REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE PIRÓLISE DO RESÍDUO DE EXTRAÇÃO DE BURITI

STUDY OF THE PYROLYSIS CONDITIONS OF THE BURITI EXTRACTION RESIDUE

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE PIRÓLISIS DEL RESIDUO DE EXTRACCIÓN DE BURITI

Natália de Diniz Martins
Mestranda em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: nataliadinizmartins@gmail.com

Schaline Winck Alberti
Mestre e doutoranda em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: Schaline_swa@hotmail.com

Edson Antônio da Silva
Doutor em Engenharia Química, Docente da Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: edsondeq@gmail.com

Plínio Ribeiro Fajardo Campos
Doutor em Engenharia Química, Docente da Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: plinio.fajardo@hotmail.com

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Resumo

Este estudo investigou a pirólise da biomassa de buriti visando a produção de biochar e bio-óleo sob diferentes condições operacionais. Os experimentos foram realizados em um reator de pirólise, variando temperaturas entre 450 °C e 600 °C e tempos de residência de 10 a 60 minutos. A análise termogravimétrica (TGA) revelou as diferentes etapas da degradação térmica da biomassa de buriti. O maior rendimento de biochar foi obtido a 450 °C por 30 minutos de pirólise (30,75%), enquanto o maior rendimento de bio-óleo foi alcançado a 525 °C por 60 minutos (48,98%). A análise de variância (ANOVA) demonstrou que a temperatura influenciou significativamente o rendimento de biochar, enquanto o tempo foi o principal fator para o aumento do rendimento de bio-óleo. O bio-óleo gerado apresentou poder calorífico superior (PCS) de 10,68 MJ kg^{-1}, enquanto o biochar apresentou um PCS significativamente maior de 30,664 MJ kg^{-1}. A análise espectroscópica por FTIR revelou a presença de grupos funcionais como fenóis, álcoois e compostos alifáticos. Os resultados demonstram que as condições operacionais influenciam diretamente a distribuição dos produtos, permitindo direcionar o processo para a obtenção de biochar ou bio-óleo.

Palavras-chave: Pirólise; Biochar; Bio-óleo; Biomassa de Buriti; Degradação Térmica e Rendimento.

Abstract

This study investigated the pyrolysis of buriti biomass aiming at the production of biochar and bio-oil under different operational conditions. Experiments were conducted in a pyrolysis reactor, varying temperatures between 450 °C and 600 °C and residence times from 10 to 60 minutes. Thermogravimetric analysis (TGA) revealed the different stages of buriti biomass thermal degradation. The highest biochar yield was obtained at 450 °C for 30 minutes of pyrolysis (30.75%), while the highest bio-oil yield was achieved at 525 °C for 60 minutes (48.98%). Analysis of variance (ANOVA) demonstrated that temperature significantly influenced biochar yield, while time was the main factor for increasing bio-oil yield. The generated bio-oil presented a higher heating value (HHV) of 10.68 MJ kg^{-1}, while the biochar showed a significantly higher HHV of 30.664 MJ kg^{-1}. FTIR spectroscopic analysis revealed the presence of functional groups such as phenols, alcohols, and aliphatic compounds. The results demonstrate that operational conditions directly influence product distribution, allowing the process to be directed towards obtaining either biochar or bio-oil.

Keywords: Pyrolysis; Biochar; Bio-oil; Buriti Biomass; Thermal Degradation and Yield.

Resumen

Este estudio investigó la pirólisis de la biomasa de buriti con el objetivo de producir biocarbón y bio-aceite bajo diferentes condiciones operacionales. Los experimentos se realizaron en un reactor de pirólisis, variando temperaturas entre 450 °C y 600 °C y tiempos de residencia de 10 a 60 minutos. El análisis termogravimétrico (TGA) reveló las diferentes etapas de la degradación térmica de la biomasa

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

de buriti. El mayor rendimiento de biocarbón se obtuvo a 450 °C durante 30 minutos de pirólisis (30,75%), mientras que el mayor rendimiento de bio-aceite se logró a 525 °C durante 60 minutos (48,98%). El análisis de varianza (ANOVA) demostró que la temperatura influyó significativamente en el rendimiento de biocarbón, mientras que el tiempo fue el factor principal para el aumento del rendimiento de bio-aceite. El bio-aceite generado presentó un poder calorífico superior (PCS) de 10,68 MJ kg^{-1}, mientras que el biocarbón mostró un PCS significativamente mayor de 30,664 MJ kg^{-1}. El análisis espectroscópico por FTIR reveló la presencia de grupos funcionales como fenoles, alcoholes y compuestos alifáticos. Los resultados demuestran que las condiciones operacionales influyen directamente en la distribución de los productos, permitiendo dirigir el proceso hacia la obtención de biocarbón o bio-aceite.

Palabras clave: Pirólisis; Biochar; Bio-aceite; Biomasa de Buriti; Degradación Térmica y Rendimiento.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

1. Introdução

A necessidade da busca por fontes renováveis de combustíveis vem do amplo uso de combustíveis fósseis associada ao manejo inadequado de resíduos sólidos, promovendo desafios relevantes para a criação de sistemas mais sustentáveis. A busca por estratégias para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, tem usado como estratégia o reaproveitamento de resíduos de biomassa, assim desenvolvendo e aprimorando a conversão desses resíduos em produtos de valor agregado e consequentemente reduzindo a emissão de gases como metano e dióxido de carbono (Gómez-Sanabria et al., 2022).

A bioenergia se insere nesse contexto como uma alternativa promissora, baseada na conversão de biomassa renovável em vetores energéticos com menor pegada de carbono. De modo geral, biomassas apresentam menores teores de heteroátomos, como enxofre e nitrogênio, quando comparadas aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução de emissões poluentes durante sua conversão (Wang et al., 2022). Além disso, o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos reduz a necessidade de culturas energéticas dedicadas, favorecendo alternativas de aproveitamento de resíduos.

A biomassa é uma fonte abundante em carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio que pode ser transformada e reutilizada. Sua fração lignocelulósica pode ser convertida por processos térmicos em atmosfera inerte, através da pirólise, no qual, a decomposição da biomassa promove a formação de três coprodutos principais: biochar, bio-óleo e syngas (gases não condensáveis), cuja distribuição depende das condições operacionais, especialmente temperatura e tempo de residência (Amenaghawon et al., 2021; Aboelela et al., 2023). Enquanto a hemicelulose e a celulose se decompõem em temperaturas mais baixas gerando gases condensáveis e não condensáveis, a lignina apresenta maior estabilidade térmica e contribui significativamente para a formação de biochar. Em geral, temperaturas mais elevadas favorecem reações secundárias, como o craqueamento térmico, aumentando a formação de gases, enquanto condições mais brandas tendem a favorecer a produção de biochar (Jerzak et al., 2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Entre as biomassas com potencial energético no Brasil, destaca-se a palmeira buriti (*Mauritia flexuosa*), amplamente distribuída nas regiões Amazônica e do Cerrado. O processamento de seus frutos, voltado principalmente às indústrias alimentícia e cosmética, gera quantidades expressivas de resíduos lignocelulósicos ainda pouco aproveitados. Estudos indicam que esses resíduos apresentam características favoráveis ao uso energético, como baixo teor de cinzas, elevado poder calorífico e teores relevantes de lignina (Silva et al., 2023).

