CARACTERIZAÇÃO DA PALHA DE COFFEA CANEPHORA VISANDO APLICAÇÕES TERMOQUÍMICAS

Bruno Fonseca Coelho, Grasielle Ferreira dos Santos, Paula Gomes Siqueira, Rosineia Faria de Oliveira Freitas, Josinaldo de Oliveira Dias

Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/n, Guararema - 2500-000 - Alegre-ES, Brasil, brufon2323@gmail.com, grasielle.santos@edu.ufes.br, paula.siqueira@edu.ufes.br, rosineiafoliveira@yahoo.com.br, josinaldo.dias@ufes.br

Resumo

A produção de café gera grandes quantidades de resíduos agroindustriais, tornando necessário buscar alternativas para seu aproveitamento. Este trabalho objetivou caracterizar a palha de *Coffea canephora* para subsidiar a avaliação de aplicações termoquímicas. Foram realizadas análises imediata e elementar, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise termogravimétrica (TG). A biomassa apresentou predominância de matéria volátil 77,49%, seguida por carbono fixo 16,18% e cinzas 6,33%, enquanto a elementar apresentou maior participação de carbono e oxigênio, com razões H/C e O/C de 1,65 e 0,70. O FTIR identificou bandas características de materiais lignocelulósicos, associadas aos grupos O–H, C–H e C–O e a estruturas aromáticas. A TG evidenciou três etapas de perda de massa, sendo a secagem, entre 50 e 150 °C, devolatilização, entre 150 e 425 °C, com pico em 305 °C e degradação, entre 425 e 900 °C. Os resultados demonstraram que a palha de café apresenta características compatíveis com processos termoquímicos, evidenciando seu potencial como matéria-prima para valorização de resíduos agroindustriais.

Palavras-chave: Palha de café. Biomassa lignocelulósica. Pirólise.

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Química

Introdução

A produção de café no Brasil possui grande relevância econômica, e sua produção em larga escala gera volumes expressivos de resíduos agroindustriais. Entre esses resíduos, destaca-se a palha de café, que pode representar uma parcela considerável do processamento, reforçando a necessidade de buscar alternativas para seu aproveitamento (Veiga et al., 2017). A utilização desses resíduos pode contribuir para reduzir o desperdício e agregar valor à cadeia produtiva do café (Silva et al., 2022). Esse potencial de aproveitamento está diretamente relacionado à composição química da palha de café, caracterizada como uma biomassa lignocelulósica. Nguyen et al. (2023) identificaram celulose, hemicelulose e lignina em resíduos do processamento do café, constituintes estruturais também observados por Veiga et al. (2017) em biomassas vegetais, incluindo a casca de café, reforçando o potencial desse material para diferentes rotas de conversão.

Entre as possibilidades de aproveitamento, destacam-se as rotas termoquímicas, que promovem a conversão da biomassa por meio de processos conduzidos em temperaturas elevadas (Setter; Oliveira, 2022). Silva et al. (2022), ao avaliarem biomassa proveniente do café em processo de pirólise, destacaram essa rota como uma alternativa para o aproveitamento e a valorização desses resíduos. Vivas et al. (2025), ao caracterizarem física e quimicamente a casca de café, também evidenciaram etapas distintas de decomposição térmica relacionadas aos constituintes estruturais da biomassa. Na pirólise, a biomassa é submetida à degradação térmica em condições de ausência de oxigênio, podendo resultar na formação de produtos sólidos, líquidos e gasosos, cujo rendimento e qualidade estão relacionados às características da matéria-prima empregada (Setter et al., 2020; Silva et al., 2022).

Nesse contexto, as propriedades físico-químicas da biomassa exercem influência sobre seu comportamento durante a conversão termoquímica, tornando sua caracterização uma etapa importante para compreender o potencial de aplicação do material (Setter et al., 2020; Setter; Oliveira, 2022). A análise imediata permite determinar os teores de umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas, enquanto a análise elementar fornece informações sobre a composição em carbono, hidrogênio,

nitrogênio e oxigênio (Veiga et al., 2017; Vivas et al., 2025). De forma complementar, a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) permite identificar grupos funcionais presentes na biomassa (Setter et al., 2020), enquanto a análise termogravimétrica (TG) possibilita avaliar a perda de massa e as diferentes etapas de decomposição em função da temperatura (Vivas et al., 2025).

