono, oxigênio, nitrogênio e material inorgânico (cinzas) (INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, 2015).

O processo de pirólise ocorre em altas temperaturas, entre 300°C e 900°C, e em condições de limitação de oxigênio (MAIA et al., 2021). Durante este processo, são produzidos três subprodutos: biochar (sólido), bio-óleo (líquido) e biogás (FRANCO et al., 2024). A pirólise tem despertado considerável interesse devido à capacidade de gerar produtos utilizáveis como fontes de energia renovável ou na fabricação de insumos, como fertilizantes (DA COSTA et al., 2023).

As características e propriedades do biochar, bio-óleo e biogás são influenciados pela matéria-prima e pelas condições de pirólise, especialmente temperatura e tempo de residência (ZHOU et al., 2021). Esses insumos estão sendo estudados como potenciais substitutos dos combustíveis fósseis (SHRIVASTAVA et al., 2021). O biochar obtido pela pirólise tem despertado interesse como substituto sustentável do carvão mineral e como melhorador do solo (ZHAO et al., 2020; WANG et al., 2021). O bio-óleo é considerado uma alternativa viável ao petróleo em diversas aplicações industriais e de transporte (POUDEL et al., 2020; SADHUKHAN et al., 2021), enquanto o biogás é reconhecido como uma fonte de energia renovável com potencial significativo na geração de eletricidade e calor (CHEN et al., 2021; MONLAU et al., 2020).

Os estudos sobre a produção e aplicação do biochar têm crescido significativamente, destacando sua capacidade de melhorar a fertilidade do solo e os serviços ecossistêmicos, como a qualidade da água, a retenção de nutrientes e a redução da compactação do solo (FRANCO et al., 2024; TRAZZI et al., 2018). Além disso, o biochar apresenta qualidades notáveis como sua acessibilidade econômica, sustentabilidade ambiental, versatilidade em aplicações, gestão de resíduos,

mitigação de gases de efeito estufa e contribuição para a geração de energias renováveis (CHA et al., 2016).

2.2 Características do bambu

Na América Latina, o Brasil é o país pioneiro na maior diversidade de espécies nativas de bambu, distribuídas principalmente na Floresta Amazônica, Mata Atlântica e em algumas áreas do Cerrado, conforme descrito no livro 'American Bamboos' (1999). O bambu, composto principalmente por hemicelulose, celulose e lignina, caracteriza-se pelo seu rápido crescimento e baixo teor de cinzas após a carbonização, o que o torna ideal para a produção de produtos de alto valor agregado através de processos de pirólise (HERNANDEZ-MENA et al., 2014). Amplamente distribuído em áreas tropicais e subtropicais, o bambu é reconhecido como uma opção de matéria-prima sustentável e econômica (ESPELHO et al., 2008). Além de desempenhar um papel crucial na proteção do solo e no sequestro rápido de carbono, pode ser integrado a outras espécies de madeira em projetos de reflorestamento (BERALDO et al., 2007).

Alguns bambus podem atingir até 30 metros de altura em apenas 3 a 6 meses, com algumas espécies dispensando a necessidade de replantio devido à produção anual de palha, o que reduz os custos de produção e assegura um ciclo de colheita eficiente (DA COSTA et al., 2023). Montiel et al. (2016) destacam a importância global de várias variedades de bambu, enfatizando o gênero *Dendrocalamus* devido à sua versatilidade na fabricação de produtos para setores como construção, farmacêutico, papel, artesanato e agricultura.

Entre as espécies do gênero *Dendrocalamus*, a *Dendrocalamus asper* se destaca pelas suas hastes robustas, que podem atingir até 30 metros de altura e 15 centímetros de diâmetro, valorizando-se pela qualidade e resistência, além do potencial de substituição da madeira convencional. Esta espécie é também conhecida por seus brotos comestíveis e seu crescimento controlado, contribuindo para sua sustentabilidade. No entanto, o cultivo de *Dendrocalamus asper* apresenta desafios de manejo devido ao tamanho das hastes e à forma de touceira, o que pode gerar competição com outras espécies (HANI et al., 2024). Apesar desses desafios, esforços significativos têm sido dedicados à pesquisa para desenvolver produtos

básicos, eficientes, rápidos e sustentáveis a partir dessa espécie (DA COSTA et al., 2023).

2.3 Produção de biochar a partir do bambu

Devido à sua acessibilidade econômica, alta produção de biomassa, rápido crescimento, notáveis propriedades de adsorção, extensa área superficial e estrutura altamente porosa, o bambu representa uma excelente escolha como matéria-prima para a produção de biochar (CHATURVEDI et al., 2023). O biochar dessa biomassa é produzido através da pirólise sob altas temperaturas, resultando na redução de componentes voláteis do bambu e na elevada concentração de carbono no biochar (TEIXEIRA et al., 2017).

Chaturvedi et al. (2023) destacam que a qualidade do biochar é amplamente determinada pelo tamanho dos poros, essenciais para a hospedagem de microrganismos, e depende diretamente da área superficial e da taxa de adsorção do material. Nesse contexto, o biochar de bambu se destaca por ter uma área superficial dez vezes maior e uma taxa de adsorção quatro vezes superior à do carvão tradicional produzido a partir de outros resíduos, como madeira (CHATURVEDI et al., 2023).

O biochar de bambu tem potencial para sequestrar carbono quando incorporado ao solo devido à natureza estável do carbono que permanece no solo por longos períodos, ajudando a mitigar as emissões de gases de efeito estufa (LAIRD, 2008). Além de sequestrar carbono, o biochar melhora significativamente a qualidade do solo ao atuar como condicionador, aumentando a retenção de água, melhorando a estrutura do solo e promovendo a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas, contribuindo para melhorias na produtividade agrícola e redução da necessidade de fertilizantes sintéticos (ROMBOLÀ et al., 2019). Ademais, Ostapiv et al. (2023) afirmam que as características exclusivas do biochar de bambu, como sua baixa solubilidade em água, estabilidade, capacidade de fornecer carbono e cátions, e contribuição mineral, são cruciais para suas várias aplicações, incluindo energia, remediação ambiental e desenvolvimento de produtos inovadores. Sua baixa densidade e pH básico aumentam sua versatilidade (OSTAPIV et al., 2023).

Adicionalmente, a disponibilidade consistente e acessível de bambu em quantidades suficientes pode ser um desafio, especialmente em regiões onde o

bambu não é nativo ou cultivado comercialmente em grande escala. Steiner et al. (2007) discutem que a logística envolvida na colheita, transporte e processamento do bambu pode aumentar os custos de produção de biochar, afetando sua viabilidade econômica. É crucial avaliar a viabilidade econômica da produção de biochar de bambu em relação aos custos de energia, tecnologia de pirólise e mercado para o produto final (LEHMANN et al., 2009).

2.4 Características químicas e físicas do biochar de bambu de acordo com a temperatura de pirólise

A composição elementar, as propriedades químicas, toxicidade e propriedades agronômicas dos biochars dependem da fonte de biomassa utilizada na sua produção e das condições específicas do processo de pirólise, em especial a temperatura (CHA et al., 2016; LATAF et al., 2022). De acordo com Liu et al. (2016), temperaturas elevadas de tratamento têm um impacto significativo nas características físicas e químicas dos biochars produzidos, revelando que a pirólise em altas temperaturas resulta em um menor rendimento de biochar em comparação com a pirólise em baixas temperaturas. As diversas aplicações do biochar estão relacionadas, de maneira direta ou indireta, às suas propriedades físicas e químicas, tais como a área superficial e porosidade e os grupos funcionais de superfície, incluindo aqueles que contêm nitrogênio (ZHANG et al., 2015).

