UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

LOUISE MENEZES PIMENTEL

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIOCHAR DA CASCA DE *Coffea canephora* PRODUZIDO EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE PIRÓLISE

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2025

LOUISE MENEZES PIMENTEL

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIOCHAR DA CASCA DE *Coffea canephora* PRODUZIDO EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE PIRÓLISE

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Estado do Espírito Santo, como requisito parcial na obtenção do título de Engenheira Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2025

LOUISE MENEZES PIMENTEL

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIOCHAR DA CASCA DE *Coffea canephora* PRODUZIDO EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE PIRÓLISE

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Estado do Espírito Santo, como requisito parcial na obtenção do título de Engenheira Florestal.

Aprovada em 18 de agosto de 2025.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Mestra em Ciências Florestais Fabíola Martins Delatorre
Universidade Federal do Espírito Santo
Conselheira

Mestre em Ciências Gabriela Aguiar Amorim
Universidade de São Paulo
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal do Espírito Santo e ao Departamento de Engenharia Florestal por me proporcionarem não apenas uma formação acadêmica, mas também um espaço fértil para o desenvolvimento do pensamento crítico e da pesquisa científica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. **Ananias Dias Junior**, e à minha coorientadora, **Fabiola Delatorre**, minha mais profunda gratidão. Mestres desta jornada, foram mais que guias acadêmicos: foram inspiração e exemplo. Cada conselho, correção e incentivo ecoará muito além destas páginas, moldando não apenas a profissional que me torno, mas também a pessoa que sigo construindo.

Aos meus amigos, essenciais e imprescindíveis nesta caminhada, meu sincero reconhecimento. Os passos que damos ao lado de companhias que suportam e caminham conosco não se medem apenas em distância percorrida, mas em significado. São eles que tornam o trajeto mais leve, as conquistas mais doces e os desafios menos árduos. Assim como um café bem cultivado carrega em si o tempo, o cuidado e a dedicação de muitas mãos, cada vitória aqui registrada traz a marca de todos que me acompanharam.

À minha família, minha base e meu refúgio, que ao longo dos anos esteve presente em cada etapa com apoio incondicional, incentivo constante e parceria verdadeira. Foram suas palavras, gestos e presença que me sustentaram nos momentos de incerteza e me impulsionaram a seguir em frente. Sem esse alicerce de amor e dedicação, este momento não teria sido possível, e cada conquista perde o sentido se não puder ser compartilhada com vocês.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este momento fosse possível. Cada gesto, palavra e presença foi semente plantada no solo da minha trajetória, germinando em frutos que levo comigo para a vida.

RESUMO

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas mais expressivas do Brasil, destacando-se não apenas pela produção de grãos, mas também pela elevada geração de resíduos durante o processamento dos frutos. Estima-se que cerca de 93% do volume do fruto de café seja descartado como resíduo, sendo a casca um dos principais subprodutos. A gestão inadequada desse resíduo pode acarretar impactos ambientais, ao passo que sua valorização, por meio de tecnologias como a pirólise, representa uma alternativa sustentável e de valor agregado. Este estudo de pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura de pirólise (400, 600 e 800°C) nas propriedades físico-químicas do biochar produzido a partir da casca de café, visando seu potencial como condicionador de solo. A biomassa foi submetida à pirólise controlada em mufla, com taxa de aquecimento de 5°C.min^{-1} e tempo de residência de uma hora. O biochar obtido foi caracterizado quanto ou rendimento dos co-produtos gerados, densidade a granel, composição química (cinzas, voláteis, carbono fixo) e pH. Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura reduziu significativamente o rendimento em biochar e sua densidade, enquanto promoveu incremento no teor de carbono fixo. A composição química variou com a temperatura: o carbono fixo aumentou de 67% (400°C) para 77% (800°C), enquanto o teor de voláteis decresceu de 25% para 10%. O pH apresentou redução até 600°C e elevação a 800°C. A temperatura de pirólise exerce influência nas propriedades do biochar, sendo necessário equilibrar rendimento e qualidade conforme a aplicação desejada. A casca de café é um resíduo abundante e nutritivo, com grande potencial para produção de biochar e uso agrícola. Embora todas as temperaturas sejam viáveis, a pirólise a 800°C é a mais recomendada para uso em solos tropicais ácidos e aplicações de longo prazo.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais. Biomassa. Sustentabilidade. Casca de café.

.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS vi

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivos 3

1.1.1 Objetivo geral 3

1.1.2 Objetivos específicos 3

2 REVISÃO DE LITERATURA 4

2.1 Cenário da cafeicultura brasileira 4

2.1.1 Produção nacional e geração de resíduos 4

2.1.2 *Coffea canephora* 5

2.2 Pirólise de materiais lignocelulósicos 6

2.3 Parâmetros das propriedades físico-químicas do biochar para uso no solo 7

3 METODOLOGIA 10

3.1 Coleta, caracterização da biomassa lignocelulósica e obtenção do biochar 10

3.2 Caracterização do biochar 11

3.3 Análise estatística 11

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 12

4.1 Caracterização das propriedades dos resíduos da casca de *Coffea canephora*. 12

4.2 Rendimento dos produtos e co-produtos da pirólise da casca de *Coffea canephora.* 14

4.3 Caracterização do biochar da casca de *Coffea canephora* 15

5 CONCLUSÃO 21

6 REFERÊNCIAS 22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição química imediata da casca de *Coffea canephora.*.....13

Figura 2 – Rendimentos do produto e co-produto da pirólise da casca de *Coffea canephora*. (A) rendimento de carvão vegetal e (B) rendimento dos gases não-condensáveis.. 14

Figura 3 - Densidade a granel do biochar oriundo da casca de Coffea canephora sob diferentes temperaturas de pirólise 16

Figura 4 – Composição química imediata do biochar oriundo da casca de *Coffea canephora* sob diferentes temperaturas de pirólise. Em que: (A) teor de materiais voláteis B) teor de cinzas C) teor de carbono fixo. 17

Figura 5 – Análise de pH do biochar oriundo da casca de *Coffea canephora* sob diferentes temperaturas de pirólise. 19

1 INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais conhecidas em todo o mundo, consumida por milhões de pessoas todos os dias. Na safra 2024/25, a produção mundial de café foi estimada em aproximadamente 174 a 175 milhões de sacas de 60 kg, evidenciando um crescimento moderado em relação ao ciclo anterior (USDA, 2024). Os cinco maiores países produtores são Brasil, Vietnã, Colômbia, Indonésia e Etiópia, e foram responsáveis por cerca de 130 milhões de sacas, o que corresponde a mais de 74% da produção global, mantendo-se em patamar semelhante ao observado na safra de 2022/23 (Boschiero, 2023). Entre esses, o Brasil se destacou com uma produção aproximada de 69,9 milhões de sacas, seguido pelo Vietnã com cerca de 29 milhões, Colômbia com 12 a 13 milhões, Indonésia com aproximadamente 10,9 milhões e Etiópia com 8,4 milhões de sacas, conforme dados do United States Department of Agriculture (USDA, 2024).

O Brasil é responsável por aproximadamente 36,8% da produção global. Com uma tradição histórica e uma indústria cafeeira bem estruturada, desempenhando um papel estratégico no cenário cafeeiro internacional, influenciando diretamente os mercados e o comércio global dessa *commodity* (Boschiero, 2023). De acordo com os dados da Organização Internacional do Café (IOC), entre outubro de 2023 e setembro de 2024, foram produzidas no mundo todo 178 milhões de sacas de 60 kg e se teve um consumo de 177 milhões de sacas (Datagro, 2025). Segundo o mesmo autor, em relação à exportação, o Brasil enviou aproximadamente 41,4 milhões de sacas do grão em 2023, o Vietnã 28,6 milhões, a Colômbia 10,9 milhões e a Indonésia 6,2 milhões.

O Espírito Santo é referência nacional e internacional na produção de *Coffea canephora* (café conilon), respondendo por cerca de 20% da produção mundial e 70% da brasileira, com produtividades médias que chegam a 44,1 sacas por hectare, segundo dados do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2024). A cafeicultura gera um grande volume de resíduos: para cada tonelada de café processada, cerca de 93% correspondem a subprodutos, como a casca de café (Herrera, 2021). Rica em compostos fenólicos, quando descartada de forma inadequada pode contaminar o solo, causar riscos ambientais e sanitários, além

de apresentar dificuldades de transporte e risco de queimadas (Nunes; Silveira, 2004; Herrera, 2021).

O manejo desses resíduos deve atender à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e ao Decreto nº 10.936/2022, que determinam práticas de reaproveitamento, como compostagem, uso como cobertura de solo ou geração de energia, conforme as Normas Técnicas da Produção Integrada de Café (Brasil, 2010; Brasil, 2022). Tais ações integram o conceito de economia circular, que busca reduzir a geração de resíduos, prolongar a vida útil dos recursos e maximizar seu valor econômico e ambiental (Stumm, 2019), favorecendo uma cafeicultura mais sustentável.