Para avaliar a influência dessas variáveis de forma sistemática, ferramentas estatísticas como o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e a Metodologia de Superfície de Resposta são amplamente empregadas, permitindo a análise dos efeitos individuais e de interação entre os fatores do processo (Aboelela et al., 2023; Myers et al., 2016).

Apesar dos avanços nesta área, ainda existem lacunas quanto à utilização de resíduos de buriti (torta lignocelulósica) sob diferentes condições de pirólise. Neste contexto, este estudo visa avaliar os efeitos da temperatura e do tempo de residência na produção de biochar e bio-óleo a partir desse resíduo, utilizando uma abordagem de planejamento experimental, com ênfase na identificação dos padrões de distribuição dos produtos dentro da faixa investigada.

2. Metodologia

2.1 Matéria-prima e preparo

O resíduo de buriti (*Mauritia flexuosa*) utilizado neste estudo corresponde à fração sólida remanescente após a extração do óleo da polpa do fruto, caracterizando-se como uma torta lignocelulósica resultante do processamento agroindustrial. Após essa etapa, o material foi submetido à secagem natural em ambiente aberto até atingir massa constante, sendo o teor de umidade determinado por meio da análise imediata (Seção 2.3). As amostras foram empregadas sem pré-tratamentos adicionais, como moagem ou classificação granulométrica, sendo utilizadas diretamente conforme recebidas. Para cada experimento, aproximadamente 30 g de biomassa foram utilizados, sendo as amostras armazenadas em condições ambientais até a realização dos ensaios.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

A escolha desse resíduo como matéria-prima está associada à sua disponibilidade e ao potencial de valorização de subprodutos da cadeia agroindustrial do buriti. Ressalta-se que a utilização da torta residual, em sua forma não processada, busca representar condições reais de aproveitamento desses resíduos. No entanto, a ausência de padronização quanto à granulometria e à composição do material constitui uma limitação experimental, podendo influenciar a reprodutibilidade e a variabilidade dos resultados obtidos.

2.2 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica foi conduzida com o objetivo de caracterizar as etapas térmicas de degradação da torta lignocelulósica, contribuindo para a definição da faixa de temperatura adotada no planejamento experimental. A amostra foi encaminhada para um equipamento TG-DTG (PerkinElmer, STA 600). Aproximadamente 10 mg de cada amostra foram colocados em porta-amostra de porcelana e submetidos a aquecimento de 30 °C até 900 °C, sob atmosfera inerte de nitrogênio (N_2). A taxa de aquecimento empregada foi de 10 °C min^{-1}, com fluxo de gás de arraste de 20 mL min^{-1}.

2.3 Análise imediata por TGA

A composição imediata das amostras foi determinada por termogravimetria, com base na metodologia adaptada de Saldarriaga et al. (2015), permitindo a quantificação dos teores de umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas.

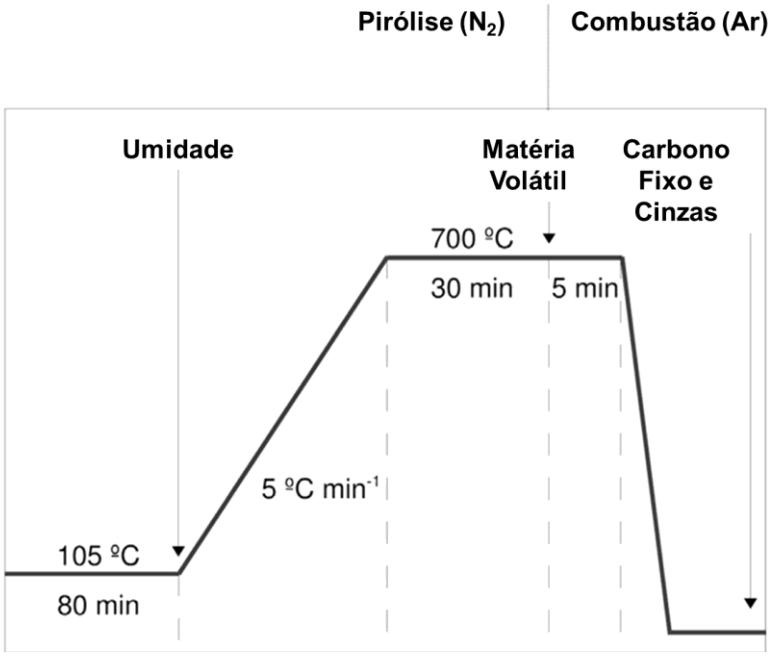
A amostra foi submetida a aquecimento programado em equipamento TG-DTG (PerkinElmer, STA 600). Inicialmente, as amostras foram aquecidas de 30 °C até 105 °C sob atmosfera de nitrogênio (N_2), com taxa de aquecimento de 15 °C min^{-1} e fluxo de gás de 60 mL min^{-1}, seguida de uma etapa isotérmica de 80 minutos nessa temperatura. Na etapa seguinte, a temperatura foi elevada até 700 °C, mantendo-se as condições operacionais, com aplicação de uma isoterma de 30 minutos para determinação da fração de matéria volátil. Posteriormente, o gás de arraste foi substituído por ar sintético, mantendo-se a temperatura em 700 °C por 5 minutos, etapa destinada à quantificação do teor de cinzas. Ao final do ensaio, o sistema foi

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

resfriado até 30 °C. A descrição detalhada do procedimento pode ser observada na Figura 1 (adaptada de Saldarriaga et al., 2015).

Figura 1 - Metodologia desenvolvida para análise imediata por TGA.



Fonte: Adaptado de Saldarriaga *et al*. (2015).

2.4 Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

O estudo experimental foi conduzido com base em um delineamento composto central rotacional (DCCR), com o objetivo de avaliar a influência das variáveis operacionais sobre os rendimentos dos produtos da pirólise. Como variáveis independentes, consideraram-se a temperatura de reação (°C) e o tempo de residência (min). O planejamento foi estruturado a partir de um arranjo fatorial 2^2, acrescido de quatro pontos axiais (±1,41) e quatro repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios. As variáveis resposta analisadas corresponderam aos rendimentos de biochar (y_1) e bio-óleo (y_2), ambos expressos em porcentagem.