Por exemplo, no estudo realizado por Sahoo et al. (2021) foram comparadas as características de biochars obtidos de duas biomassas diferentes, bambu e caule de feijão, a temperaturas de pirólise entre 400 °C e 600 °C. Foi observado que o biochar derivado de bambu apresentou uma maior fração de massa de lignina e um volume total de poros superior ao biochar derivado da biomassa do caule de feijão. No entanto, a maior concentração de carbono foi encontrada a uma temperatura de 600 °C para ambos os biochars. Ademais, na transição de temperaturas de 400 ºC para 600 ºC resultou em um aumento no teor de nitrogênio devido à sua estabilidade térmica e resistência à volatilização (SAHOO et al., 2021).

Por outro lado, no estudo conduzido por Ye et al. (2015), o bambu foi submetido a temperaturas de pirólise variando entre 300 °C e 500 °C, resultando em um biochar com densidade reduzida em comparação ao bambu *in natura*, mas com valores

elevados de pH, teor de carbono, nitrogênio, grupos funcionais de superfície, capacidade de adsorção de iodo e nutrientes inorgânicos. O biochar obtido a 400 °C destacou-se pelas melhores propriedades, incluindo elevados teores de C, H, O, N, P e K (YE et al., 2015). O valor elevado do pH, por exemplo, se dá porque, em temperaturas mais elevadas, as ligações fracas no biochar, como as ligações hidroxila, são rompidas dentro de sua estrutura (LI et al., 2022).

O estudo realizado por Suthar et al. (2018) concluiu que o biochar oriundo de baixas temperaturas de pirólise, também possui ótimos resultados quando aplicados nos desenvolvimentos de culturas. Nesse trabalho foram analisados os efeitos benéficos do biochar de bambu, submetido a pirólise em diferentes temperaturas (300 ºC, 450 ºC e 600 ºC) no crescimento das plantas e na qualidade dos frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Os resultados indicaram que os biochars produzidos a 300 °C promoveram um aumento no índice de crescimento das plantas devido às maiores concentrações de NO_3, P, Ca e Mg nos meios de cultivo.

Por fim, o estudo de Wijitkosum et al. (2022) ao realizar pirólise utilizando temperaturas de 400 ºC, 450 ºC, 500 ºC, 550 ºC, demonstrou que a aromatização, polaridade e estabilidade do biochar são refletidas pelas razões dos elementos H/C, O/C, (O + N)/C e C/N. E mais uma vez houve a influência da temperatura nas características do biochar, como o aumento dos teores de cinzas, carbono fixo, carbono (C) e nitrogênio (N). Por outro lado, os conteúdos de material volátil, hidrogênio (H) e oxigênio (O) diminuíram à medida que a temperatura de pirólise foi aumentada, tendo o melhor biochar caracterizado na temperatura de 500 ºC (WIJITKOSUM et al., 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção e preparo do bambu

Os biochars foram produzidos a partir de amostras de bambu da espécie *Dendrocalamus asper* (Schult. & Schult.f.) Baker ex K. Heyne, coletadas na Fazenda Água Limpa (FAL), pertencente à Universidade de Brasília (UnB), em Brasília, DF. Utilizou-se um trator, ao qual foi acoplado um picador de resíduos florestais, para triturar os colmos de bambu (Figura 1). Em seguida, os colmos foram triturados

novamente em um triturador forrageiro (Trapp, TRF-80 Junior, 2cv 60hz, monofásico 220v) a fim de homogeneizar o tamanho das partículas (Figura 2).



Figura 1. Trituração do bambu utilizando um trator e um picador de resíduos florestais. Fonte: Figura própria.



Figura 2. Triturador forrageiro (Trapp, TRF-80 Junior, 2cv 60hz, monofásico 220v) sendo utilizado para homogeneizar as tiras de bambu. Fonte: Figura própria.

3.2 Pirólise do bambu

O bambu, previamente seco ao ar (aproximadamente 8% de umidade), foi exposto a temperaturas de 300 °C; 400 °C; 500 °C e 600 °C em um forno de pirólise (Linn Elektro Therm, Eschenfelden, Alemanha). Durante o processo, a temperatura aumentou a uma taxa de 2,5 °C por minuto, e o bambu permaneceu no forno por 30 minutos ou 2 horas em cada temperatura. Para realizar a pirólise, o bambu triturado foi colocado em um reator metálico cilíndrico (Figura 3 e 4), especialmente adaptado para o interior do forno, equipado com um sistema de saída de gases e bio-óleo. Este forno possui um mecanismo para evitar a entrada de oxigênio e um termostato digital para o controle de temperatura e tempo de residência desejado. Ao final do processo de pirólise, o biochar resultante foi pesado e armazenado em sacos plásticos para análise posterior (Figura 5 e 6).



Figura 3. Reator metálico cilíndrico para realizar a pirólise. Fonte: Figura própria.



Figura 4. Bambu triturado e seco adicionado dentro do reator. Fonte: Figura de Thiago Vinhaes.



Figura 5. Biochar de bambu resultante. Fonte: Figura de Thiago Vinhaes.



Figura 6. Biochar resultante pesado e armazenado em saco plástico. Fonte: Figura própria.

3.3 Caracterização das amostras de bambu e biochar

Após a pirólise, as amostras foram moídas e peneiradas usando uma malha de 0,5 mm (Figura 7 e 8). Foi feito um conjunto triplicado de amostras para cada tratamento, incluindo o bambu *in natura*, resultando em um total de 27 amostras.



Figura 7. Moedor utilizado na moagem das amostras. Fonte: Figura própria.



Figura 8. Peneira de 0,5 mm utilizada para homogeneizar as amostras trituradas. Fonte: Figura própria.

3.3.1 Rendimento dos produtos de pirólise

Depois da pirólise de bambu *in natura*, foram pesados o biochar e o bio-óleo. O bio-gás foi obtido por diferença entre a biomassa antes da pirólise, descontadas as massas de biochar e bio-óleo.

3.3.1.1 Rendimento do biochar

Para determinar o rendimento do biochar, foi utilizada a seguinte equação:

$$Biochar(\%) = \frac{(BBin - MB)}{BBin}\ x\ 100$$

Onde, BBin corresponde a massa de bambu *in natura* e MB a massa do biochar.

3.3.1.2 Rendimento do bio-óleo

O rendimento do bio-óleo foi determinado pela seguinte equação:

$$Biochar(\%) = \frac{(BBin - MBioóleo)}{BBin}\ x\ 100$$

O BBin é correspondente à massa de bambu *in natura* e o MBóleo faz referência a massa do bio-óleo.

3.3.1.3 Rendimento do bio-gás

Por fim, a determinação do rendimento do bio-gás foi obtida pela equação abaixo:

$$Biogás(\%) = [(BBin - MB - MBóleo)\ x\ 100]/BBin$$

BBin representando o bambu *in natura*, MB a massa do biochar e MBóleo a massa do bio-óleo.