Nos últimos anos, tem-se observado um interesse crescente na utilização do biochar como uma estratégia eficaz para a correção de solos ácidos ou deficientes em nutrientes, visando a restauração ecológica do solo, ao mesmo tempo em que contribui para o sequestro de carbono (Wang *et al.*, 2020). Cada vez mais pesquisas recomendam o uso do biochar, tendo a premissa de melhorar as características dos solos tropicais, pois resíduos orgânicos contribuem para o armazenamento de carbono orgânico recalcitrante no solo, aumenta capacidade de troca catiônica (CTC), disponibiliza micronutrientes, melhora da estrutura, a infiltração, a retenção de água e a aeração, melhorando e condicionando sua estrutura, aumentando a fertilidade e consequentemente sua produtividade (Lima *et al.*, 2019).

O biochar é um material carbonáceo, obtido da pirólise da biomassa em temperaturas elevadas - entre 400ºC e 700ºC - em estruturas com oxigênio limitado (Lehmann; Joseph, 2009). Rico em carbono, de baixa densidade e estrutura porosa estável, pode ser produzido por meio de diversos métodos de decomposição térmica, como pirólise lenta e rápida, gaseificação e carbonização (Do; Nguyen, 2024). A propriedades físico-químicas do biochar são fortemente influenciadas pelas condições de pirólise e pelo tipo de matéria-prima utilizada, sendo as variações de temperatura durante o processo o fator que mais impacta suas características (Bednik *et al.*, 2022). Ademais, estudos recentes apontam sua aplicação como adsorvente sustentável para poluentes, metais pesados e gases de efeito estufa. Além de enriquecer o solo com compostos orgânicos e inorgânicos. Se destaca como uma estratégia eficaz para o sequestro de carbono, contribuindo par a mitigação das mudanças climáticas e para o aumento da produtividade agrícola (Do; Nguyen, 2024).

Produzir um biochar de casca de café obtido pela pirólise, pode apresentar características físico-químicas interessantes, promovendo maior retenção de água e nutrientes, aumentando sua fertilidade. Além disso, representa uma abordagem sustentável que agrega valor aos resíduos agrícolas e oferece benefícios ambientais significativos. Essa prática se alinha aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos e a sustentabilidade na agricultura. Portanto, a transformação de cascas de café em biochar não apenas oferece uma solução eficaz para o manejo de resíduos agrícolas, mas também promove práticas agrícolas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Assim, a casca de café se configura como uma fonte renovável, de baixo custo e alta disponibilidade que pode ser utilizada para sustentabilidade. O presente trabalho teve como objetivo utilizar um resíduo do beneficiamento do café (cascas), para a produção de biochar por pirólise em diferentes temperaturas, a fim de compreender como essas variações influenciam nas propriedades do solo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a conversão da casca de *Coffea canephora* em biochar por meio do processo de pirólise, como uma alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais. O estudo busca investigar o efeito de diferentes temperaturas de pirólise sobre as características físico-químicas do biochar produzido.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o impacto das diferentes temperaturas de pirólise na conversão da casca de *Coffea canephora*, com ênfase na eficiência do processo e na obtenção de biochar;
- Investigar as características físicas e químicas do biochar da casca de café de *Coffea canephora* sob diferentes temperaturas, e compreender sua estabilidade química;
- Entender a eficiência da casca de *Coffea canephora* para a produção do biochar, com o objetivo de otimizar as condições do processo e melhorar a qualidade do biochar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cenário da cafeicultura brasileira

2.1.1 Produção nacional e geração de resíduos

Segundo o relatório de 2023 da Organização Internacional do Café, a espécie *Coffea canephora* respondeu por 44,1% da produção global de café, enquanto *C. arabica* representou 55,9%, reafirmando a posição da *C. canephora* como a segunda espécie mais cultivada mundialmente (Brasil, 2023). A diferença de 11,8% entre ambas, aliada aos impactos das mudanças climáticas sobre o cultivo da *C. arabica*, sugere um possível protagonismo futuro da *C. canephora* na cafeicultura global. No ciclo 2022/2023, a produção mundial de café foi estimada em 168,2 milhões de sacas de 60 kg, das quais 74,2 milhões corresponderam à *C. canephora* e 94,0 milhões à *C. arabica* (ICO, 2023). No Brasil, a produção no mesmo período totalizou 55 milhões de sacas, sendo 16 milhões de *C. canephora* e 38 milhões de *C. arabica* (Brasil, 2023), posicionando o país como o segundo maior produtor mundial de *C. canephora*. Em 2023, as exportações brasileiras dessa espécie registraram crescimento de 212%, ultrapassando 4,7 milhões de sacas (Brasil, 2024).

A trajetória da cultura de *Coffea canephora* no Brasil pode ser segmentada em distintas fases de desenvolvimento, expansão e aprimoramento qualitativo, especialmente após um período decisivo de transformações estruturais. Ao longo dos anos, instituições cafeeiras, pesquisadores e produtores têm atuado de forma colaborativa na consolidação da imagem do Brasil como produtor de cafés *C. canephora* de elevada qualidade. Esses esforços têm se concentrado em diferentes frentes, incluindo a seleção genética de genótipos superiores (Ferrão *et al.*, 2021), a adoção de protocolos de manejo otimizados, a realização da colheita seletiva de frutos maduros, o aperfeiçoamento das técnicas de lavagem e secagem (Fioresi *et al.*, 2021) e a utilização de fermentações controladas com culturas starter (Filgueiras *et al.*, 2020; Agnoletti *et al.*, 2022).

O aumento da produção de café nos últimos anos tem resultado em um crescimento proporcional na geração de resíduos ao longo de toda a cadeia produtiva (ICO, 2018). Estima-se que a indústria cafeeira gere, anualmente, aproximadamente 2 bilhões de toneladas de resíduos, configurando-se como um relevante problema

ambiental (Mérida; Huerta; Macías, 2021). Durante o processamento dos frutos para a obtenção dos grãos, cerca de 40 a 45% do volume total do fruto não é aproveitado na produção de café comercial (Arpi *et al.*, 2021).

Ao longo da cadeia produtiva do café, desde a colheita dos grãos até o preparo da bebida, diversos subprodutos são gerados, tais como cascas, polpa e borra de café (Muzaifa *et al.*, 2021). A presença desses resíduos representa não apenas um desafio ambiental, mas também uma oportunidade para agregação de valor e reaproveitamento industrial. Nesse contexto, o café conilon ganha relevância, sobretudo após a introdução do café solúvel, cuja produção demanda matérias-primas com elevado teor de sólidos solúveis, fator que contribuiu para o incremento de seu valor industrial (Mérida; Huerta; Macías, 2021). Durante o processo de produção, estima-se a geração de aproximadamente 480kg de resíduos para cada tonelada de café processado (Santos *et al.*, 2020). Grande parte desses resíduos, entretanto, é descartada de forma inadequada, sendo destinada a aterros sanitários ou utilizada em processos de recuperação energética por queima direta (Franca; Oliveira, 2022). Essa prática evidencia a necessidade de adoção de estratégias mais sustentáveis e integradas para o manejo dos resíduos provenientes da cadeia cafeeira.

2.1.2 *Coffea canephora*

O cafeeiro é um arbusto perene pertencente à família Rubiaceae, adaptado a regiões de clima tropical e subtropical. A produção mundial de café concentra-se predominantemente em duas espécies: *Coffea arabica* (café arábica) e *Coffea canephora* (café conilon ou robusta), sendo esta última reconhecida por sua maior rusticidade e elevado potencial produtivo (Mihai *et al.*, 2024). No Brasil, o cultivo de *C. canephora* ocorre principalmente nos estados do Espírito Santo, Rondônia e Bahia, com destaque para os dois primeiros, que conquistaram indicações geográficas, evidenciando a diversidade genética e sensorial dos cafés ali produzidos (Brasil, 2023). A espécie *Coffea canephora* é composta por dois principais grupos genéticos: conilon e robusta (Mihai *et al.*, 2024). As plantas do grupo conilon apresentam, em geral, porte reduzido, folhas e frutos menores, maior tolerância ao estresse hídrico e menor resistência a pragas e doenças. Em contraste, as plantas do grupo robusta são mais vigorosas, com maior resistência a pragas, porém menor tolerância ao déficit hídrico (Viencz *et al.*, 2023).

A ampla variabilidade genética da espécie *C. canephora*, que inclui conilon, robusta e seus híbridos, reforça sua importância na cafeicultura global. Essas variedades apresentam características específicas que conferem maior resistência e adaptabilidade às diferentes condições edafoclimáticas (Harelimana *et al.*, 2022). Essa diversidade genética é essencial para enfrentar os desafios decorrentes das mudanças climáticas e da incidência de pragas, além de contribuir para a sustentabilidade da produção e para a oferta de cafés com distintos perfis sensoriais (Harelimana *et al.*, 2022).