A análise dos dados foi realizada com o auxílio do software Statística, adotando-se nível de significância de 95% ($p < 0,05$). Foram investigados os efeitos lineares, quadráticos e de interação entre as variáveis, além do ajuste de modelos empíricos por meio da metodologia de superfície de resposta.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Tabela 1. Condições experimentais do planejamento.

Variável	-1,41	-1	0	1	+1,41	Código
Temperatura (°C)	450	472	525	578	600	**x1**
Isoterma de pirólise (min)	10	16	30	51	60	**x2**

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 2 apresenta a matriz do planejamento experimental do DCCR, na qual estão descritas as condições aplicadas em cada ensaio, expressas em termos de variáveis codificadas.

Tabela 2. Matriz do planejamento DCCR.

Ensaios	x1	x2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1,41	0
6	1,41	0
7	0	-1,41
8	0	1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.5 Produção do Biochar e Bio-óleo

Os ensaios de pirólise foram conduzidos em reator de leito fixo, sob atmosfera inerte de nitrogênio (N_2), com fluxo constante de 100 mL min^{-1}. As amostras foram aquecidas a uma taxa aproximada de 20 °C min^{-1} até a temperatura definida no planejamento experimental. Uma vez atingido esse valor, o sistema foi mantido em regime isotérmico pelo tempo correspondente a cada ensaio.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Os vapores gerados durante o processo foram direcionados a um sistema de condensação, permitindo a coleta da fração líquida (bio-óleo), enquanto o biochar permaneceu no interior do reator ao final da operação.

2.6 Rendimento

A avaliação do rendimento (y_1) consiste em determinar a proporção entre a massa do produto carbonizado (m_{prod}), obtido após a pirólise, e a massa da biomassa bruta (m_{biom}). Analogamente, o rendimento (y_2) do bio-óleo é determinado pela relação entre a massa do bio-óleo gerado (m_{prod}) e a massa da biomassa bruta (m_{biom}). Esses rendimentos, são expressos em porcentagem e refletem a fração da massa original que é convertida em bio-óleo e biochar durante o processo de pirólise. O cálculo segue a Equação 1.

$$y(\%)=\frac{m_{prod}}{m_{biom}}*100 \quad (1)$$

2.7 Caracterização dos coprodutos

2.7.1. Poder Calorifico Superior

O poder calorífico superior das amostras foi determinado por meio de bomba calorimétrica. Para isso, aproximadamente 0,3 g de cada amostra foram pesados e acondicionados em cadinhos apropriados.

Em seguida, o material foi conectado ao sistema de ignição por meio de fio de algodão e submetido à combustão em atmosfera de oxigênio, sob pressão de aproximadamente 30 atm. Por último, o calorímetro foi transferido à bomba calorimétrica para a determinação do poder calorífico.

2.7.2. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A identificação dos grupos funcionais presentes no biochar e no bio-óleo foi realizada por meio da espectroscopia de absorção na região do infravermelho, tanto antes quanto após o processo de adsorção. As amostras foram preparadas por dispersão em brometo de potássio (KBr) até a formação de um fino filme. A análise foi conduzida em um espectrofotômetro de infravermelho com transformada de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Fourier (FTIR), operando na faixa de 4000 a 400 cm^{-1}, com uma resolução de 4,0 cm^{-1}.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) permite acompanhar a variação de massa de um material em função da temperatura, sendo uma ferramenta importante para identificar as etapas de decomposição térmica da biomassa. No material avaliado (Figura 2), a faixa entre 30 e 150 °C corresponde à remoção da umidade e compostos mais leves, correspondendo a aproximadamente 10% da massa inicial. Enquanto entre 200 e 400 °C, ocorre perda de 45% da massa estando relacionado a decomposição dos principais constituintes lignocelulósicos mais reativos (hemicelulose e celulose), que esta associada à liberação de compostos voláteis da biomassa. Sendo coerente com a decomposição da hemicelulose e da celulose, que se concentram predominantemente nessa faixa de temperatura.

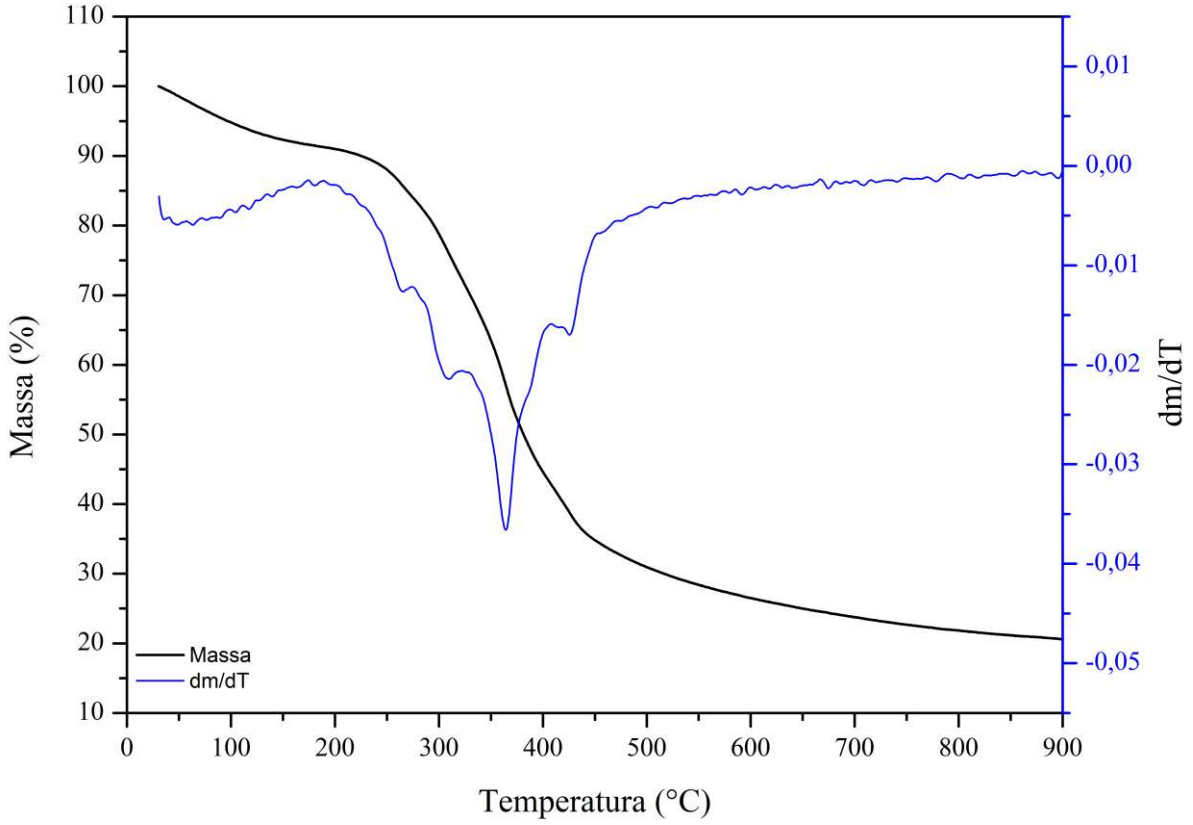
Já em temperaturas superiores a 500 °C estão relacionadas à degradação de estruturas mais condensadas e termicamente estáveis, como a lignina, a qual apresenta degradação mais gradual e é responsável pelo maior rendimento e formação do char. Sua degradação é distribuída em uma faixa mais ampla, podendo se estender até cerca de 800 °C (Consumi et al., 2022; Sousa et al., 2024).