3.3.2 Umidade do biochar

As amostras dos biochars e do bambu in natura foram moídas e passadas em peneira com malha de 0,5 mm. Para determinação da umidade, foram pesados 10g das amostras (Figura 9), sendo, em seguida, secas em estufa a 105 °C por 24h (Figura 10). A umidade foi calculada pela seguinte equação:

$$Umidade\ (\%) = \frac{(M1 - M2)}{M1}\ x\ 100$$

Onde, M1 corresponde a massa úmida e M2 à massa seca da amostra.



Figura 9. Pesagem de 10g das amostras para determinação de umidade. Fonte: Figura própria.



Figura 10. Amostras em estufa para serem secas a 105 ºC. Fonte: Figura própria.

3.3.3 Materiais voláteis do biochar de bambu

Para a determinação do teor de materiais voláteis foram pesados 1g de biochar de bambu seco a 105 ºC em recipientes de porcelana (Figura 11), conforme a metodologia proposta pela norma técnica D1762-84 (ASTM, 2013) com algumas alterações. As amostras de biochar foram colocadas em uma mufla (W-One, Tecnal, EDG) e aquecidas a 950 °C por 7 minutos (Figura 12). Depois desse tempo, o material foi transferido para esfriar em um dessecador (Figura 13) e mais tarde foi pesado. Para determinação de materiais voláteis foi utilizada a seguinte equação:

$$Materiais\,Voláteis\ = \frac{(M105\,ºC\ -\ M950\,ºC)}{M105\,ºC}\ x100$$

Onde, M105 ºC corresponde à massa de biochar de bambu seco à 105 ºC em estufa por 24 horas, e M950 ºC corresponde à massa de biochar após aquecido em 950º C por 7 minutos.

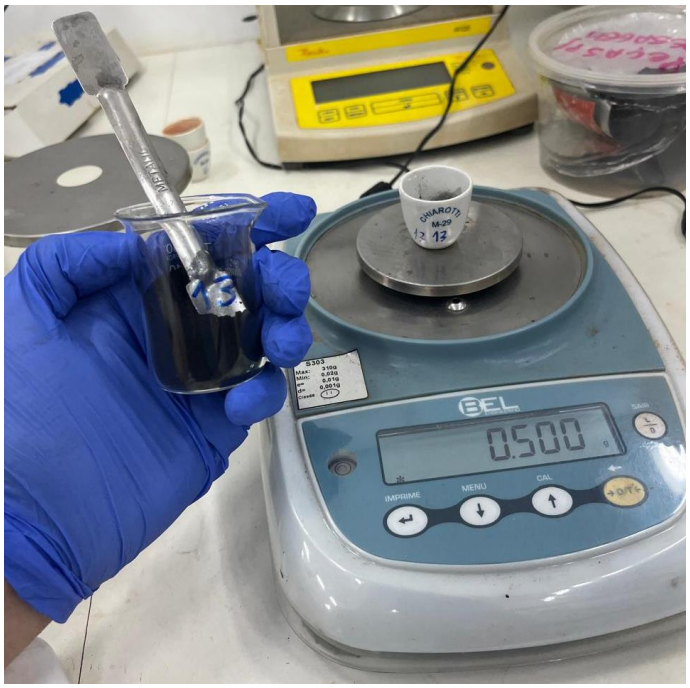


Figura 11. Pesagem de amostra de biochar de bambu seco a 105 ºC em recipientes de porcelana. Fonte: Figura própria.



Figura 12. Amostras sendo aquecidas em mufla (W-One, Tecnal, EDG). Fonte: Figura própria.



Figura 13. Dessecador utilizado para esfriar e armazenar as amostras. Fonte: Figura própria.

3.3.4 Teor de cinzas do biochar de bambu

Na determinação do teor de cinzas o material pesado anteriormente em capsulas de porcelana foi novamente a mufla (W-One, Tecnal, EDG), dessa vez foi

aquecido a 750 ºC por 6 horas. O material foi encaminhado novamente para esfriar no dessecador. O teor de cinzas foi calculado pela equação a seguir:

$$Teor\ de\ Cinzas\ (\%)\ =\ \left(\frac{M2}{M1}\right)\ x\ 100$$

Onde, M2 corresponde a massa seca e M1 corresponde a massa úmida da amostra.

3.3.4 Análise elementar

Os teores de carbono (C), nitrogênio (N)e hidrogênio (H) do bambu in natura e dos biochars foram determinados em analisador elementar (Euro EA, EuroVector). A partir dos valores de C, N e H foram obtidas as razões atômicas (Figura 14).



Figura 14. Analisador Elementar (Euro EA, EuroVector). Fonte: Figura própria.

3.3.5 Determinação do pH

Na determinação de pH, foi pesado 1g da amostra da biomassa (biochar de bambu) e transferido para erlenmeyers e adicionados 20ml de água destilada (Figura 15). Após isso, as amostras foram agitadas em um agitador circular horizontal por 30 minutos a uma velocidade de 150 rpm (Figura 16). Seguindo Rajkovich et al (2011), foram fornecidas 1,5 horas para a agitação e equilíbrio das soluções, contando um descanso de 15 minutos depois da agitação antes da análise de pH. Em seguida os

valores de pH foram medidos em um PHmetro de bancada com compensação de temperatura (Kasvi, K39-1420A) (Figura 17).



Figura 15. Proveta utilizada para medir os 20ml a serem adicionados nas amostras de biochar. Fonte: Figura própria.



Figura 16. Amostras agitadas em um agitador circular horizontal por 30 minutos a uma velocidade de 150 rpm. Fonte: Figura própria.



Figura 17. PHmetro de bancada com compensação de temperatura (Kasvi, K39-1420A). Fonte: Figura própria.

3.3.6 Teores de macros e micronutrientes

Os teores de nutrientes das amostras foram medidos após extração com mistura nitroperclórica (Brasil, 2017). As determinações dos extratos seguiram os seguintes métodos: o fósforo foi analisado por espectrofotometria do ácido molibdovanadofosfórico, o potássio por fotometria de chama e o nitrogênio pelo macrométodo da liga de Raney. Os nutrientes cálcio, magnésio, cobre, ferro, níquel, manganês e zinco foram determinados pelo método espectrométrico por absorção atômica. Cádmio e chumbo foram determinados utilizando-se um espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP/OES). Por fim, o enxofre foi determinado pelo método gravimétrico do sulfato de bário.

3.4 Delineamento experimental e análises de estatísticas

Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Os tratamentos consistiram em biochars produzidos a partir de quatro temperaturas de pirólise (300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C) e dois tempos de residência (30 minutos e 2 horas) para cada temperatura. Os biochars foram denominados da seguinte forma:

- B300_0,5h: biochar produzido a 300 ºC por 30 minutos.
- B300_2h: biochar produzido a 300 ºC por 2 horas.
- B400_0,5h: biochar produzido a 400 °C por 30 minutos.
- B400_2h: biochar produzido a 400 ºC por 2 horas.
- B500_0,5h: biochar produzido a 500 ºC por 30 minutos.
- B500_2h: biochar produzido a 500 ºC por 2 horas.
- B600_0,5h: biochar produzido a 600 ºC por 30 minutos.
- B600_2h: biochar produzido a 600 ºC por 2 horas.

O bambu *in natura* foi utilizado como matéria-prima para a produção do biochar.