2.2 Pirólise de materiais lignocelulosicos

A pirólise é um processo de termodegradação da madeira conduzido sob ausência total ou parcial de oxigênio, resultando na formação de três principais produtos: líquido pirolenhoso, gases não-condensáveis e carvão vegetal (Inayat *et al.*, 2022). A degradação térmica promove a ruptura de ligações carbono-carbono e a formação de ligações carbono-oxigênio. Parte da biomassa é convertida em carbono sólido, enquanto outra fração é submetida a processos de oxidação e hidrólise, originando compostos como fenóis, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos, os quais podem interagir e formar moléculas mais complexas, como ésteres (Vilas-Boas *et al*., 2025). Essa transformação termoquímica ocorre em temperaturas compreendidas entre 400 e 1000ºC, faixa esta denominada temperatura de pirólise.

No estágio inicial da pirólise da biomassa, ocorre a secagem do material, com consequente perda de água livre. Em seguida, tem início a denominada frente de pirólise, marcada pela eliminação da “água de constituição” da madeira, por meio de um processo de degradação irreversível que se inicia entre 100 °C e 200°C. Com o aumento da temperatura, o calor é transferido ao interior da madeira por condução e convecção, alcançando progressivamente seu centro. Na faixa de 250°C a 330°C, ocorre a decomposição da hemicelulose. À medida que o calor penetra as camadas internas da biomassa, observa-se a desestruturação de sua conformação original e a formação de uma camada de carvão vegetal, ainda contendo vestígios da zona de pirólise. Entre 330°C e 370°C, verifica-se a degradação térmica da celulose. A etapa final do processo ocorre em temperaturas superiores a 370°C, caracterizando-se pela

predominância da formação de carvão vegetal e pelo início da degradação da lignina (Faleeva; Lavrenov; Zaichenko, 2024).

Durante o processo de pirólise, fatores como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência exercem influência direta sobre a qualidade e as proporções dos produtos obtidos. Temperaturas mais baixas tendem a favorecer o maior rendimento de biochar, ao passo que temperaturas elevadas reduzem esse rendimento e aumentam a geração de gases não condensáveis (Ain *et al.*, 2021; Zhou *et al*., 2024). Taxas de aquecimento rápidas promovem a formação de compostos voláteis, cuja liberação gera elevada pressão interna, resultando na fragmentação da estrutura e no aumento da porosidade do material sólido (Parthasarathy *et al.*, 2023). Tempos de residência reduzidos inibem reações secundárias dos compostos primários, favorecendo, assim, maiores rendimentos de bio-óleo (Santos, 2013). Além dos parâmetros operacionais, a qualidade do carvão vegetal também é influenciada pela espécie vegetal empregada, pelo tamanho das partículas da biomassa e pelo tipo de processo de pirólise adotado (Protásio *et al.*, 2021). Dessa forma, as propriedades físicas e químicas do biochar, que determinam sua qualidade, variam em função da matéria-prima utilizada e das condições do processo térmico.

2.3 Parâmetros das propriedades físico-químicas do biochar para uso no solo

O biochar é um produto resultante da degradação térmica de materiais orgânicos e distingue-se do carvão vegetal por sua aplicabilidade como condicionador de solo (Oyeyiola *et al*., 2024). Pode ser produzido a partir de uma ampla variedade de biomassas com distintas propriedades físico-químicas, tais como resíduos florestais, resíduos orgânicos e resíduos agrícolas (Jafri *et al.*, 2018). O biochar tem se destacado como uma alternativa promissora em função de suas propriedades benéficas, sendo um material rico em carbono, obtido sob condições de baixa disponibilidade de oxigênio (Chen *et al.*, 2022; Igalavithana *et al.*, 2017). Devido ao seu elevado potencial como ferramenta para a gestão sustentável de recursos, é frequentemente denominado "ouro negro".

A composição do biochar varia em função do processo de pirólise ao qual a biomassa é submetida. Tal variação deve-se à decomposição dos constituintes lignocelulósicos da matéria-prima, que ocorre em diferentes faixas de temperatura

conforme sua recalcitrância: a hemicelulose decompõe-se entre 150 e 350°C, a celulose entre 275 e 350°C, e a lignina entre 250 e 500°C. A degradação da celulose e da hemicelulose contribui majoritariamente para a formação de vapores condensáveis e gases não condensáveis. A lignina, por sua vez, em razão de sua estrutura aromática, apresenta maior estabilidade térmica, degradando-se lentamente e resultando em maior rendimento de carvão (Araujo *et al*., 2024). À medida que a temperatura da pirólise se eleva, observa-se um aumento no teor de carbono, atribuído aos processos de polimerização e aromatização, que levam à formação de estruturas de carbono condensado. O aumento no teor de cinzas, por outro lado, decorre da concentração de elementos minerais como Na, Ca, Mg, K e Si, entre outros (Tomczyk *et al.*, 2020). Biomassas com alto teor de lignina, como resíduos de madeira e bagaço de cana-de-açúcar, originam biochars com elevado grau de aromaticidade e, consequentemente, maior tempo de residência no solo (Domingues *et al.*, 2017; Wiljitkosum; Sriburi, 2023), contribuindo para benefícios ambientais como o sequestro de carbono.

Por outro lado, biomassas com elevados teores minerais, como a casca de café, tendem a gerar biochars com alto teor de nutrientes e significativa capacidade de neutralização, apresentando potencial para uso como fertilizantes e condicionadores de solo (Das *et al.*, 2021). Adicionalmente, estudos anteriores indicam que a matéria-prima utilizada e as condições do processo de pirólise são fatores determinantes que influenciam significativamente as propriedades do biochar (WijltkosumI; Sriburi, 2023). Dessa forma, pesquisas voltadas à caracterização de biochars oriundos de diferentes resíduos tornam-se essenciais para o setor, contribuindo para o entendimento e fortalecimento de uma cadeia de comercialização com enfoque industrial.

O biochar é um material rico em carbono, com potencial de aplicação tanto como fonte renovável de energia quanto como aditivo para a melhoria da qualidade do solo (Oyeyiola *et al*., 2024). A incorporação de biochar ao solo tem se mostrado eficaz no aumento da capacidade de retenção hídrica, reduzindo perdas por percolação e evaporação, e, consequentemente, melhorando a eficiência do uso da água (Adhikari *et al.*, 2022). Além disso, o biochar contribui para o sequestro de carbono no solo, reduz as emissões de amônia e dióxido de carbono (Cabeza *et al.*, 2018), diminui a compactação (Shyam *et al.*, 2025), aumenta a disponibilidade de micronutrientes e eleva o pH do solo. Tais melhorias nas propriedades químicas e

físicas do solo favorecem o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular das plantas. Adicionalmente, diversos estudos indicam que o biochar possui elevada capacidade de adsorção de metais pesados e outros contaminantes, configurando-se como ferramenta promissora para a proteção e a gestão ambiental (Do; Nguyen, 2024). Embora seja amplamente utilizado como condicionador de solo, avanços recentes na funcionalização do biochar têm ampliado suas aplicações, incluindo conversão e armazenamento de energia, tratamento de efluentes e remediação ambiental (Feng *et al.*, 2023). Estudos apontam que o biochar ativado é um produto promissor para a purificação eficiente da água, atuando na remoção de impurezas orgânicas e inorgânicas.

3 METODOLOGIA

3.1 Coleta, caracterização da biomassa lignocelulósica e obtenção do biochar

As cascas de café da espécie *Coffea canephora* utilizada nesta pesquisa foi colhida no Sítio Café com Leite, zona rural da região do Oriente, no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil (coordenadas: 20°43'23.6"S 41°23'00.2"W). Após a coleta, a cascas foram submetidas a processos de preparação e caracterização para análise de suas propriedades físicas e químicas. A umidade (base seca) foi determinada de acordo com a metodologia proposta pela norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). A densidade a granel foi obtida conforme descrito na normativa ASTM D5057-17 (ASTM, 2017). Os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo foram analisados seguindo os procedimentos especificados na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021).

Para a produção do biochar, a casca de café foi seca em estufa a 102 ± 3°C por 24 horas, visando à remoção da umidade e evitando qualquer influência no processo de pirólise. A pirólise foi realizada em um reator de leito fixo. Para cada ensaio, 400g de casca de café seca foram inseridas em um reator metálico fechado, posicionado dentro de um forno tipo mufla. O processo ocorreu em atmosfera inerte, sem entrada de gases, com temperaturas finais de 400, 600 e 800°C, temperatura inicial de 30°C, taxa de aquecimento de 5°C.min^{-1} e tempo de permanência de uma hora. Os rendimentos gravimétricos do biochar, do líquido pirolenhoso e dos gases não condensáveis foram quantificados utilizando as Equações 1, 2 e 3.

$$RBIO = \left(\frac{M_{bio}}{m_m}\right) x\ 100 \quad (1)$$

$$RLP = \left(\frac{M_{lp}}{m_m}\right) x\ 100 \quad (2)$$

$$RGNC = 100 - (RBIO + RLP) \quad (3)$$

Em que: $RBIO$ = rendimento do biochar (%); M_{bio} = massa da biochar (g); m_m = massa seca da madeira (g); RLP = rendimento do líquido pirolenhoso (%); M_{lp} = massa do líquido pirolenhoso (g); $RGNC$ = rendimento em gases não-condensáveis (%).