Com base nesses resultados, definiu-se a faixa de temperatura entre 450 °C e 600 °C para o planejamento experimental, de modo a abranger a região de maior degradação térmica dos voláteis e favorecer a formação de biochar e bio-óleo.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Figura 2 - Análise Termogravimétrica do Buriti.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2 Análise imediata por TGA

A análise imediata obtida por TGA fornece informações relevantes sobre a composição do material, incluindo os teores de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. Os resultados estão apresentados na Tabela 3, em base úmida.

O teor de umidade de 7,69% indica que o material apresenta baixa quantidade de água residual, o que é favorável sob o ponto de vista energético, uma vez que reduz a demanda de calor necessária para evaporação durante o aquecimento, contribuindo para a eficiência do processo de pirólise. Ferreira et al., (2021), obteve um teor de umidade de 8,3% para a torta lignocelulósica, enquanto Silva et al., (2023) relata umidade entre 11,27-12,82% para cascas e caroço, dessa forma ressaltando a diferença nos materiais quando já submetidos a extração de polpa e óleos.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Tabela 3. Análise imediata da torta lignocelulósica residual da extração de polpa/óleo de buriti, em comparação com dados reportados na literatura.

Componente	Umidade (%)	Matéria volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	Referência
Torta lignocelulósica de buriti	7,69	74,70	3,36	14,25	Autor
Caroço de buriti (%)	12,82	84,67	3,17	3,34	Silva et al., (2023)
Casca de buriti (%)	11,27	68,47	2,60	17,66	Silva et al., (2023)
Torta de buriti (%)	8,3	--	5,2	--	Ferreira et al., (2021)
Endocarpo	8,81	85,00	4,66	10,34	Guimarães et al., (2021)

Fonte: Elaborado pelos autores.

A matéria volátil foi a fração predominante, com 74,70%, evidenciando elevada reatividade térmica do material, estando associado à maior liberação de compostos voláteis e condensáveis ao longo do aquecimento, favorecendo a formação de bio-óleo e gases não condensáveis (syngas). Quando comparado a partes do buriti fica o teor de matéria volátil fica entre o endocarpo 85% e casca 68,47% do buriti (Guimarães et al., 2021, Silva et al. 2023)

O teor de cinzas, de 3,36%, pode ser considerado baixo, indicando reduzida presença de material inorgânico. Essa característica é relevante, pois altos teores de cinzas podem comprometer a eficiência do processo, além de favorecer a ocorrência de problemas operacionais, como a formação de depósitos e interferências nas reações térmicas. O carbono fixo, correspondente a 14,25%, e está relacionado à fração sólida remanescente após a liberação dos voláteis, contribuindo para a formação de carvão (char) e para o conteúdo energético do material. Esse parâmetro também está associado à estabilidade térmica do resíduo e ao seu potencial de aproveitamento energético. Silva et al., (2023) relatou 17,66 % na casca do buriti e Guimarães et al., (2021) reportou 10,34% no endocarpo do fruto.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Os valores obtidos mostram-se consistentes com os valores comumente reportados para biomassas lignocelulósicas, que tipicamente apresentam elevada fração de matéria volátil e baixos teores de umidade e cinzas, favorecendo a degradação térmica e o desempenho em processos de conversão termoquímica (Racero-Galaraga et al., 2024). Além disso, a relação observada entre matéria volátil e carbono fixo indica um equilíbrio adequado entre a formação de produtos condensáveis e a geração de fração sólida, conforme discutido em estudos cinéticos de degradação térmica (Emiola-Sadiq et al., 2021).

Dessa forma, os resultados confirmam que o resíduo de buriti apresenta propriedades compatíveis com sua utilização em processos termoquímicos, destacando-se pelo elevado teor de voláteis, baixa fração mineral e teor de umidade adequado.

3.3 Rendimento

Com base nos rendimentos experimentais de biochar e bio-óleo obtidos nos ensaios de pirólise (Tabela 4), foi realizado o balanço de massa global do processo quanto ao rendimento (%), considerando a distribuição dos produtos em três frações principais: sólida (biochar), líquida (bio-óleo) e gasosa (gases não condensáveis). A fração gasosa não foi quantificada diretamente neste estudo, sendo, portanto, estimada por diferença, o que representa uma limitação do estudo, uma vez que não permite a determinação de sua composição nem a quantificação direta de eventuais perdas experimentais, como condensação incompleta ou vazamentos. Assim, os valores obtidos devem ser interpretados como estimativas da distribuição global de massa.

Obteve-se rendimentos de biochar na faixa de 27–31%, de bio-óleo entre 31-49%, e de syngás 25-40%, aproximadamente. Observa-se que o maior rendimento de biochar foi obtido no ensaio 5 (30,75%), correspondente à condição de 450 °C e 30 minutos. Esse resultado evidencia que temperaturas mais baixas favorecem a formação da fração sólida, uma vez que limitam a ocorrência de reações secundárias, promovendo maior retenção de carbono no material.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Tabela 4. Rendimentos dos coprodutos obtidos a partir da pirólise de resíduo de buriti.

Ensaios	Biochar (%)	Bio-óleo (%)	Gases (%)
1	29,23	31,11	39,66
2	27,71	42,63	29,66
3	29,67	41,91	28,42
4	27,51	41,11	31,38
5	30,75	38,41	30,84
6	27,14	45,80	27,06
7	29,34	34,49	36,17
8	28,14	48,98	22,88
9	28,19	44,62	27,19
10	28,63	45,91	25,46
11	28,41	41,08	30,51
12	28,10	43,72	28,18

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em contrapartida, o maior rendimento de bio-óleo foi registrado no ensaio 8 (48,98%), nas condições de 525 °C e 60 minutos. Isso indica que temperaturas intermediárias, aliadas a maiores tempos de residência, favorecem a formação e a recuperação de compostos condensáveis. De forma geral, observa-se uma transição no perfil de produtos: condições mais brandas priorizam a formação de biochar, enquanto o aumento da severidade operacional desloca a distribuição em direção à fração líquida.