A análise estatística foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA). Para verificar as suposições do teste, foram utilizados os testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade. As médias das análises elementares e proximais, assim como da caracterização química, foram comparadas pelo teste LSD de Fisher ($P<0,05$). As análises foram realizadas utilizando o software XLSTAT 2018.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Rendimento de matéria seca

Os valores de rendimento apresentaram variação de 26,39% a 39,01% (Figura 18). Foi possível notar que a temperatura exerceu um maior impacto no rendimento do que os tempos de residência, sendo que com o aumento da temperatura de pirólise houve uma diminuição no rendimento do biochar. De acordo com Liu et al. (2016), temperaturas de pirólise elevadas têm um impacto significativo nas características físicas e químicas dos biochars produzidos, resultando em um menor rendimento de biochar em comparação com a pirólise em baixas temperaturas. Deste modo, a pirólise lenta, decomposição termoquímica em condições de oxigênio limitado, foi identificada como um processo apropriado para a produção de biochar, formando uma estrutura estável, carbonácea e homogênea, resultando em alto rendimento (HUANG et al., 2021).

O rendimento do biochar durante o processo de pirólise depende do tipo e da natureza da biomassa usada (YAASHIKAA et al., 2020). A temperatura é a principal condição do processo operacional que decide a eficiência do produto (WEI et al., 2019).

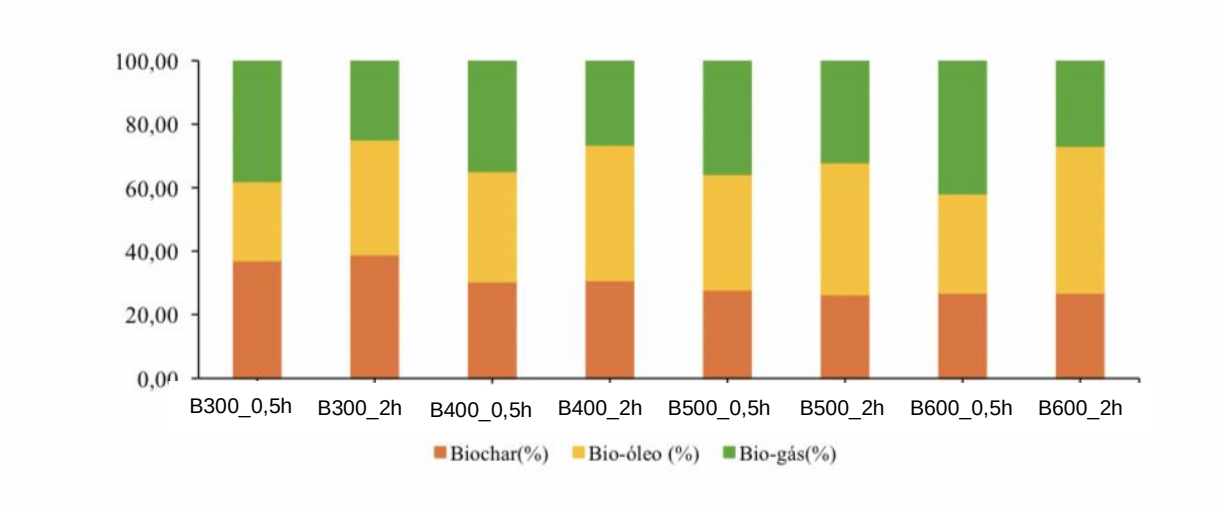


Figura 18. Rendimento (%) de biochar, bio-óleo e bio-gás em diferentes temperaturas de pirólise e tempo de residência.

O rendimento do bio-óleo foi influenciado tanto pela temperatura quanto pelo tempo de residência (Figura 18). O menor tempo de residência (30 min) favoreceu a

produção de bio-óleo em todos os tratamentos. Um curto tempo de residência é a chave para produzir óleo de pirólise com alto rendimento. Isso ocorre porque ele evita que reações de craqueamento secundário ocorram e, portanto, melhora o rendimento do óleo de pirólise (NANDA E DALAI, 2014). Por outro lado, o percentual de bio-gás foi maior no tempo de 2h. A temperatura de pirólise de B600_2h e B600_0,5h foram os que mais favoreceram o rendimento de bio-gás e bio-óleo, respectivamente (Figura 18).

O biochar representa um material interessante para aplicações agrícolas, pois possui alta condutividade elétrica, o que, juntamente com a maior resposta de pH, é uma indicação da presença de impurezas de cinzas inorgânicas com resposta de pH alcalino (sais de metais alcalinos) (KALINA et al., 2022). Esses sais de cátions alcalinos, como K, Na, Ca e Mg, podem representar importantes macronutrientes introduzidos no solo após a aplicação do biochar. Esses macronutrientes podem fornecer substrato importante para os habitantes do solo (microorganismos, fauna e plantas) nos estágios iniciais após a aplicação do biochar como condicionador do solo (KALINA et al., 2022). Ademais, devido à forte alcalinidade do biochar, ele pode ser usado como um aditivo de solo para neutralizar solo ácido na agricultura (SOUZA et al., 2021).

Uma das principais razões pelas quais a pirólise é usada é que a tecnologia é adaptável, e o processo pode ser otimizado com base no produto desejado (PAHNILA et al., 2023). Por exemplo, para produção de biochar em alto volume, a pirólise lenta é o melhor método, enquanto a pirólise rápida é preferida quando o objetivo é maximizar a quantidade de gás de pirólise. A pirólise a vácuo produz mais óleo de pirólise do que a pirólise lenta, enquanto a produção de biochar é diminuída (PAHNILA et al., 2023).

4.2 Composição elementar e propriedades químicas de biochar de bambu

O Biochar produzido a 400 °C, independentemente do tempo de residência, apresentou as maiores concentrações de N (1,36%). Por outro lado, a temperatura de 500º C (0,26%) foi a que promoveu menor concentração de N no biochar (Tabela 1). Estes resultados são semelhantes aos relatados nos estudos de Jindo et al. (2014) e Pariyar et al. (2019) cujos teores de N do biochar diminuíram quando a temperatura aumentou. Em contrapartida, para a pirólise de bambu em Sahoo et al. (2021), o

aumento de temperaturas de 400 ºC para 600 ºC resultou em um aumento no teor de N devido à sua estabilidade térmica e resistência à volatilização. De maneira geral, o N foi o elemento que apresentou as menores concentrações no biochar do que os demais elementos avaliados (C, H e O). A redução nos teores de N com a temperatura pode ser atribuída à volatilização de grupos nitrogenados em alta temperatura que não são facilmente volatilizados em baixas temperaturas (CHATTERJEE et al., 2020). Além disso, os bambus são pobres em proteína e clorofilas que são componentes de N (LIU et al., 2017).

Por outro lado, os resultados mostraram que com o aumento da temperatura, o biochar teve conteúdo de C progressivamente maior, resultante da remoção de ligações entre C e grupos funcionais na superfície da biomassa (WIJITKOSUM e SRIBURI, 2023), o mesmo foi observado para a relação C/N no tratamento 500 ºC por 30 min. O Bambu *in natura* teve baixo teor de N e C e consequentemente a relação C/N foi baixa nesse tratamento (Tabela 1). O biochar teve o maior teor de C quando a temperatura foi elevada a 500 (82,47%) e 600 °C (83,08%) por 30 minutos. No entanto, no tempo de 2 horas foi observada uma diminuição no teor de C (79,32 e 81,67%).

Tabela 1. Composição elementar e razões atômicas de biochar de bambu (B) submetidos a diferentes temperaturas de pirólise e tempo de residência.