Dessa forma, a caracterização da palha de café pode fornecer informações relevantes sobre sua composição, estrutura química e comportamento térmico, contribuindo para avaliar possibilidades de valorização desse resíduo agroindustrial. Assim, este trabalho tem como objetivo caracterizar a palha de *Coffea canephora* por meio das análises imediata, elementar, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise termogravimétrica (TG), buscando identificar características relevantes para avaliar seu potencial como matéria-prima em aplicações termoquímicas.

Metodologia

A palha de café da espécie *Coffea canephora* foi obtida do processamento pós-colheita dos grãos de café. Após a coleta da biomassa, o material foi acondicionado em sacos plásticos hermeticamente fechados e mantido à temperatura ambiente para ser submetido às análises físico-químicas como análise imediata, análise elementar, FTIR e análise termogravimétrica (TG). A Setter e Oliveira 2022) Aparência da palha de café utilizada como matéria-prima é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Palha de café utilizada no estudo.



Fonte: Próprio autor

A análise química imediata foi realizada para caracterizar a composição da palha de café, determinando seus principais constituintes e fornecendo informações relevantes sobre umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas, conforme a norma padrão ASTM D1762-84. A análise elementar foi realizada para caracterizar a composição química da palha de café e avaliar seu comportamento. Foram obtidas a partir da análise de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) por combustão, empregando o analisador CHN PerkinElmer 2400 Série II. A fração correspondente ao oxigênio foi estimada por diferença, conforme a Equação 1.

$$O = 100 - C - H - N - cinzas$$

A caracterização dos grupos funcionais foi realizada por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier em modo de reflectância total atenuada (FTIR-ATR), utilizando um espectrómetro JASCO FT/IR-4100 (N.º série: C235761016) equipado com o acessório ATR PRO ONE de cristal único. A amostra foi depositada diretamente sobre o cristal do acessório ATR, sem qualquer preparação prévia, e submetida a pressão controlada pelo êmbolo do acessório para garantir o contacto óptico adequado. Os espectros foram adquiridos numa gama de varrimento de 4000 a 400 cm^{-1}, com resolução de 4,0 cm^{-1} e 64 acumulações, de modo a maximizar a razão sinal/ruído. O detector utilizado

foi do tipo TGS (Triglycine Sulfate), com função de apodização Cosine e ZeroFilling ativo. Os resultados foram expressos em percentagem de transmitância (%T) em função do número de onda (cm^{-1}). Entre cada amostra, o cristal ATR foi limpo com etanol e seco com papel absorvente, sendo adquirido um novo espectro de fundo (background) antes de cada medição.

A avaliação do comportamento térmico da palha de café foi realizada por análise termogravimétrica (TGA), utilizando o equipamento TGA/DTA 851 (Mettler-Toledo). Foram utilizadas aproximadamente 4 mg de amostra previamente seca e macerada, submetidas a aquecimento da temperatura ambiente até 900 °C, com taxa constante de 5 °C min^{-1}. Os ensaios ocorreram sob atmosfera inerte de nitrogênio (N_2), com vazão de 50 mL min^{-1}, a fim de minimizar reações oxidativas durante o aquecimento. Essas condições permitiram avaliar a estabilidade térmica e o processo de degradação da biomassa ao longo da faixa de temperatura estudada.

Resultados

A palha de café apresentou umidade de 6,27%, predominância de matéria volátil 77,49%, seguida de carbono fixo 16,18% e cinzas 6,33%. Na análise elementar, foram registrados 43,60% de carbono e 40,83% de oxigênio, seguidos por 6,00% de hidrogênio e 1,86% de nitrogênio, resultando em razões H/C de 1,65 e O/C de 0,70, conforme a Tabela 1.

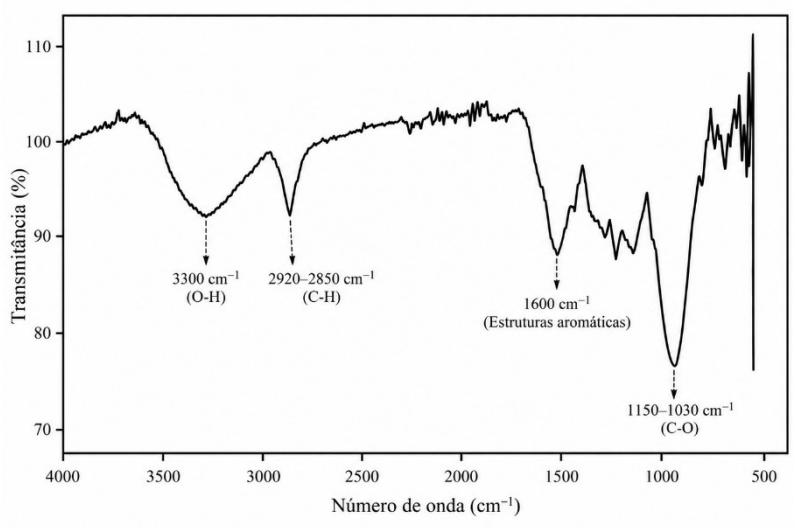
Tabela 1 – Resultado quantitativo da análise imediata e elementar da palha de café