A fração gasosa variou entre 22,88% e 39,66%, refletindo a influência das condições operacionais na distribuição dos produtos, atingindo o máximo de rendimento no ensaio 1 (450 °C e 10 min). Em termos gerais, configurações que maximizam a produção de bio-óleo tendem a reduzir a formação de gases, enquanto o aumento da temperatura e/ou a intensificação do tempo de exposição térmica favorecem reações secundárias, como o craqueamento dos vapores, resultando em maior geração de gases não condensáveis.

Os diferentes teores de rendimento podem ser explicados pela conversão progressiva das frações lignocelulósicas, que, sob condições mais severas se

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

distribuem de formas diferentes. Durante a pirólise, a degradação dos constituintes estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) leva à formação de intermediários voláteis que podem ser condensados na forma de bio-óleo ou convertidos em gases por meio de reações secundárias, como craqueamento e reforma (Emiola-Sadiq et al., 2021; Wang et al., 2020).

Emiola-Sadig et al., (2021) avaliou a formação de biochar e voláteis (condensáveis e não condensáveis) para biomassas lignocelulósicas sob diferentes rampas de aquecimento via análise termogravimétricas obtendo um rendimento semelhantes aos resultados obtidos para o resíduo de buriti. Obteve-se para o rendimento de biochar de 29,1% (casca de soja), 23,1 % (casca de aveia), 6,8% (abeto) e 20% (salgueiro) e para os voláteis de 70,9% (casca de soja), 76,9% (casca de aveia), 93,2% (abeto) e 80% (salgueiro) para uma rampa de 20 °C min^{-1}, assim como o empregado para a execução do planejamento experimental.

3.4 Análise de variância (ANOVA)

A avaliação dos rendimentos de biochar e bio-óleo foi realizada com base nos dados experimentais apresentados na Tabela 4, sendo posteriormente submetida à análise de variância (ANOVA), cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 5 e 6. A avaliação dos resíduos (Apêndice I – Figuras A e B) mostrou distribuição aleatória dos pontos, sem tendência definida, o que indica ausência de inconsistências evidentes das condições do modelo. Nos gráficos de valores observados *vs.* preditos (Apêndice I – Figuras C e D), a proximidade dos pontos em relação à linha de identidade reforça a capacidade preditiva dos modelos ajustados.

Para a ANOVA do rendimento de biochar (Tabela 5), o modelo ajustado apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,905$ e R^2 ajustado = 0,826, indicando que cerca de 82,6% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo dentro da faixa experimental investigada. A temperatura apresentou efeito linear altamente significativo (p-valor = 0,001), evidenciando seu papel como principal variável no controle da formação de biochar. Em contrapartida, o tempo de residência (p- valor = 0,12), os termos quadráticos (p-valor > 0,05) e a interação entre

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

temperatura e tempo (p-valor = 0,27) não apresentaram significância estatística ao nível de 95% de confiança.

Tabela 5. ANOVA para o Rendimento Biochar

	SQ	GL	MQ	F	p-Valor
(1) Temperatura (°C) (L)	9,63	1,00	9,63	170,38	0,001
Temperatura (°C) (Q)	0,34	1,00	0,34	5,95	0,09
(2) tempo (min) (L)	0,26	1,00	0,26	4,65	0,12
tempo (min) (Q)	0,10	1,00	0,10	1,77	0,28
Temp. X tempo (L)	0,10	1,00	0,10	1,78	0,27
Modelo	10,37	5,00	2,07	11,44	0,01
Falta de ajuste	0,92	3,00	0,31	5,42	0,10
Erro puro	0,17	3,00	0,06		
Resíduo	1,09	6,00	0,18		
Total	11,46	11,00			

R^2 = 0,90504; R^2 Adj = 0,82591; Erro puro = 0,0565061.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise dos dados demonstra que nas condições avaliadas, o rendimento de biochar é predominantemente governado pela temperatura, com comportamento aproximadamente linear. A ausência de significância dos termos quadráticos sugere que não há evidências consistentes de curvatura na superfície de resposta para esse produto. Estando de acordo com estudos que investigaram a pirólise de biomassas lignocelulósicas, nos quais o aumento da temperatura promove a intensificação das reações de desvolatilização, reduzindo o rendimento de biochar. Resultados semelhantes foram reportados para diferentes resíduos agroindustriais, indicando que a fração sólida tende a diminuir com temperaturas mais severas no processo. Assim, estabelecendo uma relação inversa entre temperatura e rendimento de biochar (Silva et al., 2023; Emiola-Sadig et al., 2021).

A análise de falta de ajuste (p-valor = 0,10) indica que, embora o modelo seja significativo, sua capacidade preditiva apresenta limitações. Isso sugere que fatores não considerados, como variações na taxa efetiva de aquecimento, transferência de calor ou heterogeneidade da biomassa, podem influenciar os resultados. Devido a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

essas limitações optou-se por não apresentar as equações preditivas ajustadas, uma vez que o modelo não apresentou robustez suficiente. Estudos futuros com maior número de ensaios e refinamento da faixa experimental podem contribuir para maior robustez do modelo.

Tabela 6. ANOVA para o Rendimento bio-óleo.

	SQ	GL	MQ	F	p-Valor
(1) Temperatura (°C) (L)	55,98	1	55,98	13,39	0,035
Temperatura (°C) (Q)	15,34	1	15,34	3,67	0,151
(2) tempo (min) (L)	110,71	1	110,71	26,49	0,014
tempo (min) (Q)	19,25	1	19,25	4,61	0,121
Temp. X tempo (L)	37,95	1	37,95	9,08	0,057
Modelo	233,58	5	46,72	6,50	0,020
Falta de ajuste	30,56	3	10,19	2,44	0,241
Erro puro	12,54	3	4,18		
Resíduo	43,10	6	7,18		
Total	276,69	11			

R^2 = 0,84422; R^2 Adj = 0,7144, Erro puro = 4,179034.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o rendimento de bio-óleo (Tabela 6), o modelo apresentou R^2 = 0,844 e R^2 ajustado = 0,714, indicando um ajuste moderado aos dados experimentais. Diferentemente do observado para o biochar, tanto a temperatura (p-valor = 0,035) quanto o tempo de residência (p-valor = 0,014) apresentaram efeitos lineares significativos, evidenciando a influência conjunta dessas variáveis na formação do bio-óleo.

O termo de interação temperatura *vs* tempo apresentou p-valor = 0,057, valor próximo ao limite de significância. Isso sugere uma possível tendência de interação entre as variáveis, embora não seja possível confirmá-la estatisticamente ao nível de 95% de confiança. Assim, qualquer interpretação nesse sentido deve ser feita com cautela. Os termos quadráticos não foram significativos (p-valor > 0,05), indicando ausência de evidência estatística robusta de comportamento não linear na faixa estudada. A análise de falta de ajuste (p-valor = 0,24), por sua vez, sugere que o

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

modelo é adequado para descrever os dados experimentais, dentro das limitações do planejamento adotado.