3.2 Caracterização do biochar

Após a produção, o biochar foi analisado quanto à densidade à granel, conforme descrito na normativa D5057-17 (ASTM, 2017). Além disso, a umidade, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo foram quantificados conforme os procedimentos descritos na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). O pH foi determinado utilizando uma proporção de 2:20 (biochar: água destilada). A amostra foi submetida a agitação por 15 minutos a 500 rpm, seguida de um período de repouso de 30 minutos. A medição do pH foi realizada por meio de um sistema de eletrodo, com calibração prévia utilizando soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, conforme adaptações da D1762-84 (ASTM, 2021).

3.3 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). A análise de variância foi conduzida seguindo delineamento inteiramente aleatorizado, com três variáveis respostas relacionadas à temperatura de pirólise (400, 600 e 800°C). Após detecção de diferenças significativas, o modelo de regressão que melhor previu o comportamento dos dados foi ajustado. Todas as análises serão executadas a 95% de probabilidade. Medidas de erro padrão foram fornecidas para melhor compreensão do intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. O software R core Team será utilizada para todas as análises estatísticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das propriedades dos resíduos da casca de café *Coffea canephora*

A Tabela 1 apresenta os dados de umidade e densidade a granel da biomassa *in natura* de casca de *Coffea canephora*.

Tabela 1 – Umidade e densidade a granel da casca de *Coffea canephora in natura.*

Tratamento	Umidade (%)	Densidade a granel ($kg.m^{-3}$)
Casca de café	7,73%	156

Fonte: A autora (2025).

A biomassa *in natura* obteve uma porcentagem média de umidade 7,73%. Esse valor pode ser considerado relativamente baixo quando comparado ao teor de umidade relatado para outras biomassas comumente utilizadas na produção de biochar, que geralmente variam entre 10% e 60% (Awasthi *et al*., 2023; Mohamed *et al*., 2024). Um baixo teor de umidade na biomassa é recomendado para o processo de produção de biochar, uma vez que reduz significativamente a demanda por energia térmica e o tempo necessário para a pirólise, tornando o processo mais viável economicamente em comparação à pirólise de materiais com alto teor de umidade (Tripathi *et al.*, 2016).

A densidade a granel da biomassa *in natura* foi de 156 $kg.m^{-3}$. Os dados foram próximos ao relatado por Winter (2025), onde se avaliou o potencial da espécie cafeeira. A casca de café é caracterizada por sua baixa densidade (Carneiro *et al.*, 2025), impactando no manuseio, carga do reator e eficiência da transferência de calor (Rambhatla *et al.*, 2025). Uma maior densidade a granel possibilita o processamento de um maior volume de biomassa por unidade de espaço, aumentando a eficiência geral do processo de pirólise e diminuindo os custos de transporte e armazenamento (Kan *et al.*, 2016). No entanto, no processo de produção de biochar, é necessário considerar outros fatores, como o teor de carbono e de cinzas, que influenciam diretamente na composição do biochar em macro e micronutrientes e no pH do material.

Os resultados da composição quimica imediata da casca de *Coffea canephora in natura*, estão expostos na Figura 1.

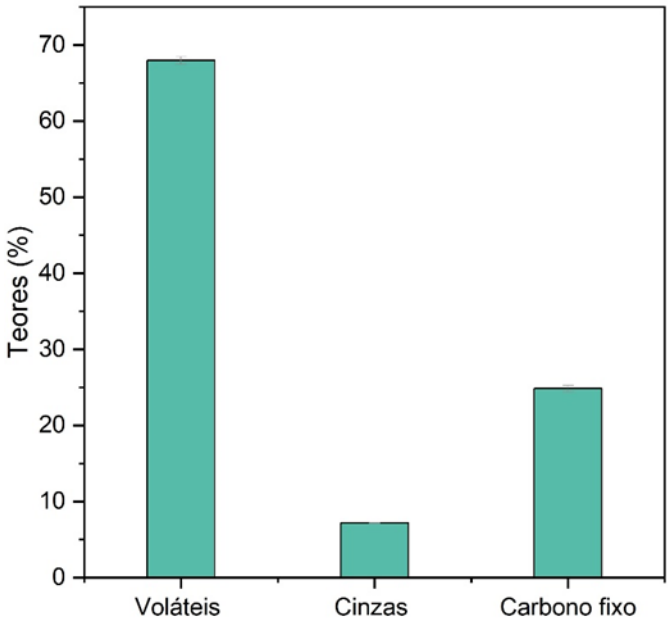

Figura 1 – Composição química imediata da casca de *Coffea canephora.*
Fonte: A autora (2025).

A composição química imediata evidencia que a casca de *Coffea canephora* é majoritariamente constituída por compostos voláteis, os quais representam aproximadamente 68% de sua massa. Esse elevado teor de voláteis indica a presença significativa de compostos orgânicos termicamente instáveis, comumente associados a biomassas lignocelulósicas com altos teores de hemicelulose e celulose, que se decompõem a temperaturas relativamente baixas durante o processo de pirólise (Sayed; Khass; Mostafa, 2024). O carbono fixo corresponde a cerca de 25%, essa é a fração mais estável da biomassa e fundamental para a formação do biochar e para sua estabilidade e permanência no solo (Soriano *et al.*, 2016). A presença de cinzas na biomassa indica a ocorrência de minerais inorgânicos. Dessa forma, as características do material lignocelulósico antes da pirólise possibilitam a previsão de propriedades que serão atribuídas ao biochar após sua produção.

4.2 Rendimento dos produtos e co-produtos da pirólise da casca de *Coffea canephora.*

Os valores observados para o rendimento do biochar oriundo da casca de *Coffea canephora* indicam queda em rendimento de carvão vegetal à medida que se aumenta a temperatura final de pirólise (Figura 2), ocorrendo uma perda de 12,4% entre a temperatura de 400°C a 800°C.

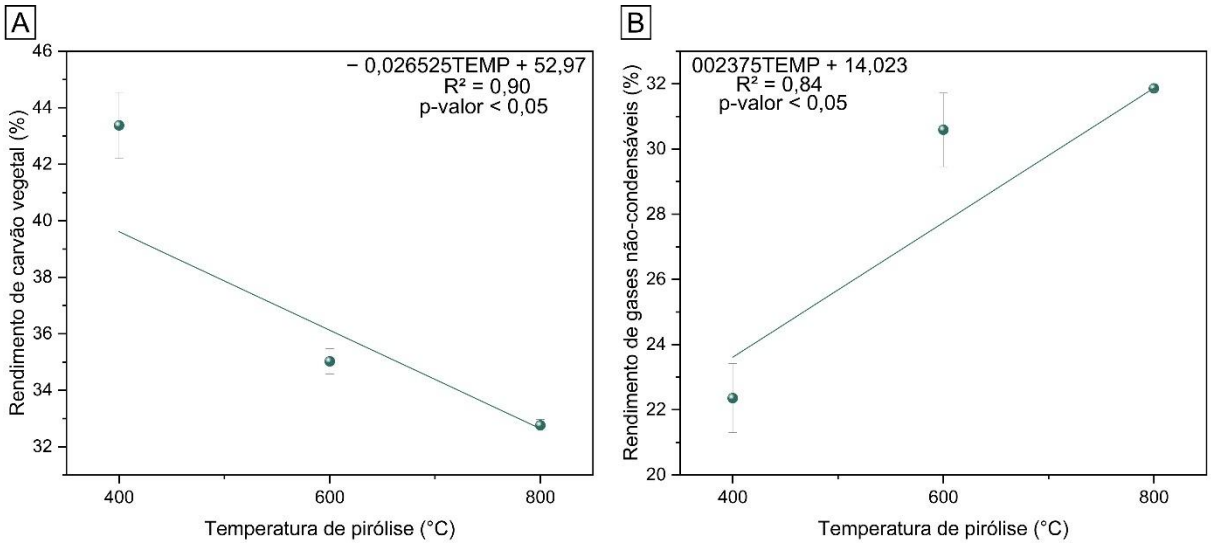

Figura 2 – Rendimentos do produto e co-produto da pirólise da casca de *Coffea canephora*. (A) rendimento de carvão vegetal e (B) rendimento dos gases não-condensáveis.

Fonte: A autora (2025).

A análise estatística revelou ausência de significância para o rendimento em líquido pirolenhoso. Os resultados obtidos para o rendimento em gases não condensáveis indicaram um aumento proporcional com a elevação da temperatura final de pirólise, sendo o maior incremento observado entre a temperatura de 400°C para 600 °C, com acréscimo de 8,11%. A temperatura final de pirólise exerce influência direta sobre o rendimento de biochar (Hu *et al.*, 2022). Esse comportamento pode estar associado tanto à decomposição inicial da biomassa quanto à degradação secundária do próprio biochar, visto que, em temperaturas elevadas, ocorre maior liberação de compostos voláteis, o que contribui para a redução do rendimento em biochar (Guo *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2024). Assim, temperaturas mais baixas de pirólise tendem a favorecer um maior rendimento do biochar produzido.