U (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	Material volátil (%)	C	H	N	O²	H/C	O/C
6,27±0,08	6,33±0,30	16,18± 2,1	77,49± 1,9	43,60	6,0	1,86	40,83	1,65	0,7

Fonte: Próprio autor

O espectro de FTIR (Figura 2) confirma essa composição orgânica, apresentando banda larga em ~3300 cm^{-1}, associada ao estiramento O–H, bandas entre 2920–2850 cm^{-1}, atribuídas ao estiramento C–H alifático, e absorção em ~1600 cm^{-1}, relacionada a estruturas aromáticas. A região entre 1150–1030 cm^{-1}, correspondente a estiramentos C–O, reforça a presença de polissacarídeos na matriz lignocelulósica.

Figura 2 – Espectro de FTIR da palha de café in natura

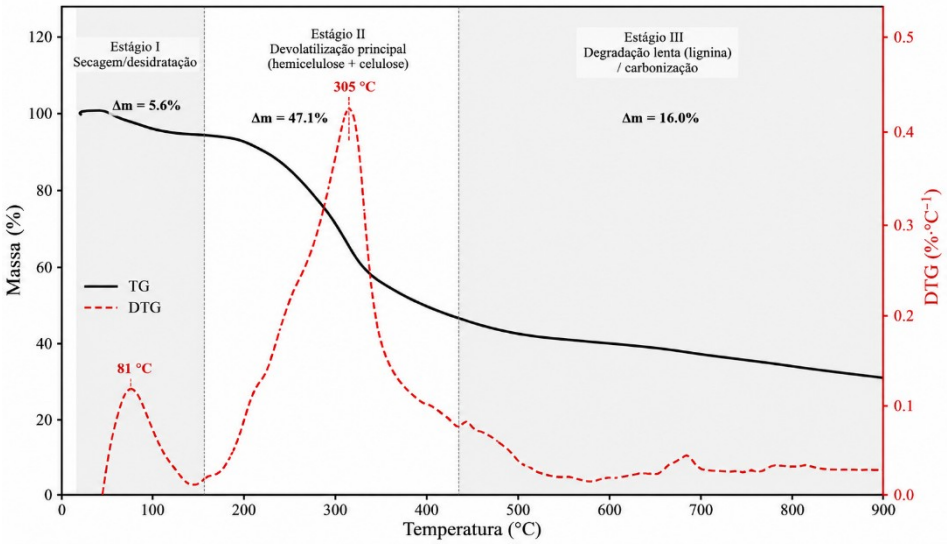


Fonte: Próprio autor

A análise termogravimétrica (Figura 3) evidenciou três etapas de perda de massa: (Estágio I) 50 – 150 °C, secagem/desidratação (Δm = 5,6%; pico em 81 °C); (Estágio II) 150–425 °C, devolatilização principal por decomposição de hemicelulose e celulose (Δm = 47,1%; pico em 305 °C); e (Estágio III)

425–900 °C, degradação lenta da lignina e carbonização (Δm = 16,0%) sem pico definido, refletindo a maior estabilidade térmica desse componente.

Figura 3 – Curvas termogravimétricas (TG) e termogravimétricas derivadas (DTG) da palha de café



Fonte: Próprio autor

Discussão

O elevado teor de matéria volátil de 77,49%, associado a um teor de carbono fixo de 16,18%, cinzas de 6,33% e umidade de 6,27%, é um perfil também observado por Veiga et al. (2017) e por Vivas et al. (2025) para casca de café, sendo característico de biomassas agrícolas ricas em compostos voláteis. O baixo teor de umidade é particularmente favorável para a rota termoquímica, já que biomassas com umidade elevada demandam maior gasto energético para vaporização da água antes do início efetivo da pirólise, além de reduzirem o rendimento e a qualidade dos produtos líquidos formados. Esse resultado é relevante para a avaliação do potencial termoquímico da palha, já que o carbono fixo corresponde à fração mais resistente durante a pirólise, enquanto o alto teor de matéria volátil indica maior propensão à decomposição térmica em temperaturas mais baixas favorecendo, em princípio, maior rendimento de produtos condensáveis, frente ao rendimento sólido.