Alguns estudos relatam que o rendimento de bio-óleo é maximizado em temperaturas intermediárias, devido ao equilíbrio entre a formação de compostos voláteis e sua degradação secundária. Em temperaturas mais elevadas, estudos indicam que reações como craqueamento térmico e reforma térmica passam a predominar, reduzindo a fração líquida e aumentando a formação de gases. Dessa forma, o máximo rendimento de bio-óleo observado a 525 °C e 60 min pode ser atribuído a esse balanço entre geração e degradação dos voláteis. Já na condição de 600 °C, o aumento da severidade das reações secundárias intensifica a conversão dos compostos líquidos em frações gasosas, justificando a redução do rendimento de bio-óleo (Wang et al., 2020).

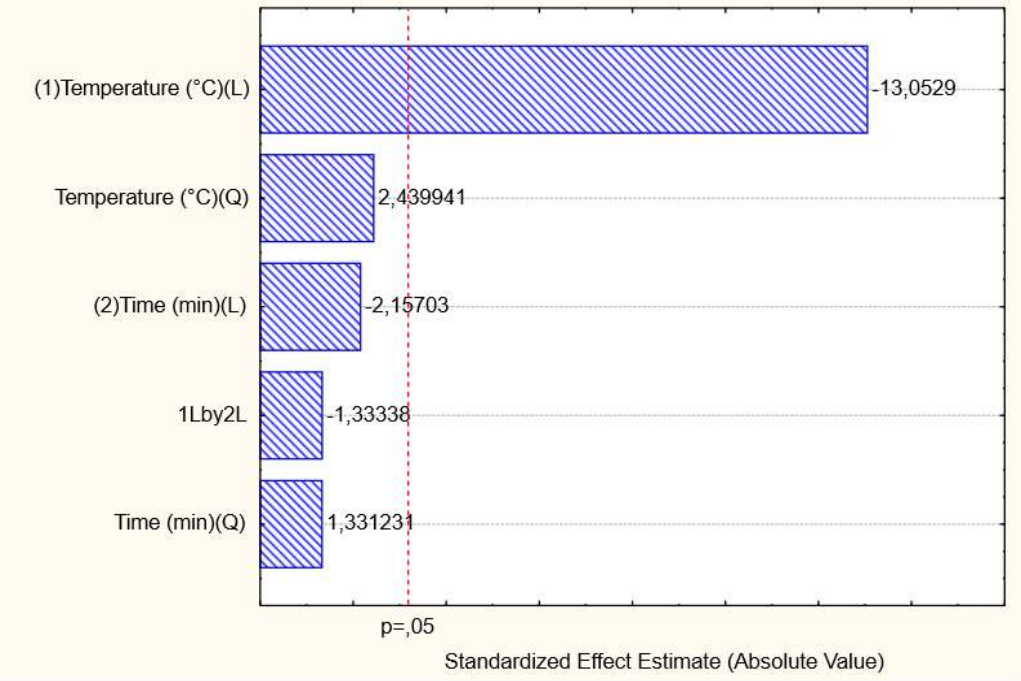
O tempo de residência também exerce papel relevante nesse processo. Tempos mais longos favoreceram a conversão da biomassa e a liberação de voláteis; entretanto, dependendo das condições térmicas, podem intensificar reações secundárias de degradação do bio-óleo. No presente estudo, os resultados indicam que o aumento do tempo ainda contribui positivamente para o rendimento, sugerindo que o regime operacional não atingiu um ponto ótimo em que essas reações passam a predomina (Emiola-Sadiq et al., 2021; Aboelela et al., 2023).

O diagrama de Pareto para o rendimento de biochar (Figura 3) ilustra a magnitude e a significância estatística dos efeitos padronizados dos fatores experimentais. No gráfico, a linha vermelha representa o valor crítico para p = 0,05, de modo que as barras que a ultrapassam indicam efeitos significativos ao nível de 5%.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Figura 3 - Diagrama de Pareto para o rendimento de biochar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

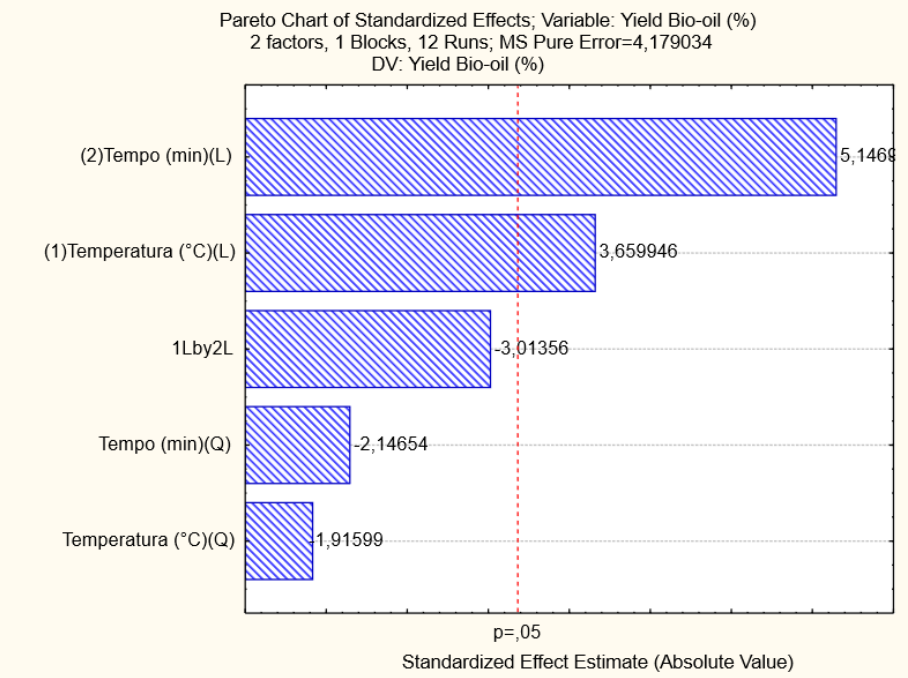
Observa-se que a temperatura (°C) é a variável mais influente no rendimento de biochar, em concordância com os resultados da ANOVA, apresentando efeito padronizado superior aos demais fatores e acima do limite de significância. Esse resultado reforça que o rendimento de biochar está fortemente associado à temperatura, destacando a importância do controle desse parâmetro para a otimização do processo.