BB	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	C/N	H/C	O/C
B300_0,5h	0,94 CD	71,22 D	3,95 BC	19,01 B	77,88 CDE	0,05 BC	0,26 B
B300_2h	1,05 BC	72,14 D	4,60 B	15,10 C	68,32 DE	0,06 B	0,21 BC
B400_0,5h	1,26 AB	77,28 C	3,67 CD	12,60CD	56,98 E	0,05 CD	0,16 CD
B400_2h	1,36 A	80,54 AB	3,92 BCD	8,06 E	64,84 E	0,05 CD	0,10 DE
B500_0,5h	0,26 F	82,47 A	2,85 E	8,17 E	324,50 A	0,03 EF	0,10 DE
B500_2h	0,31 F	79,32 BC	3,16 DE	9,44 DE	251,54 B	0,04 DE	0,12 DE
B600_0,5h	0,74 DE	83,08 A	2,38 EF	4,33 EF	113,22 CD	0,03 FG	0,05 E
B600_2h	0,70 E	81,67 AB	1,95 F	8,45 E	121,26 C	0,02 G	0,10 DE
Bambu *in natura*	0,94 CD	46,49 E	5,94 A	43,06 A	49,47 E	0,12 A	0,93 A

Médias seguidas por letras iguais na coluna não apresentam diferenças entre si, pelo teste Fisher a 5% de probabilidade (P<0,05).

O aumento nos teores de C do biochar foi acompanhado por uma diminuição nos teores de H e O em temperaturas aumentadas de 400 °C a 600 °C. O biochar

reduziu drasticamente o teor de O de 43,06 % no bambu *in natura* para 19,01% quando foi empregado o processo de carbonização na menor temperatura (300 ºC) e chegou a valores menores em temperatura mais altas. Do mesmo modo, Wijitkosum et al. (2022) mostraram que os conteúdos de material volátil, hidrogênio (H) e oxigênio (O) diminuíram à medida que a temperatura de pirólise foi aumentada, tendo o melhor biochar caracterizado na temperatura de 500 ºC (WIJITKOSUM et al., 2022). Por outro lado, o biochar obtido a 400 °C, no estudo de Ye et al. (2015), destacou-se pelas melhores propriedades, incluindo elevados teores de C, H, O, N, P e K. A diminuição nos teores de H e O é provavelmente devido as reações de desidratação, a decomposição das ligações oxigenadas e a liberação de subprodutos de baixo peso molecular contendo H e O (CHATTERJEE et al., 2020).

As razões atômicas H/C e O/C do bambu diminuíram consideravelmente quando foi convertido em biochar e com o aumento da temperatura de pirólise. Como a celulose, a hemicelulose e a lignina têm diferentes teores de C e O, a razão atômica O/C pode refletir variações durante o processo (WIJITKOSUM e SRIBURI, 2023). Além disso, durante a pirólise, o O é liberado em uma taxa maior do que o H, com o produto final do biochar caracterizado por uma razão atômica H/C e A diminuída com um baixo teor de O (WIJITKOSUM et al., 2023). A relação O/C diminui quando a temperatura aumenta devido à reação de descarboxilação, o que implica na alta carbonização e formação de estruturas sólidas de C no biochar (SPOKAS, 2010).

A relação C/N dos materiais variou de 49,47 no bambu in natura a 324 (B500_0,5h). A partir de 500 °C, a relação C/N aumentou bruscamente, com valores acima de 100, devido à redução de N (Tabela 1). O Bambu *in natura* teve baixo teor de N e C e consequentemente a relação C/N foi baixa nesse tratamento. Dependendo da matéria-prima e das condições de pirólise, a relação C/N pode ser altamente variável, variando de 6,5 a 640 (BONANOMI et al., 2017). No entanto, em estudo cuja pirólise foi realizada na mesma faixa de temperatura do presente estudo, Wijitkosum (2022) indicou que o biochar produzido a partir de madeira tinha uma relação C/N (variando de 101,13 a 132,47) maior do que o biochar derivado de resíduos agrícolas (38,94 a 65,08).

Na tabela 2 são apresentados os teores de macronutrientes no bambu e biochars. O biochar de bambu apresentou baixos teores de P e Mg, que não se

diferenciaram entre os tratamentos. Do mesmo modo, Souza et al. (2021) relataram que o efeito da pirólise no teor de Mg foi insignificante. De uma forma geral, os teores de K_2O e S são mais elevados nas temperaturas de 400 a 600ºC (Tabela 2). Os teores de Ca só sofreram uma pequena redução na temperatura de 400 °C, sendo menor do que o bambu *in natura* e o B300_2h. Da mesma forma, o teor de MO só foi reduzido no B600_0,5h, comparado ao bambu in natura, não havendo diferenças entre os demais tratamentos. O aumento do enriquecimento de metais com a temperatura é devido à decomposição da matéria orgânica, que resulta na liberação dos metais associados aos compostos orgânicos e perda do conteúdo volátil (DEVI et al., 2014).

Os teores de micronutrientes e metais pesados são apresentados na Tabela 3. Os teores de Cu, Cd e Ni não foram afetados pelos diferentes tratamentos. Os teores dos micronutrientes Fe e Zn foram maiores no bambu *in natura* e o Mn no B600_0,5h. Chan e Xu (2009) mostraram que a concentração de Cu, Zn, Pb, Mn e Fe aumentaram linearmente com a temperatura de pirólise devido à perda de materiais voláteis e umidade, e aos altos pontos de ebulição (WESSEMBECK et al., 2017). O B400_2h teve maior teor de B300_0,5h ($P<0,05$). Apesar diferença, todos os biochar apresentaram teores de Pb similares ao bambu *in natura* (Tabela 3).

Tabela 2. Teores dos macronutrientes do biochar de bambu (B) em diferentes temperaturas e tempo de residência.

BB	P_2O_5 (g/kg)	K_2O (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	S (g/kg)	M.O (g/kg)
B300_0,5h	7,77 A	9,90 BC	0,67 ABC	0,30 A	0,90 B	927 AB
B300_2h	7,10 A	7,03 C	1,50 A	0,83 A	0,80 B	930 AB
B400_0,5h	7,63 A	13,90 AB	0,53 C	0,50 A	1,23 AB	893 AB
B400_2h	7,77 A	13,90 AB	0,53 C	0,53 A	0,90 B	906 AB
B500_0,5h	7,77 A	14,97 A	0,73 BC	0,67 A	1,47 AB	827,33 ABC
B500_2h	7,77 A	15,53 A	1,10 ABC	0,67 A	1,23 AB	891 ABC
B600_0,5h	0,763 A	14,57 AB	0,87 ABC	0,70 A	1,57 AB	773,33 C
B600_2h	0,930 A	14,13 AB	0,90 ABC	0,60 A	1,73 A	813,67 BC
Bambu *in natura*	0,653 A	6,48 C	1,23 A	0,51 A	1,07 AB	941,36 A

Médias seguidas de letra iguais não apresentam diferenças entre si pelo teste Fisher a 5% de probabilidade ($P<0,05$).

Tabela 3. Teores dos micronutrientes e metais pesados no biochar de bambu (B) submetidos a diferentes temperaturas de pirólise e tempo de residência.