Esse predomínio de compostos voláteis está diretamente relacionado à composição elementar da biomassa, na qual a predominância de carbono, com 43,60%, e oxigênio, com 40,83%, reflete sua natureza orgânica. Os valores encontrados neste trabalho são compatíveis com os relatados por Veiga et al. (2017) para resíduos de café, mas o teor de oxigênio observado aqui é inferior ao reportado por Setter et al. (2020) para casca de café in natura, que obtiveram cerca de 44,51% de oxigênio, sugerindo uma matriz ligeiramente menos oxigenada. As razões H/C e O/C, de 1,65 e 0,70 respectivamente, indicam o grau de aromaticidade e desoxigenação da biomassa, quanto maiores esses valores, menor a condensação estrutural e maior à similaridade com a matéria-prima original. O que é esperado para uma biomassa ainda não submetida a tratamento térmico. Segundo os mesmos autores, razões H/C e O/C mais baixas estão associadas a maior eficiência de combustão, por gerarem menor quantidade de dióxido de carbono, vapor d'água e fumaça durante a queima; os valores relativamente elevados obtidos neste trabalho, típicos de biomassa in natura, reforçam a expectativa de que a etapa de pirólise seja necessária para elevar o valor energético do material.

Os grupos funcionais identificados por FTIR ajudam a explicar o comportamento observado na análise termogravimétrica. As bandas associadas aos grupos hidroxila, próximas a 3300 cm^{-1}, às ligações C–H alifáticas, entre 2920 e 2850 cm^{-1}, e às estruturas aromáticas, próximas a 1600 cm^{-1}, são características de materiais lignocelulósicos (Nguyen et al., 2023; Setter et al., 2020; Domingues et al., 2017). Domingues et al. (2017) atribuem a banda larga na região de 3200 a 3400 cm^{-1} tanto à água quanto a grupos fenólicos e destacam a banda forte próxima a 1030 cm^{-1} como estiramento C–O associado à celulose, hemicelulose e a grupos metoxila da lignina, reforçando a origem lignocelulósica da biomassa.

A região identificada entre 1150 e 1030 cm^{-1} também converge com o intervalo relatado por Setter et al. (2020) para vibrações C–O–C associadas a polissacarídeos. Do ponto de vista da aplicação termoquímica, esses grupos funcionais fornecem informações relevantes sobre a composição estrutural da biomassa. Segundo Setter e Oliveira (2022), diversos compostos fenólicos comercialmente relevantes têm origem na degradação da lignina, indicando a importância das estruturas lignocelulósicas identificadas para a compreensão dos produtos formados durante a conversão térmica da palha de café. Dessa forma, as informações obtidas por FTIR corroboram e complementam o perfil de degradação observado na TG, evidenciando coerência entre a composição estrutural e o comportamento térmico da palha de café.

A análise termogravimétrica apresentou três etapas principais de perda de massa, indicando diferentes processos de degradação ao longo do aquecimento. Comportamento também identificado por Vivas et al. (2025) e por Setter e Oliveira (2022) na caracterização térmica da casca de café. A primeira etapa, entre 50 e 150 °C, com perda de massa de 5,6% e pico em 81 °C, está relacionada à eliminação da umidade da biomassa, o que é coerente com o baixo teor de umidade obtido na análise imediata. Na segunda, entre 150 e 425 °C, ocorreu a maior perda de massa, de 47,1%, com pico máximo em 305 °C, associada à decomposição de hemicelulose e celulose (Setter; Oliveira, 2022). Vale destacar que Domingues et al. (2017) observaram, para a casca de café, menor perda de massa entre 250 e 350 °C em comparação com biomassas como serragem de eucalipto e bagaço de cana, atribuindo esse comportamento a uma maior estabilidade térmica relativa da casca de café nessa faixa.

Apesar da elevada perda de massa observada neste trabalho no mesmo intervalo, a palha de café ainda mantém maior resistência térmica do que outras biomassas lignocelulósicas de referência. Na última etapa, entre 425 e 900 °C, com perda adicional de 16,0% de massa, observou-se degradação gradual, sem pico bem definido, relacionada à decomposição de estruturas mais resistentes, principalmente a lignina, o que é consistente com a maior estabilidade térmica desse componente relatada tanto por Setter e Oliveira (2022) quanto por Domingues et al. (2017).