O diagrama de Pareto para o rendimento de bio-óleo (Figura 4) revela um padrão de influência distinto. Nesse caso, o tempo de residência se destaca como o fator mais significativo, seguido pela temperatura, sendo ambos superiores ao valor crítico para p = 0,05. Esses resultados indicam que o rendimento de bio-óleo é principalmente influenciado pelo tempo de residência e, em menor grau, pela temperatura.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Figura 4 - Diagrama de Pareto para o rendimento de bio-óleo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por fim, a análise das superfícies de resposta é uma etapa importante para interpretar o desempenho do sistema em função das variáveis operacionais investigadas. As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, as superfícies tridimensionais (3D) e bidimensional (2D) para o rendimento de biochar. A partir da Figura 5, percebe-se que a temperatura exerce influência predominante sobre o rendimento de biochar, o que se reflete na inclinação mais acentuada da superfície ao longo desse eixo. Com o aumento da temperatura, há uma redução significativa no rendimento, no qual, tons mais quentes representam maiores rendimentos e tons mais frios menores rendimentos. Esse comportamento está relacionado à intensificação das reações de desvolatilização e craqueamento térmico em temperaturas mais elevadas, que favorecem a formação de frações líquidas e gasosas em detrimento do sólido carbonáceo.

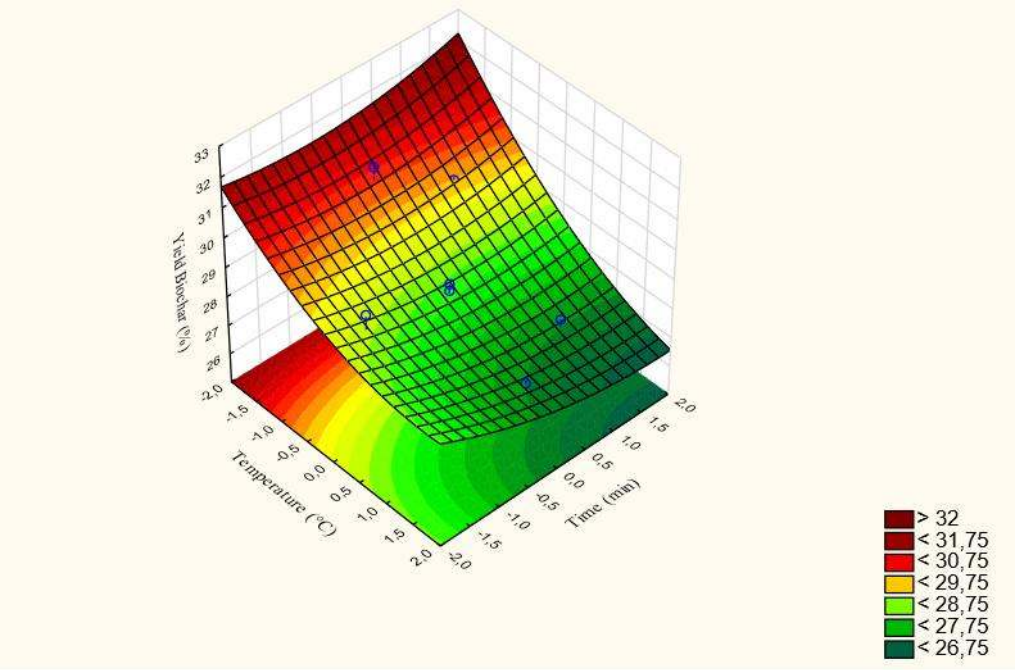
A Figura 6 (superfície 2D) confirma esse perfil linear, evidenciando o efeito da temperatura sobre o rendimento de biochar, em concordância com os resultados da análise de variância (Tabela 5), na qual apenas o termo linear da temperatura apresentou significância estatística. Por outro lado, o tempo de residência

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

apresentou influência menos pronunciada, refletida na baixa curvatura da superfície ao longo desse eixo. Isso indica que, dentro da faixa experimental avaliada, o tempo não atua como fator limitante na formação de biochar, sendo o processo predominantemente controlado pela temperatura. Esse resultado também está alinhado ao efeito térmico observado na análise termogravimétrica (Figura 2), na qual a principal degradação da biomassa ocorre em faixas específicas de temperatura.

Figura 5 - Gráfico da superfície de resposta 3D para o biochar.

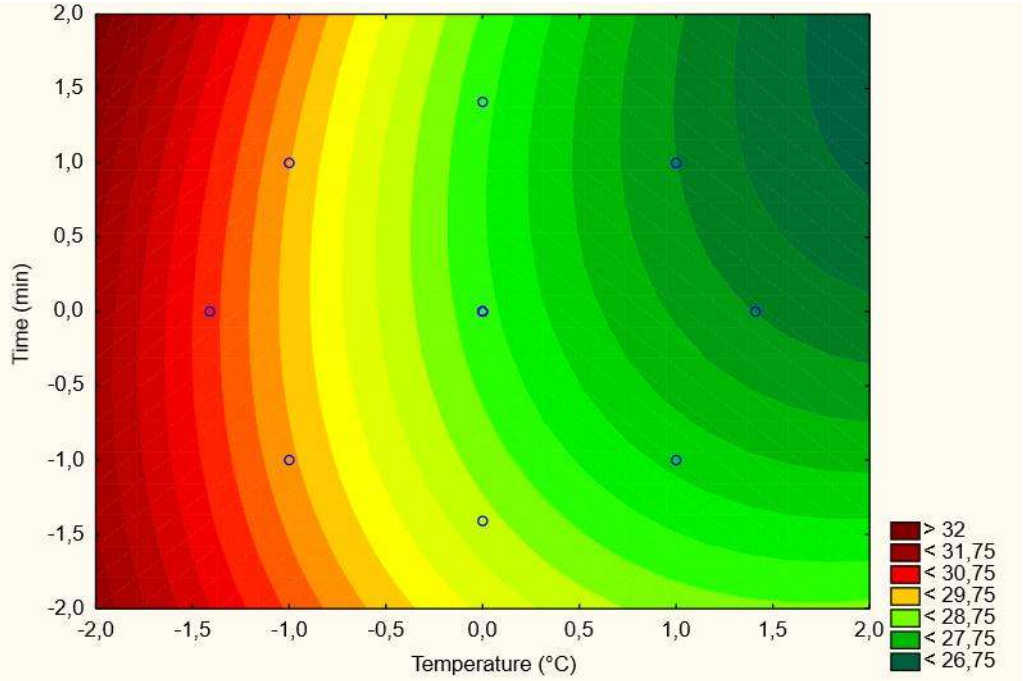


Fonte: Elaborado pelos autores.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Figura 6 - Gráfico da superfície de resposta 2D para o biochar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