Rendimentos mais elevados de biochar são considerados desejáveis do ponto de vista econômico, uma vez que proporcionam maior aproveitamento da biomassa utilizada e maior volume de biochar produzido. No entanto, vale destacar que a temperatura de pirólise exerce influência direta não apenas sobre o rendimento, como também na qualidade do biochar produzido (Protásio *et al.*, 2021). Biochars obtidos em temperaturas mais baixas tendem a apresentar maior reatividade com os nutrientes do solo. Por outro lado, biochars oriundos de temperaturas mais elevadas possuem características como maior teor de carbono fixo, menor presença de oxigênio superficial e maior estabilidade no solo (Shoudh *et al.*, 2024). Essas propriedades tendem a transformar o biochar em um material mais eficiente para aplicações a longo prazo, tais como sequestro de carbono, adsorção de contaminantes do solo e correção de pH. Logo, a temperatura final de pirólise aplicada a conversão térmica de materiais lignocelulósicos, como a casca de café, deve considerar um equilíbrio entre rendimento gravimétrico e qualidade físico-química do biochar produzido.

4.3 Caracterização do biochar da casca de *Coffea canephora*

Os valores obtidos para a umidade do carvão vegetal em porcentagem foram: 3,64%, 6,33% e 5,47% para os biochars produzidos em temperaturas de 400, 600 e 800°C, respectivamente. A Figura 3 apresenta os resultados de densidade a granel do biochar obtidos sob diferentes temperaturas de pirólise.

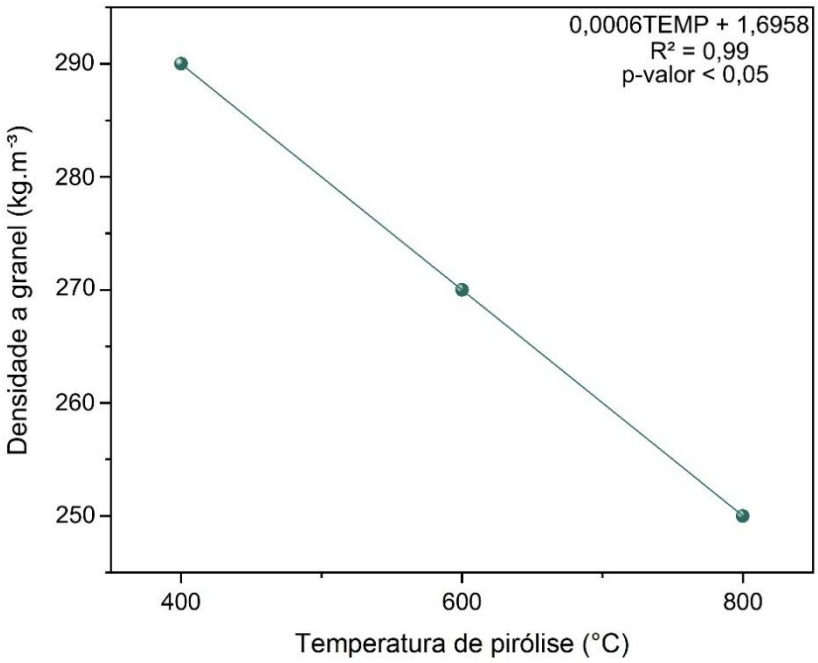

Figura 3 - Densidade a granel do biochar oriundo da casca de *Coffea canephora* sob diferentes temperaturas de pirólise.

Fonte: A autora (2025).

Os resultados obtidos para a densidade a granel do biochar produzido a partir da casca de café indicam uma redução à medida que se eleva a temperatura final de pirólise, entre as temperaturas de 400°C a 800°C. Esse comportamento está associado à perda de massa decorrente da liberação de compostos voláteis (Dias Júnior *et al.*, 2021), que, com o aumento da temperatura, resulta na diminuição das dimensões volumétricas do biochar. A densidade do biochar exerce influência direta sobre sua estabilidade no solo, uma vez que afeta tanto sua resistência à degradação quanto sua permanência em suas camadas superficiais. Biochars com menor densidade tendem a apresentar maior porosidade, o que favorece a retenção de água no solo (Razzaghi *et al.*, 2020). Segundo os mesmos autores, essa mesma característica pode tornar o material mais suscetível à perda por ação de agentes externos, como vento e escoamento superficial. Quando removido em grandes quantidades, o biochar deixa de exercer suas funções como condicionador de solo e representa, adicionalmente, uma perda econômica para os produtores rurais. Observou-se uma redução progressiva no teor de voláteis com o aumento da temperatura de pirólise (Figura 4). Os valores decresceram de aproximadamente 25% a 10%, da temperatura de 400°C para 800°C, respectivamente.

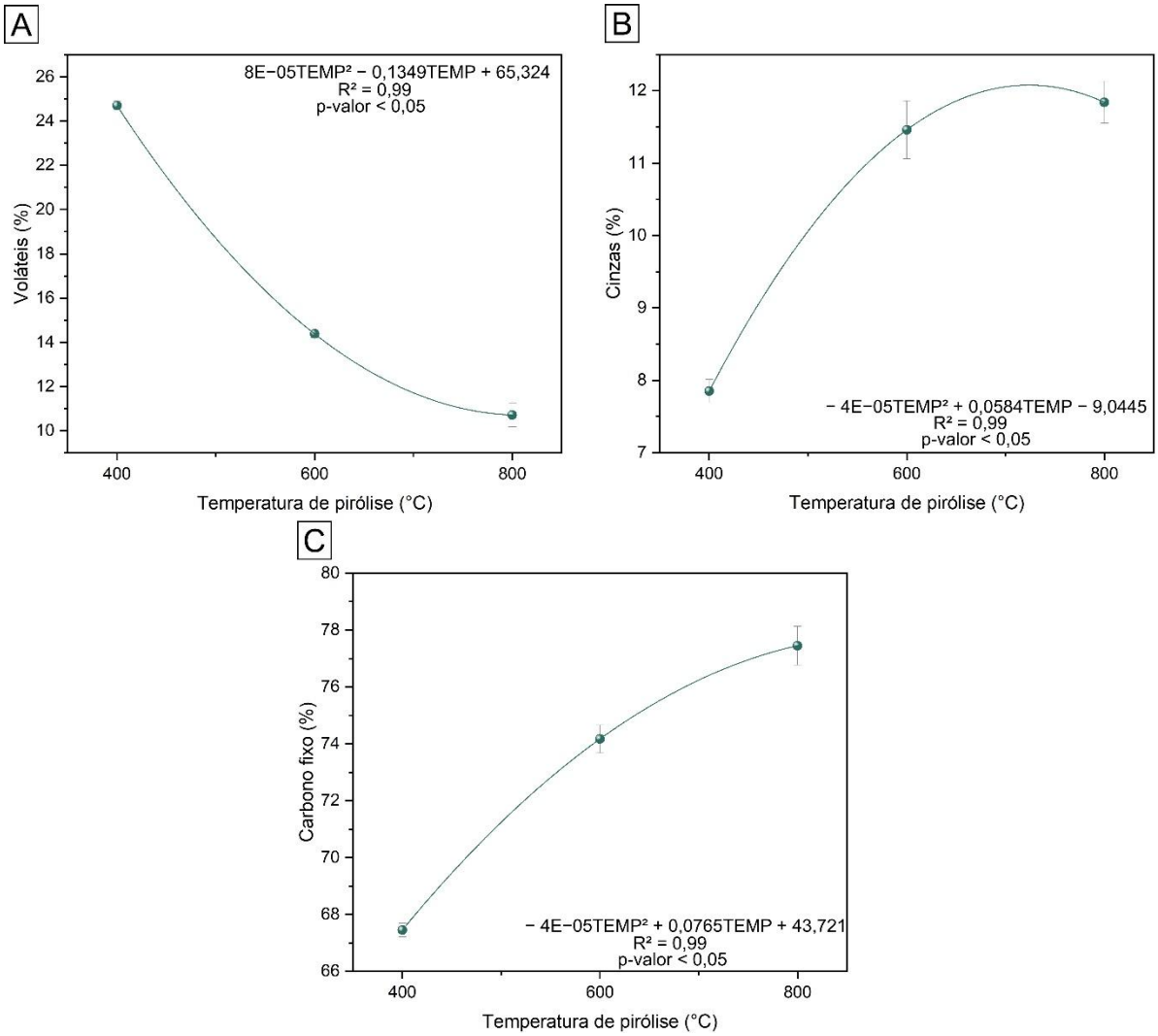

Figura 4 – Composição química imediata do biochar oriundo da casca de *Coffea canephora* sob diferentes temperaturas de pirólise. Em que: (A) teor de materiais voláteis B) teor de cinzas C) teor de carbono fixo.