BB	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
B300_0,5h	18,667 A	1.046,3 B	29,00 B	18,00 B	1,333 A	14,333 A	3.333 B
B300_2h	9,000 A	3.184,7 AB	35,67 B	37,02 AB	0,967 A	21,667 A	5,000 AB
B400_0,5h	10,000 A	1.759,3 B	28,72 B	31,00 B	1,267 A	14,667 A	7,333 AB
B400_2h	28,333 A	2.055,3 B	40,67 B	23,00 B	1,233 A	17,333 A	8,667 A
B500_0,5h	9,000 A	1.181,3 B	31,33 B	24,36 B	1,667 A	16,333 A	4,970 AB
B500_2h	27,333 A	1.766,0 B	41,67 B	24,36 B	1,633 A	14,333 A	5,636 AB
B600_0,5h	17,000 A	4.445,0 AB	73,39 A	35,67 AB	0,967 A	19,333 A	5,303 AB
B600_2h	7,667 A	993,7 B	41, 67 B	38,67 AB	1.700 A	16,333 A	4,970 AB
Bambu *in natura*	11,808 A	6.748,5 A	49,39 AB	68,36 A	1.106 A	21,090 A	7,970 AB

Médias seguidas de letra iguais não apresentam diferenças entre si pelo teste Fisher a 5% de probabilidade (P<0,05).

O teor de C fixo aumentou com o aumento da temperatura de pirólise (Tabela 4). O biochar produzido na temperatura mais alta (600 °C) teve o maior C. Fixo (82,99%) e um teor de cinzas de 4,73%, enquanto teve o menor valor de materiais voláteis (8,93%). Todavia, o maior teor de material volátil foi encontrado no bambu *in natura* (81,02%). A análise realizada por Tan et al. (2021) relatou que o biochar produzido por pirólise lenta apresenta teor de C. Fixo variando de 30% a 98%, dependendo da temperatura e dos tipos de matéria-prima. No presente estudo, o percentual de C. Fixo nas diferentes temperaturas variou de 55,28 a 82,99%.

As variáveis cinzas, pH, densidade e condutividade elétrica (CE) tiveram seus maiores teores nas temperaturas de 600 ºC. Porém, o teor de cinzas sofreu redução no tratamento B600_2h em relação ao tratamento B600_0,5h. No estudo conduzido por Ye et al. (2015), o bambu foi submetido a temperaturas de pirólise variando entre 300 °C e 500 °C, resultando em um biochar com densidade reduzida em comparação ao bambu *in natura*, mas com valores elevados de pH e teor de carbono. O valor elevado do pH, por exemplo, se dá porque, em temperaturas mais elevadas, as ligações fracas no biochar, como as ligações hidroxila, são rompidas dentro de sua

estrutura (LI et al., 2022), Além da maior concentração de cátions e sais de reação alcalina, como a presença de $CaCO_3$, não avaliado no presente estudo.

No geral, observa-se que o biochar obtido nas diferentes temperaturas tinha menores teores de H e O do que o bambu in natura, porém tem maiores teores de cinzas, C e N. O aumento do teor de cinzas em temperaturas mais elevadas de pirólise ocorre principalmente devido ao aumento da concentração de alguns minerais (Tabela 3) em amostras de biochar, uma vez que esses elementos não são perdidos pela volatilização (ZHOU et al., 2013).

A CE primeiro sofreu redução até 400 °C, seguida de aumento dos valores em temperaturas maiores que essa. O CE do biochar é uma estimadora da quantidade total de sais dissolvidos na amostra, é uma das várias propriedades do biochar influenciadas pela fonte de matéria-prima e pelas condições de pirólise, como temperatura, tempo de residência e tratamento de ativação (LU et al., 2013). A CE mais alta em pirólises com temperaturas mais elevadas é devido a um aumento no teor de cinzas, que contém elementos como Ca, Mg, K e Na contribuindo para a força iônica do biochar (CHAUDHARY et al., 2023)

Tabela 4. Valores de materiais voláteis, cinzas, C fixo, pH, densidade e condutividade elétrica (CE) de biochar de bambu (B) submetidos a diferentes temperaturas de pirólise e tempo de residência.

BB	M. Voláteis (%)	Cinzas (%)	C fixo (%)	pH	Densidade (kg m^{-3})	CE (mS^{-1})
B300_0,5h	39,72 B	2,43 E	55,28 G	7,24 E	659,72 E	249,66 H
B300_2h	36,34 C	3,55 C	57,64 F	7,18 E	575,49 G	196,80 I
B400_0,5h	26,37 D	2,53 E	68,91 D	7,89 D	735,49 B	282,00 G
B400_2h	26,32 D	3,09 D	67,88 E	8,00 D	637,52 F	393,66 F
B500_0,5h	18,35 E	3,12 D	75,57 C	9,35 C	719,47 C	708,66 C
B500_2h	17,72 F	3,87 B	75,32 C	9,41 BC	693,27 D	637,00 D
B600_0,5h	12,56 G	4,72 A	79,65 B	9,61 AB	791,87 A	941,00 B
B600_2h	8,93 H	3,60 C	82,99 A	9,78 A	791,07 A	979,66 A
Bambu *in natura*	81,02 A	1,77 F	13,71 H	5,87 F	221,14 H	590,66 E

Médias seguidas de letra iguais não apresentam diferenças entre si pelo teste Fisher a 5% de probabilidade (P<0,05)

A condutividade e o pH do biochar representam parâmetros que caracterizam seu potencial agronômico, pois ambos descrevem o conteúdo e o caráter dos macros e microelementos disponíveis no biochar (KALINA et al., 2022). Todos os biochars apresentaram pH acima de 7 com o aumento da temperatura de pirólise (Tabela 4). Um pH mais alto com o aumento da temperatura foi associado aos aumentos no conteúdo de cinzas e grupos funcionais de oxigênio que ocorrem durante a pirólise (ZHAO et al. 2017). Além disso, à medida que a temperatura da pirólise aumenta, grupos funcionais ácidos são liberados do biochar, reduzindo sua acidez geral e mudando para valores de pH alcalinos. Temperaturas mais altas também levam ao acúmulo de óxidos e carbonatos metálicos básicos, aumentando ainda mais a alcalinidade (CHAUDHARY et al., 2023; CHEN et al., 2022; LI et al., 2017).

5. CONCLUSÃO

Os resultados do presente estudo mostram que as propriedades do biochar de bambu são afetadas pela temperatura de pirólise e o tempo de residência. Com o aumento de temperatura de pirólise ocorre diminuição do material volátil e aumento do teor de cinzas, do carbono fixo, do pH, da densidade e da condutividade elétrica do biochar. No presente estudo pouca alteração ocorreu nos teores de macro e micronutrientes com o aumento de temperatura. Apenas os teores de potássio foram aumentados com o aumento da temperatura de pirólise. O aumento da temperatura reduziu o rendimento do biochar, mas elevou o rendimento do bio-óleo. O bio-gás foi maior quando o tempo de residência foi menor (30 minutos). Conclui-se que o bambu é uma interessante matéria-prima para a produção de biochar. Devido às variações nas propriedades nos diferentes biochars, a escolha da temperatura será determinada de acordo com o uso que se pretende dar ao biochar. Estudos adicionais precisam ser realizados para verificar os efeitos agronômicos do biochar de bambu.

6. REFERÊNCIAS

BERALDO, A. L.; PEREIRA, M. A. R. **Bambu de corpo e alma**. vol. 240, p. 21, 2007.

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

CHA, J. S.; PARK, S. H.; JUNG, SC.; RYU, C.; JEON, JK.; SHIN, MC.; PARK, YK., Production and utilization of biochar: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, vol. 40, p. 1-15, 2016.