Esse comportamento é diretamente relevante para a definição de parâmetros de processo em rotas termoquímicas: a concentração da maior perda de massa entre 150 e 425 °C indica que essa é a faixa de temperatura de maior reatividade térmica da palha, informação que pode orientar a escolha da temperatura final de pirólise conforme o produto de interesse. Temperaturas próximas ao limite superior dessa faixa tendem a favorecer maior conversão em bio-óleo e gases, enquanto temperaturas mais elevadas, na faixa de degradação da lignina, favorecem a formação de material carbonáceo mais estável, de interesse para a produção de biochar. Assim, o perfil termogravimétrico obtido fornece subsídio direto para a seleção de condições operacionais em estudos futuros de conversão termoquímica da palha de café.

Conclusão

Os resultados indicam potencial da palha de café para aplicações termoquímicas. A análise imediata indicou predominância de matéria volátil, acompanhada de menores proporções de carbono fixo e cinzas, característica compatível com o comportamento de biomassas agrícolas. A análise elementar evidenciou a predominância de carbono e oxigênio na composição da palha, contribuindo para a compreensão de sua natureza orgânica e de suas características químicas. A análise por FTIR permitiu identificar grupos funcionais associados aos principais constituintes lignocelulósicos da biomassa, enquanto a análise termogravimétrica mostrou diferentes etapas de degradação ao longo do aquecimento, relacionadas à decomposição de seus componentes estruturais. De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a palha de café apresenta características favoráveis ao seu aproveitamento em processos termoquímicos. A caracterização realizada fornece informações importantes sobre sua composição, estrutura e comportamento térmico, servindo como base para estudos posteriores voltados à valorização deste resíduo e à avaliação de diferentes possibilidades de conversão termoquímica.

Referências

DOMINGUES, Rimena R.; TRUGILHO, Paulo F.; SILVA, Carlos A.; MELO, Isabel Cristina N. A. de; MELO, Leônidas C. A.; MAGRIOTIS, Zuy M.; SÁNCHEZ-MONEDERO, Miguel A. Properties of

biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos One**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. e0176884, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0176884.

NGUYEN, D. V.; DUONG, C. T. T.; VU, C. N. M.; NGUYEN, H. M.; PHAM, T. T.; TRAN-THUY, T. M.; NGUYEN, L. Q. Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. **Data in Brief**, [S. l.], v. 51, p. 109781, 2023. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109781.

SETTER, Cassiano; SILVA, Fabíola Teixeira Máximo; ASSIS, Mateus Ribeiro; ATAÍDE, Carlos Henrique; TRUGILHO, Paulo Fernando; OLIVEIRA, Thiago José Pinto. Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: characterization of the solid and liquid fractions. **Fuel**, [S. l.], v. 261, p. 116420, 2020. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116420.

SETTER, Cassiano; OLIVEIRA, Thiago José Pinto. Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 189, p. 1007-1019, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.03.077.

SILVA, W. R.; CARREGOSA, J. C.; ALMEIDA-COUTO, J. M. F.; CARDOZO-FILHO, L.; WISNIEWSKI, A. Management of de-oiled coffee beans biomass through pyrolysis process: towards a circular bioeconomy. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [S. l.], v. 168, artigo 105763, 2022. DOI: 10.1016/j.jaap.2022.105763.

VEIGA, Tais Regina Lima Abreu; LIMA, José Tarcísio; DESSIMONI, Anelise Lima de Abreu; PEGO, Matheus Felipe Freire; SOARES, Jenaina Ribeiro; TRUGILHO, Paulo Fernando. Different plant biomass characterizations for biochar production**. Cerne**, Lavras, v. 23, n. 4, p. 526-535, 2017. DOI: 10.1590/01047760201723042373.

VIVAS, Evelyn Alegria; CASTILLO, Héctor Samuel Villada; ACOSTA, Edier Gaviria. Physicochemical and structural characterization of coffee husks for sustainable applications in biodegradable materials. **Journal of Natural Fibers**, [S. l.], v. 22, n. 1, artigo 2453489, 2025. DOI: 10.1080/15440478.2025.2453489.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho, por meio dos projetos FAPES nº 1254/2025 (P: 2025-3SFPC), nº 765/2025 (P: 2025-BP5JC) e nº 1672/2025 (P: 2025-N31VL).

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.