Fonte: A autora (2025).

A temperatura de pirólise influencia diretamente a estrutura do biochar em função da liberação de compostos voláteis e da formação e volatilização de materiais parcialmente fundidos (Shaaban *et al.*, 2014). A hemicelulose, que é a parte mais frágil, se decompõe primeiro, entre 220°C e 300°C, seguida pela celulose, que começa a se degradar entre 300°C e 340°C. Já a lignina é mais resistente e se quebra lentamente em uma faixa mais ampla, que pode chegar até 900°C (El-Sayed *et al.*, 2023). Em temperaturas mais baixas, apenas algumas ligações e grupos químicos da lignina se rompem, enquanto a celulose permanece praticamente intacta. Quando a temperatura sobe, as ligações da celulose se quebram rapidamente, liberando gases e vapores (Liu *et al.*, 2025). Esse processo também remove oxigênio da estrutura,

aumenta a quantidade de carbono e deixa o material mais estável, formando um biochar mais resistente à degradação.

O conteúdo de material volátil pode afetar o desenvolvimento das plantas de duas formas: compostos tóxicos, como fenóis, podem inibir o crescimento radicular, enquanto oligossacarídeos formados nas fases iniciais da pirólise podem atuar como fonte de carbono de fácil assimilação para a atividade microbiana do solo (Zhou *et al*., 2024). Teores mais elevados de materiais voláteis favorecem a respiração do solo, proporcionando melhores condições para o crescimento das raízes e para a atividade microbiana (Maaz; Hockaday; Deenik, 2021). O teor de cinzas apresentou comportamento crescente até 600 °C, com leve redução ou estabilização entre 600°C e 800°C. Os valores variaram de aproximadamente 8% a pouco acima de 12%, seguido por uma leve queda em 800°C. Adicionalmente, as cinzas presentes no biochar podem contribuir para o fornecimento de nutrientes inorgânicos, auxiliam na estabilidade microbiana e influenciam diretamente o pH do biochar (Wang *et al.*, 2020).

O teor de carbono fixo aumentou com a elevação da temperatura de pirólise, partindo de cerca de 67% em 400°C e alcançando aproximadamente 77% em 800°C. O aumento do teor de carbono com a elevação da temperatura de pirólise está associado a um maior grau de polimerização da biomassa carbonizada (Domingues *et al.*, 2017). Além disso, teores elevados de carbono indicam que os biochars provavelmente ainda retêm certa quantidade de resíduos vegetais orgânicos remanescentes, como a celulose (Malik; Laura, 2025). Biochars com alto teor de carbono fixo promovem a formação de macroagregados e aumentam a retenção de água, particularmente em solos arenosos (Cong *et al.*, 2023). Os valores obtidos para a análise de pH do biochar indicam redução no pH à medida que se eleva a temperatura final de pirólise de 400°C para 600°C, seguido de acréscimo quando passamos a temperatura do processo de 600°C para 800°C (Figura 5).

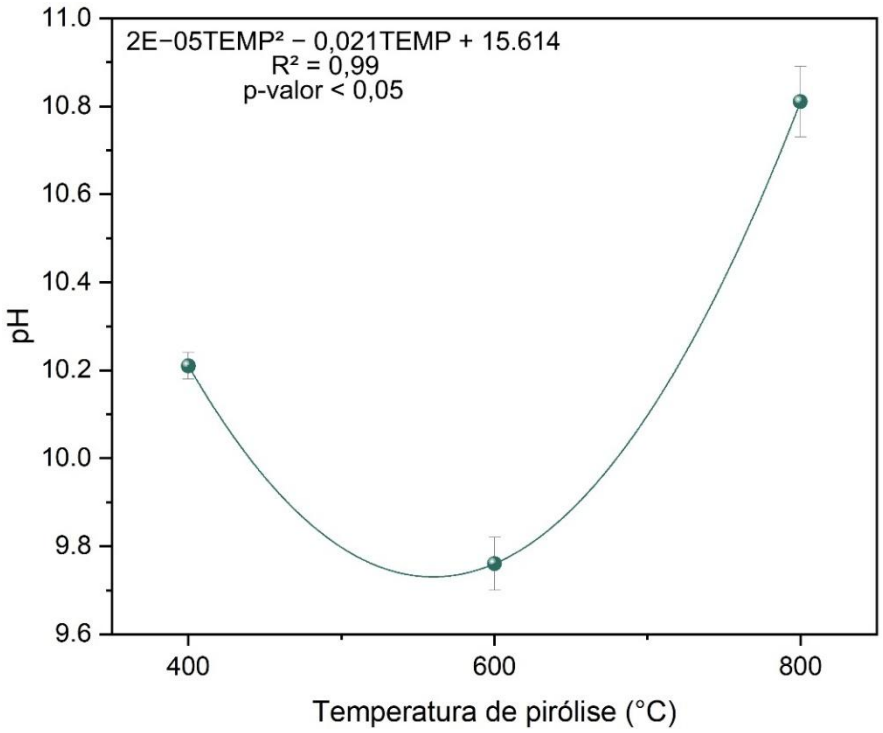

Figura 5 – Análise de pH do biochar oriundo da casca de *Coffea canephora* sob diferentes temperaturas de pirólise.

Fonte: A autora (2025).

O aumento do pH com a elevação da temperatura de pirólise tem sido associado ao incremento no teor de cinzas e à modificação dos grupos funcionais oxigenados formados durante o processo (Zhao *et al.*, 2017). Esse aumento ocorre, principalmente, em razão da liberação de sais alcalinos presentes nos materiais orgânicos, promovida pelo aumento da temperatura (Ding *et al.*, 2014). Acima de 300°C, esses sais começam a se dissociar da matriz orgânica, contribuindo para a elevação do pH do biochar. Em contrapartida, a decomposição da celulose e das hemiceluloses, que ocorre entre 200°C e 300°C, gera ácidos orgânicos e compostos fenólicos, os quais tendem a reduzir o pH dos produtos pirolíticos (Yu *et al.*, 2014). O pH do biochar tende a se estabilizar em torno de 600°C, momento em que os sais alcalinos são completamente liberados da estrutura carbonizada (Shinogi; Kanri, 2003). A aplicação de biochars com pH mais elevado pode contribuir significativamente para a correção da acidez dos solos, além de favorecer o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC). Adicionalmente, o pH do biochar influencia a interação com fertilizantes e compostos orgânicos, podendo acelerar a decomposição e estabilização da matéria orgânica, especialmente quando são utilizados biochars com caráter alcalino.

Diante dos resultados obtidos, destaca-se que o biochar produzido a partir da casca de *Coffea canephora* em temperatura de 800°C apresenta maior teor de carbono fixo e pH mais elevado, características que conferem elevada estabilidade no solo e potencial para correção da acidez, favorecendo a capacidade de troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes. Esse material é indicado para aplicações de longo prazo, como sequestro de carbono e melhoria de solos ácidos. Por outro lado, o biochar produzido a temperaturas mais baixas, como 400°C, contém maior teor de compostos voláteis e densidade mais elevada, aumentando a retenção de água e favorecendo a atividade microbiana, o que o torna mais adequado para sistemas agrícolas que demandam resposta rápida em fertilidade e estímulo biológico. Assim, a escolha da temperatura de pirólise deve ser orientada pelo objetivo agronômico ou ambiental desejado, permitindo alinhar a produção do biochar às necessidades específicas do solo, potencializando seus benefícios e garantindo maior eficiência de uso.

Diversos estudos têm destacado a importância de alinhar as propriedades do biochar às características específicas do solo para potencializar seus efeitos. Biochars produzidos em temperaturas mais baixas, por apresentarem maior teor de compostos voláteis e maior densidade, favorecem a retenção de umidade e a atividade microbiana, sendo recomendados para solos arenosos ou de baixa fertilidade, que demandam resposta imediata em termos de disponibilidade de nutrientes (Ameloot *et al*., 2013; Lima *et al*., 2019; Li *et al*., 2022). Por outro lado, materiais obtidos em temperaturas mais elevadas, com maior teor de carbono fixo e pH alcalino, apresentam maior estabilidade estrutural e maior capacidade de corrigir a acidez, sendo mais indicados para solos intemperizados e ácidos (Zhou *et al*., 2024). Dessa forma, os resultados do presente estudo não apenas corroboram a literatura existente, mas também reforçam o potencial do biochar da casca de *Coffea canephora* como ferramenta de manejo sustentável, capaz de ser direcionada conforme as necessidades específicas do ambiente agrícola.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a temperatura final de pirólise influenciou de as propriedades físico-químicas do biochar de casca de *Coffea canephora*. À medida que a temperatura aumentou, observou-se redução no rendimento gravimétrico e na densidade a granel, acompanhada pelo aumento do teor de carbono fixo e alterações no pH. O biochar produzido a 400°C apresentou maior densidade e teores mais elevados de materiais voláteis, parâmetros que podem favorecer a retenção de água e a liberação mais rápida de nutrientes, sendo recomendado para solos arenosos ou de baixa fertilidade, que demandam melhoria imediata da capacidade produtiva. O material obtido a 600 °C apresentou equilíbrio entre teor de cinzas, carbono fixo e pH, que pode fornecer nutrientes minerais e estabilidade moderada, indicado para solos de textura média, onde é necessário conciliar nutrição e manutenção de umidade. Já o biochar gerado a 800°C apresentou maior teor de carbono fixo e pH mais alcalino, sendo ideal para solos ácidos ou fortemente intemperizados, atuando na correção da acidez, no aumento da CTC e no sequestro de carbono a longo prazo. A casca de café é um resíduo abundante e nutritivo, com grande potencial para produção de biochar e uso agrícola. Embora todas as temperaturas sejam viáveis, a pirólise a 800°C é a mais recomendada para uso em solos tropicais ácidos e aplicações de longo prazo.