CHAN, K. Y.; XU, Z.H. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. In J. Lehmann, & S. Joseph (Eds.), Biochar for Environmental Management: science and technology. **Earthscan**, vol. 5, p. 67-84, 2009.

CHATTERJEE, R.; SAJJADI, B.; CHEN, W.; MATTERN, D.L.; HAMMER, N.; RAMAN, V.; DORRIS, A. Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties and acoustic-based amination of biochar for efficient CO_2 adsorption. **Frontiers in Energy Research**. vol. 8, p.85, 2020.

CHATURVEDI, K.; SINGHWANE, A.; DHANGAR, M.; MILI, M.; GORHAE, N.; NAIK, A.; PRASHANT, N.; SRIVASTAVA, A. K.; VERMA, S. Bambu bambu for producing charcoal and biochar for versatile applications. **Biomass Conversion and Biorefinery**, vol. 14, p.15159-15185, 2024.

CHAUDHARY, H., DINAKARAN, J., VIKRAM, K., NOTUP, T., & RAO, K. S. (2023). Evaluation of physico-chemical and structural properties of biochar produced from pyrolysis of urban biowaste. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 25, p. 2845–2860, 2023.

CHEN, L., GUO, L., LIAO, P., XIONG, Q., DENG, X., GAO, H., WEI, H., DAI, Q., PAN, X., ZENG, Y., & ZHANG, H. Effects of biochar on the dynamic immobilization of Cd and Cu and rice accumulation in soils with different acidity levels. **Journal of Cleaner Production**, vol. 372, 133730, 2022.

CHEN, D. Y.; XINZHI, Y.; CHAO, C.; PANG, X.; HUANG, J.; YANJUN, L. Effect of pyrolysis temperature on the chemical oxidation stability of bamboo biochar. **Bioresource Technology**, vol. 218, p. 1303-1306, 2016.

CHEN, Y.; LIU, G.; WANG, J.; Li, S.; ZHANG, R. Recent advances in biogas production and utilization: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 144, 110991, 2021.

DA COSTA, M. M.; GUIMARÃES, T.; FRANÇA, K. D.; SILVA, L. S.; DE ALMEIDA, R. F.; HENRIQUE, T. C.; FERNANDES, S. A.; TULER, G. V.; BITTENCOURT, R. C.; BARBOSA, V. O. P.; CARVALHO, A. M. M. L. 2,3- Dihydrobenzofuran production eco- friendly by fast pyrolysis from Dendrocalamus asper biomass. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 10.1007, 2023.

DEMIRBAS, A. Effect of Temperature on Pyrolysis Products from Biomass. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 29(4), 329–336, 2007.

DEVI, P; SAROHA, A. K. Risk analysis of pyrolyzed biochar made from paper mill effluent treatment plant sludge for bioavailability and eco-toxicity of heavy metals. **Bioresource Technology.** vol. 162, p. 308–315, 2014.

DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia. **ICH (Instituto Ciência Hoje)**, vol. 1, 17-45294, 2017.

ESPELHO, J. C. C.; BERALDO, A. L. Avaliação físico-mecânica de colmos de bambu tratados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 645-652, 2008.

HANI, A. *Dendrocalamus asper* productivity after beginning thinning. **IOP Conference Series: Earth and Environmetal Science**, vol. 449, 2024.

HERNANDEZ-MENA, L. E.; PÉCORA, A. A. B.; BERALDO, A. L. Slow Pyrolysis of Bamboo Biomass: Analysis of Biochar Properties. **Chemical Engineering Transactions**, vol. 37, 2014.

INICIATIVA INTERNACIONAL DE BIOCHAR. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar 7 That Is Used in Soil. **International Biochar Initiative (IBI)**, vol. 2.1, 2015.

JINDO K., MIZUMOTO H., SAWADA Y., SANCHEZ-MONEDERO M.A., SONOKI T. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. **Biogeosciences**, vol. 11, p. 6613-6621, 2014.

JUDZIEWICZL, E. J.; CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; STERN, M. J. American Bamboos. **Smithsonian Books**, vol. 1, 1999.

KALINA, M., SOVOVA, S., SVEC, J., TRUDICOVA, M., HAJZLER, J., KUBIKOVA, L., & ENEV, V. The effect of pyrolysis temperature and the source biomass on the properties of biochar produced for the agronomical applications as the soil conditioner. **Materials**, vol. 15, ed. 24, p. 8855, 2022.

LATAF, A.; JOZEFCZAK, M.; VANDECASTEELE, B.; VIAENE, J.; SCHREURS, S.; CARLEER, R.; YPERMAN, J.; MARCHAL, W.; CUYPERS, A.; VANDAMME, D. The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, vol. 168, 105728, 2022.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management. **Science, Technology and Implementation**, vol. 2, p. 976, 2015.

LI, H., DONG, X., DA SILVA, E. B., DE OLIVEIRA, L. M., CHEN, Y., & MA, L. Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. **Chemosphere**, vol. 178, p. 466–478, 2017.

LI, F.; CAO, X.; ZHAO, L.; WANG, J.; DING, Z. Effects of Mineral Additives on Biochar Formation: Carbon Retention, Stability, and Properties. **ACS Publications**, vol. 48, 10.1021, 2014.

LI, Z., ZHANG, R.; LI, Y.; CHEN, Y.; ZHANG, R.; ZHAO, Y. Biochar production, characterization, and applications: A review. **Bioresource Technology**, vol. 348, 126669, 2022.

LIU W.-J., LI W.-W., JIANG H., YU H.-Q. Fates of chemical elements in biomass during its pyrolysis. **Chemical Reviews**, vol. 117, p. 6367-6398, 2017.

LIU, G.; XU, Q.; DONG, X.; YANG, J.; PILE, L. S.; WANG, G. G.; WANG, F., Effect of Protective Gas and Pyrolysis Temperature on the Biochar Produced from Three Plants of Gramineae: Physical and Chemical Characterization. **Waste and Biomass Valorization**, vol. 7, ed. 6, p. 1469-1480, 2016.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ÁNGEL, J. D. M.; LEITE, M. A. H.; ROCHA, M. H.; DE SALES, C. A. V. B.; MENDOZA, M. A. G.; CORAL, D. S. O. Gaseificação e pirolise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. **Biocombustíveis**, cap. 6, p. 417, 2012.

LU, H.; ZHANG W.; WANG, S-Z.; ZHUANG, L.; YANG, Y. Characterization of sewage sludge-derived biochars from different feedstocks and pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, vol. 102, p. 137-143, 2013.

MAIA, C. M. B. de F.; GUIOTOKU, M.; PEIXOTO, R. T. dos G.; PARRON, L. M. Biochar e o eucalipto. **Embrapa Florestas; Embrapa Solos**, p. 589-609, 2021.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & Fuels**, vol. 20, p. 848-889, 2006.

MONLAU, F.; LATRILLE, E.; DUMAS, C.; VEIT, T.; LIPP, J.; FORESTI, E.; STEYER, J.-P. Recent advances in the thermochemical conversion of sludge into energy and

valuable products. **Bioresource Technology**, vol. 298, 122386, 2020.

NANDA, S.; MOHAMMAD, J.; REDDY, S.N.; KOZINSKI, J.A.; DALAI, A.K. Pathways of Lignocellulosic Biomass Conversion to Renewable Fuels. **Biomass Conversion Biorefinery**, vol. 4, p. 157-191, 2014.

OSTAPIV, F. Uses and properties of bamboo charcoal. **ENSUS**, p. 6, 2023.