6 REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S.; TIMMS, W.; MAHMUD, M. P. Optimising water holding capacity and hydrophobicity of biochar for soil amendment – A review. **Science of the Total Environment**, v. 851, n. 1, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158043

AIN, Q. U.; SHAFIQ, M.; CAPAREDA, S. C.; BAREEN, F. Effect of different temperatures on the properties of pyrolysis products of *Parthenium hysterophorus*. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 25, n. 3, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101197

AMELOOT, N.; NEVE, S.; JEGAJEEVAGAN, K.; YILDIZ, G.; BUCHAN, D.; FUNKUIN, Y. N.; PRINS, W.; BOUCKAERT, L.; SLEUTEL, S. Short-term CO_2 and N_2O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, p. 401–410, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.025

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **D5057-17. Standard Test Method for Screening Apparent Specific Gravity and Bulk Density of Waste**. Philadelphia, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84: standard method for chemical analyses of wood charcoal**. Philadelphia, 2007.

ARAUJO, R. O.; ANJOS, O. C.; SOUZA, L. K.C.; BATAGLION, G. A. Biochar from lignocellulosic biomass: a sustainable circular economy approach for removing organic and inorganic contaminants. **Química Nova**, v. 47, n. 10, p. 1-12, 2024. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240079

ARPI, N.; MUZAIFA, M.; SULAIMAN, M.; ANDINI, R.; KESUMA, S. Chemical characteristics of cascara, coffee cherry tea, made of various coffee pulp treatments. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 709, n. 1. 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/709/1/012030

AWASTHI, M. K.; SAR, T.; GOWD, S. C.; RAJENDRAN, K.; KUMAR, V.; SARSAIYA, S.; LI, Y.; SINDHU, R.; BINOD, P.; ZHANG, Z.; PANDEY, A.; TAHERZADEH, M. J. A comprehensive review on thermochemical, and biochemical conversion methods of lignocellulosic biomass into valuable end product. **Fuel**, v. 342, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127790

BEDNIK, M.; JURASZEK, A. M.; PIASECKA, I. C. Effect of six different feedstocks on biochar's properties and expected stability. **Agronomy**, v. 12, n. 7, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12071525

BOSCHIERO, B. N**. Quais são os 5 maiores produtores de café do mundo? Brasil se destaca**. Blog Agroadvance**,** 1 dez. 2023. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-5-maiores-produtores-de-cafe-do-mundo/. Acesso em: 12 ago. 2025.

BRASIL. **Acompanhamento da safra brasileira de café – safra 2023 – quarto levantamento. Brasília: CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, 2023**. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/. Acesso em: 5 jun. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União: seção 1, extra, p. 2, 12 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20192022/2022/Decreto/D10936.htm#art91 . Acesso em: 24 mai. 2025.

BRASIL. **Lei nº. 12.305**. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Normas técnicas específicas para a produção integrada de café.** Brasília: MAPA, [2010?]. PDF. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-o-maior-produtor-mundial-e-o-segundo-maior-consumidor-de-cafe. Acesso em: 5 abr. 2025.

BRASIL. **Relatório mensal de exportações – dezembro de 2023. CECAFÉ – Conselho dos Exportadores de Café do Brasil, 2024**. Disponível em: https://www.cecafe.com.br/publicacoes/relatorio-de-exportacoes/. Acesso em: 5 jun. 2025.

CABEZA, I.; WATERHOUSE, T.; SOHI, S.; ROOKE, J. A. Effect of biochar produced from different biomass sources and at different process temperatures on methane production and ammonia concentrations *in vitro*. **Animal Feed Science and Technology**, v. 237, p. 1–7, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.01.003

CARNEIRO, A. C. O.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; JORGE, J. A. C. G.; SANTOS, R. J. C.; DEMUNER, I. F.; PERES, L. C.; WINTER, S. G.; CASTRO, V. R.; VIEIRA, M. B.; ARAÚJO, S. O. Sustainable Production of Coffee Husk Pellets: Applying Circular Economy in Waste Management and Renewable Energy Production. **Resources**, v. 14, n. 2, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/resources14020026

CHEN, H.; GAO, Y.; LI, J.; FANG, Z.; BOLAN, N.; BHATNAGAR, A.; GAO, B.; HOU, D.; WANG, S.; SONG, H.; YANG, X.; SHAHEEN, S. M.; MENG, J.; CHEN, W.; RINKLEBE, J.; WANG, H. Engineered biochar for environmental decontamination in aquatic and soil systems: a review. **Carbon Research**, v. 1, n. 4, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s44246-022-00005-5

CONG, M.; HU, Y.; SUN, X.; YAN, H.; YU, G.; TANG, G.; CHEN, S.; XU, W.; JIA, H. Long-term effects of biochar application on soil properties and plant growth in a temperate maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1172425

DAS, S. K.; GHOSH, G. K.; AVASTHE, R. K.; SINHA, K. Compositional heterogeneity of different biochar: effect of pyrolysis temperature and feedstocks. **Journal of Environmental Management**, v. 278, v. 2, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111501

DATAGRO. **World *coffee* production grew by 5.82% in 2024**. Datagro, 2025. Disponível em: <https://portal.datagro.com/en/3/coffee/927739/world-coffee-production-grew-by-582-in->. Acesso em: 28 ago. 2025.

DIAS JÚNIOR, A. F.; SUUCHI, M. A.; SANT'ANNA, A. N.; SILVA, J. G. M.; SILVA, A. M.; SOUZA, N.; D.; PROTASIO, T. P.; BRITO, J. O. Blends of charcoal fines and wood improve the combustibility and quality of the solid biofuels. **Bioenergy Research**. v. 14, p. 344-354, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s12155-020-10179-8

DING, W.; DONG, X.; IME, I. M.; GAO, B.; MA, L. Q. Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars. **Chemosphere**, v. 105, p. 68–74, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.042

DO, P. T. M.; NGUYEN, L. X. A review of thermochemical decomposition techniques for biochar production. **Environment, Development and Sustainability**, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-024-05841-6

DOMINGUES, R. R.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, C. A.; MELO, I. C. N. A.; MELO, L. C. A.; MAGRIOTIS, Z. M.; MONEDERO, M. A. S. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos One**, v. 12, n. 5, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884

FALEEVA, Y. M.; LAVRENOV, V. A.; ZAICHENKO, V. M. Investigation of plant biomass two-stage pyrolysis based on three major components: cellulose, hemicellulose, and lignina. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, p. 14519–14529, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-022-03385-1

FENG, Y; JIAN, J.; XU, Y.; WANG, S.; AN, W.; CHAI, Q.; PROVA, U. H.; WANG, C.; HUANG, G. Biomass derived diverse carbon nanostructure for electrocatalysis, energy conversion and storage. **Carbon**, v. 211, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118105

FERRÃO, M. A. G.; MENDONÇA, R. F.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, R. G.; SENRA, J. F. B.; VOLPI, P. S.; FILHO, A. C. V.; COMÉRIO, M. Characterization and genetic diversity of *Coffea canephora* accessions in a germplasm bank in Espírito Santo, Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 21, n. 2, p. 1–10, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1984-70332021v21n2a32

FIORESI, D. B.; PEREIRA, L. L.; OLIVEIRA, E. C. S.; MOREIRA, T. R.; RAMOS, A. C. Mid infrared spectroscopy for comparative analysis of fermented arabica and robusta coffee. **Food Control**, v. 121, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107625

FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Potential uses of spent coffee grounds in the food industry. **Foods**, v. 11, n. 14, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/foods11142064

HARELIMANA, A.; RUKAZAMBUGA, D.; HANCE, T. Pests and diseases regulation in coffee agroecosystems by management systems and resistance in changing climate conditions: a review. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 129, p. 1041–1052, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s41348-022-00628-1

HERRERA, S. G. **Remoção de íons cromo de soluções aquosas por biochar produzido de casca de café**. 2021. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Sorocaba, Sorocaba, 2021.

HU, S.; CHENGB, J.; WANG, W. P.; ZHU, Y. H.; KANG, K.; ZHU, M. Q.; HUANG, X. H. Preparation and analysis of pyroligneous liquor charcoal and gas from lacquer wood by carbonization method based on a biorefinery process. **Energy**, v. 239, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121918

IGALAVITHANA, A. D.; MANDAL, S.; NIAZI, N. K.; VITHANAGE, M.; PARIKH, S. J.; MUKOME, F. N. D.; RIZWAN, M.; OLESZCZUK, P.; AL-WABEL, M.; BOLAN, N.; TSANG, D. C. W.; KIM, K. H.; OK, Y. S. Advances and future directions of biochar characterization methods and applications. **Critical reviews in environmental science and technology**, v. 47, n. 23, p. 2275-2330, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1421844

INAYA, A.; AHMED, A.; TARIQ, R.; WARIS, A.; JAMIL, F.; AHMED, S. F.; GHENAI, C.; PARK, Y. K. Techno-Economical evaluation of bio-oil production via biomass fast pyrolysis process: A review. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2021.770355

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). **Cafeicultura do conilon no Espírito Santo**. Vitória, 2024. Disponível em: <https://incaper.es.gov.br/cafeicultura-conilon>. Acesso em: 28 ago. 2025.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. ***Coffee Report and Outlook*. Londres: ICO, abr. 2023**. Disponível em: https://icocoffee.org/documents/cy2023-24/Coffee_Report_and_Outlook_December_2023_ICO.pdf. Acesso em: 5 jun. 2025.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **Total production by all exporting countries**. Disponível em: http://www.ico.org/prices/po-production.pdf. Acesso em: 25 maio 2025.

JAFRI, N.; WONG, W. Y.; DOSHI, V.; YOON, L. W.; CHEAH, K. H. A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 118, p. 152–166, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.036

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 57, p. 1126-1140, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: an introduction**. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). Biochar for environmental management: science and technology. New York: Earthscan. v. 53, p. 1–9, 2009.

LI, L.; LONG, A.; FOSSUM, B.; KAISER, M. Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: A

meta-analysis. **Soil Use and Management**, v. 39, n. 1, p. 43-52, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12848

LIMA, J. R. S.; OLIVEIRA, J. E. S.; MOURA, A. S.; SILVA, C. F.; MEDEIROS, E. V.; HAMMECKER, C. Produção e eficiência no uso de água do feijão comum adubado com biochar. **Diversitas Journal**, v. 4, n. 3, p. 1146-1155, 2019. DOI: https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v4i3.837

MAAZ, T. M.; HOCKADAY, W. C.; DEENIK, J, L. Biochar volatile matter and feedstock effects on soil nitrogen mineralization and soil fungal colonization. **Sustainability**, v. 4, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13042018

MALIK, S.; LAURA, J. S. Evaluating biochar properties derived from various agro-residues via pyrolysis: A comparative study. **Oriental Journal of Chemistry**, v. 41, n. 1, 2025. DOI: http://dx.doi.org/10.13005/ojc/410113

MÉRIDA, V. A. M.; HUERTA, B. E. B.; MACÍAS, P. G. Chapter 9 - Coffee waste: a source of valuable technologies for sustainable development. **Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products**, p. 173-198, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824044-1.00009-X

MIHAI, R. A.; PILLAJO, D. C. O.; PROAÑO, K. M. I.; PULLOTASIG, M. Y. V.; TOLAGASÍ, L. A. S.; LEDESMA, M. L. V.; HERAS, E. J. M.; INSUASTE, N. S. C.; CATANA, R. D. Comprehensive assessment of *Coffee Varieties* (*Coffea arabica* L.; *Coffea canephora* L.) from Coastal, Andean, and Amazonian Regions of Ecuador; A Holistic Evaluation of Metabolism, Antioxidant Capacity and Sensory Attributes. **Horticulturae**, v. 10, n. 3, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae10030200

MOHAMED, B. A.; RUAN, R.; BILAL, M.; PERIYASAMY, S.; AWASTHI, M. K.; RAJAMOHAN, N.; LENG, L. Sewage sludge co-pyrolysis with agricultural/forest residues: A comparative life-cycle assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 192, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114168

MUZAIFA, M.; ANDINI, R.; SULAIMAN, M. I.; ABUBAKAR, Y.; RAHMI, F.; NURZAINURA. Novel utilization of coffee processing by-products: kombucha cascara originated from ‘Gayo-Arabica’. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 644, n. 1, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/644/1/012048

NUNES, E. C.; SILVEIRA, M. A. N**. Estudo do aproveitamento da palha de café como combustível nos fornos de secagem**. 2004. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2004.

OYEYIOLA, Y. B.; EWETOLA, E. A.; KOLAWOLE, G. O.; LAWAL, B. A. Comparative efficacy of biochar vs. cooking charcoal in urea-based soil fertility management: impacts on soil quality, nutrient retention, and maize performance. **Discover Soil**, v. 1, n. 17, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s44378-024-00016-1

PARTHASARATHY, P.; AL-ANSARI, T.; MACKEY, H. R.; MCKAY, G. Effect of heating rate on the pyrolysis of camel manure. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 6023-6035, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-021-01531-9

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057

RAMBHATLA, N.; PANICKER, T. F.; MISHRA, R. K.; MANJESHWAR, S. K.; SHARMA, A. Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. **Results in Engineering**, v. 25, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103679

RAZZAGHI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, v. 361, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055

SANTOS, N. A. V. **Pirólise rápida de coprodutos do processo produtivo do biodiesel: efeito das condições de pirólise e caracterização dos produtos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SANTOS, S. T. O.; JÚNIOR, C. M. V.; SILVA, A. N.; NASCIMENTO JÚNIOR, A. F.; DRUMMOND, A. R. F.; SILVA, S. P. R. Potencial energético do biocarvão de pirólise a partir da borra de café. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 48662–48670, 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-492

SAYED, S. A. E.; KHASS, T. M.; MOSTAFA, M. E. Thermal degradation dehaviour and chemical kinetic characteristics of biomass pyrolysis using TG/DTG/DTA techniques. **Biomass Conversion and Biorefinery**. v. 14, p. 17779-17803, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-023-03926-2

SHAABAN, A.; SE, S. M.; DIMIN, M. F.; JUOI, J. M.; HUSIN, M. H.; MITAN, N. M. M. Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 107, p. 31–39, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.01.021

SHINOGI, Y.; KANRI, Y. Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of the pyrolytic products. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 3, p. 241–247, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00147-0

SHOUDH, K. N.; KHAN, T. H.; ARA, U. R.; KHAN, M. R.; SHAWON, Z. B. Z.; HOQUE, M. E. Biochar in global carbon cycle: Towards sustainable development goals. **Current Research in Green and Sustainable Chermistry**, v. 8, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100409

SHYAM, S.; AHMED, S.; JOSHI, S. J.; SARMA, H. Biochar as a Soil amendment: implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. **Discover Soil**, v. 2, n. 18, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s44378-025-00041-8

SORIANO, M. C. H.; KERRÉ, B.; KOPITTKE, P. M.; HOREMANS, B.; SMOLDERS, E. Biochar affects carbon composition and stability in soil: a combined spectroscopy-microscopy study. **Scientific Reports**, v. 6, 2016.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, p. 191–215, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467–481, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). ***Coffee* Annual Report – Brazil. 2024**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee+Annual_Brasilia_Brazil_BR2024-0012.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2025.

VIENCZ, T.; ACRE, L. B.; ROCHA, R. B.; ALVES, E. A.; RAMALHO, A. R.; BENASSI, M. T. Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids, melanoidins, and diterpenes contents of *Coffea canephora* coffees produced in the Amazon. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 117, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105140

VILAS-BOAS, A. C. M.; TARELHO, L. A. C.; MOURA, J. M. O.; GOMES, H. G. M. F.; MARQUES, C. C.; PIO, D. T.; NUNES, M. I. S.; SILVESTRE, A. J. D. Methodologies for bio-oil characterization from biomass pyrolysis: A review focused on GC-MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 185, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106850

WANG, W.; ZHAO, L.; CAO, X. The microorganism and biochar-augmented bioreactive top-layer soil for degradation removal of 2,4-dichlorophenol from surface runoff. **Science of the Total Environment**, v. 733, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139244

WINTER, S. G. **Caracterização e avaliação do potencial de uso dos resíduos da cafeicultura na produção de biocombustíveis sólidos**. 2025. 46 f. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

YU, H.; ZHANG, Z.; LI, Z.; CHEN, D. Characteristic of tar formation during cellulose, hemicellulose and lignin gasification. **Fuel**, v. 118, p. 250–256, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.080

ZHAO, S. X.; TA, N.; WANG, X. D. Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. **Energies**, v. 10, n. 9, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/en10091293

ZHOU, Z.; GUO, J.; LIU, H.; WANG, J.; WANG, Y. Effects of biochar pyrolysis temperature and application rate on saline soil quality and maize yield. **Agronomy**, v. 14, n. 7, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14071529