PARIYAR P.; KUMARI K.; JAIN M.K.; JADHAO P.S. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. **Science of The Total Environment**, vol. 713, 136433, 2020.

PAHNILA, M., KOSKELA, A., SULASALMI, P., FABRITIUS, T. A review of pyrolysis technologies and the effect of process parameters on biocarbon properties. **Energies**, vol. 16, p. 6936, 2023.

POUDEL, J.; BARAL, N. R.; CHEN, Y.; SHAH, A.; KHANAL, S. K. Thermochemical conversion of biomass to bio-oil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 133, 110192, 2020.

RODRIGUEZ FRANCO, C.; PAGE-DUMROESE, D.S.; PIERSON, D.; MILLER, M.; MILES, T. Policy and Regulations for Mobile Biochar Production in the United States of America. **FOREST**, vol. 15, p. 192, 2024.

SADHUKHAN, P.; GHOSH, S.; DUTTA, S.; SHENDE, R. V.; RAY, D. Recent advances in bio-oil production from lignocellulosic biomass: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 139, 110703, 2021.

SAHOO S.S., VIJAY V.K., CHANDRA R., KUMAR H. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. **Cleaner Engineering and Technology**, vol. 3, 100101, 2021.

SCHARFENBERG, H. R.; ANHÊ, A. C. B. M.; DE ARAÚJO, V. A.; GAVA, M.; MASCARENHAS, F. J. R.; MORALES, E. A. M.; CHRISTOFORO, A. L.; SHIMANO, M. M.; CORTEZ-BARBOSA, J. The Flexural Strength of Three Bamboo Species from Brazil: A Comparative Study of Internal and External Lamina Surfaces Using Static and Dynamic Bending Properties. **Forests**, vol. 15, p. 580, 2024.

SEABRA. M. C. V. P. Pirólise de resíduos sólidos: revisão teórica, atualidades e perspectivas. **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, p. 6, 2023.

SEMIDA, W. M.; BEHEIRY, H. R.; SÉTAMOU, M.; SIMPSON, C. R.; ABD EL-MAGEED, T. A.; RADY, M. M.; NELSON, S. D. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. **South African Journal of Botany**, vol. 127, p. 333-347, 2019.

SEOW, Y. X.; TAN, Y. H.; MUBARAK, N. M.; KANSEDO, J.; KHALID, M.; IBRAHIM, M. L.; GHASEMI, M. A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. **Journal of Environmental Technology & Innovation**, vol. 10, ed. 1, 107017, 2022.

SPOKAS K.A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O: C molar ratios. **Carbon Management,** vol. 1, p. 289–303, 2014.

SU, J.; GUO, Z.; ZHANG, M.; XIE, Y.; SHI, R.; HUANG, X.; TUO, Y.; HE, X.; XIANG, P. Mn-modified bamboo biochar improves soil quality and immobilizes heavy metals in contaminated soils. **Journal of Environmental Technology & Innovation**, vol. 34, 103630, 2024.

SUTHAR, R. G.; WANG, C.; NUNES, C. N.; CHEN, J.; SARGENT, S. A.; BUCKLIN, R. A.; GAO, B. Bamboo Biochar Pyrolyzed at Low Temperature Improves Tomato Plant Growth and Fruit Quality. **Agriculture**, vol. 8, p. 153, 2018.

TAN H., LEE C., ONG P., WONG K., BONG C., LI C., GAO Y. A review on the comparison between slow pyrolysis and fast pyrolysis on the quality of lignocellulosic and lignin-based biochar. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng**, vol. 1051, 012075, 2020.

TEIXEIRA, W. G.; MARQUES, J. D. de O. M.; STEINER, C.; FLANAGAM, R. Retenção de água em carvão de bambu e madeira produzidos a diferentes temperaturas. **Embrapa Solos**, vol. 1, p. 368-381, 19720-1, 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**, vol. 28, n. 2, 2018.

WANG, H.; LIU, S.; CHEN, Y.; ZHANG, R.; HE, M. A review of recent progress in hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for biochar production: Process, mechanism, and applications. **Bioresource Technology**, vol. 330, 124958, 2021.

WANG Y., ZHONG B., SHAFI M., MA J., GUO J., WU J., YE Z., LIU D., JIN H. Effects of biochar on growth, and heavy metals accumulation of moso bamboo (*Phyllostachy pubescens*), soil physical properties, and heavy metals solubility in soil. **Chemosphere**. vol. 219, p. 510–516, 2019.

WEI, J.; TU, C.; GUODONG, Y.; LIU, Y.; BI, D.; XIAO, L.; LU, J.; THENG, B. KG.; WANG, H.; ZHANG, L.; ZHANG, X. Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. **Environmental Pollution**, vol. 251, p. 56-65, 2019.

WIJITKOSUM, S.; SRIBURI, T. Aromaticity, polarity, and longevity of biochar derived from disposable bamboo chopsticks waste for environmental application. **Heliyon**, vol.

9, ed. 9, 2023.

WIJITKOSUM S. Repurposing disposable bamboo chopsticks waste as biochar for agronomical application. **Energies**, vol. 16, p. 771, 2023.

WIJITKOSUM S. Biochar derived from agricultural wastes and wood residues for sustainable agricultural and environmental applications. **International Soil and Water Conservation Research**, vol. 10, p. 335-341, 2022.

YE, L.; ZHANG, J.; ZHAO, J.; LUO, Z.; TU, S.; YIN, Y. Properties of biochar obtained from pyrolysis of bamboo shoot shell. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, vol. 114, p. 172-178, 2015.

ZHANG, Y.; CHEN, Q.; ZHAN, X. Agricultural waste management: Strategies, environmental impact and future perspectives. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 25, p. 10566-10574, 2018.

ZHANG, Y.; MA, Z.; ZHANG, Q.; WANG, J.; MA, Q.; YANG, Y.; LUO, X.; ZHANG, W. Comparison of the physicochemical characteristics of biochar pyrolyzed from moso bamboo and rice husk with different pyrolysis temperatures. **Bioresources**, vol. 12, p. 4652-4669, 2017.

ZHANG H., VORONEY R., PRICE G. Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. **Soil Biology and Biochemistry**, vol. 83, p. 19-23, 2015.

ZHANG, J.; LIU, J.; LIU, R. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate. **Bioresource Technology**, vol.176, p. 288-291, 2014.

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

ZHAO-HUA, L.; KOBAYASHI, M. Plantation future of bamboo in China. **Journal of Foresty Research**, vol. 15, p. 233-242, 2024.

ZHAO, Y.; ZHANG, B.; WANG, H.; HUANG, Z.; LI, L.; ZHANG, R.; CHEN, Y. Recent advances in biochar production from biomass for sustainable energy applications: A review. **Bioresource Technology**, vol. 300, 122724, 2020.

ZHOU, X., MOGHADDAM, T. B.; CHEN, M.; WU, S.; ZHANG, Y.; ZHANG, X.; ADHIKARI, S.; ZHANG, X. Effects of pyrolysis parameters on physicochemical properties of biochar and bio-oil and application in asphalt. **Science of The Total Environment**, vol. 780, 146448, 2021.

ZHOU, Y., GAO, B., ZIMMERMAN, A. R., FANG, J., SUN, Y., AND CAO, X. Sorption of heavy metals on chitosan-modified biochars and its biological effects. **Chemical Engineering Journal**, vol. 231, p. 512-518, 2013.