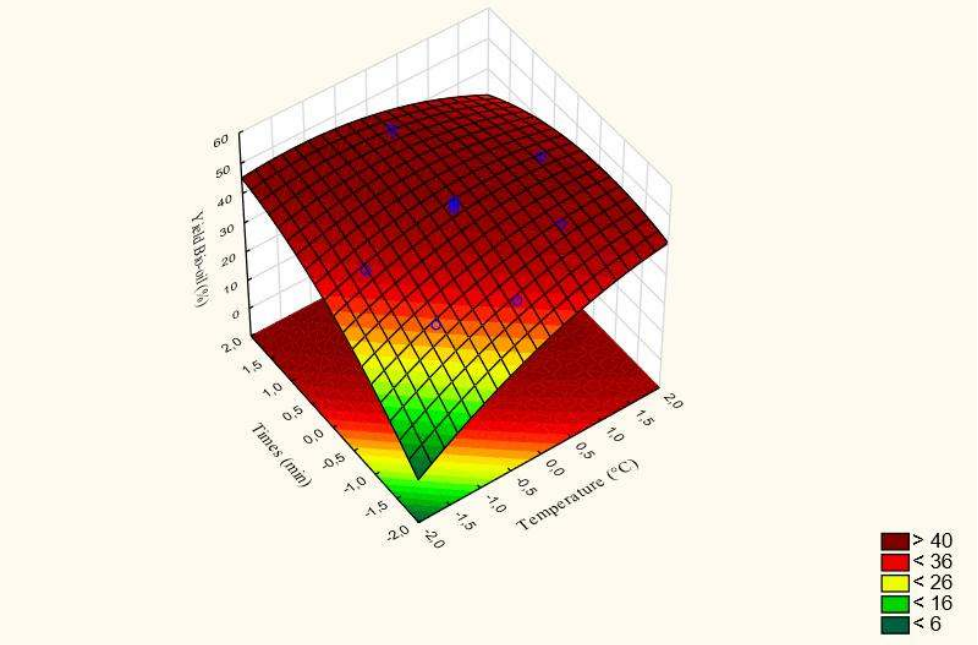
Em contraste, as Figuras 7 e 8 apresentam as superfícies de resposta para o rendimento de bio-óleo, evidenciando um perfil distinto em relação ao biochar. Verifica-se que tanto a temperatura quanto o tempo de residência exercem influência positiva sobre o rendimento de bio-óleo, sendo esse efeito mais acentuado quando ambos aumentam simultaneamente. A superfície apresenta uma região de máximo próxima ao ponto central do planejamento experimental (aproximadamente 525 °C e 60 minutos), no qual, valores críticos estimados pelo modelo apontam um máximo na temperatura codificada de -1,67 e no tempo de 2,55. No entanto, observa-se que o valor crítico de tempo se encontra fora da faixa experimental estudada, indicando que a condição ótima não foi plenamente atingida dentro do domínio investigado.

Com base nesses resultados, se sugere que a maximização do rendimento de bio-óleo está associada à combinação de temperaturas intermediárias e tempos de residência mais elevados. Para estudos futuros, recomenda-se a ampliação da faixa de tempo (por exemplo, até 120 minutos), especialmente em regiões próximas à temperatura ótima identificada.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

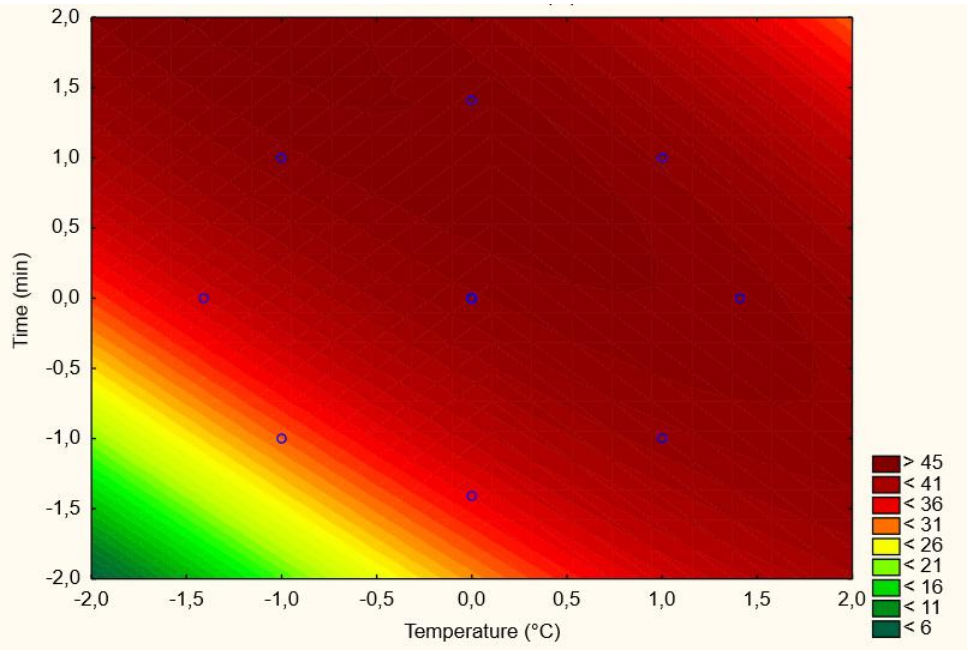
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Figura 7 - Gráfico da superfície de resposta 3D para o bio-óleo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 - Gráfico da superfície de resposta 2D para o bio-óleo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

3.5 Caracterização dos coprodutos

3.5.1 Poder Calorifico Superior

A análise do Poder Calorífico Superior (PCS) dos materiais obtidos, bio-óleo e biochar, fornece informações relevantes sobre seu potencial energético. O bio-óleo, com massa de 0,3044 g, apresentou PCS de 10,68 MJ kg^{-1}, indicando menor densidade energética. Em contraste, o biochar, com 0,3165 g, apresentou valor significativamente mais elevado, de 30,664 MJ kg^{-1}.

Essa diferença está associada, principalmente, à maior concentração de carbono fixo e à menor presença de compostos oxigenados no biochar, características resultantes do processo de carbonização. Por outro lado, o bio-óleo apresenta elevada fração de compostos oxigenados, o que contribui para a redução do seu poder calorífico, uma vez que essas moléculas possuem menor densidade energética.

Os valores obtidos são compatíveis com os dados obtidos por materiais semelhantes, na qual o biochar apresenta, em geral, maior poder calorífico em comparação ao bio-óleo, em função da maior concentração de carbono fixo e menor teor de oxigênio (Liu et al., 2019; Wang et al., 2020). Nesse contexto, Brózdowski et al. (2025) observaram que o bio-óleo apresentou poder calorífico na faixa de 18,7 a 22,5 MJ kg^{-1}, podendo atingir aproximadamente 24,1 MJ kg^{-1}. Em relação ao biochar, estudos como o de Tu et al. (2022) demonstram que o aumento da temperatura de pirólise eleva o teor de carbono fixo e, consequentemente, o poder calorífico do material. Esses resultados corroboram os dados obtidos neste estudo, nos quais o biochar apresentou maior densidade energética em comparação ao bio-óleo. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o biochar apresenta elevado poder calorífico, característica relevante para aplicações energéticas.

Essas aplicações evidenciam que, além do elevado desempenho energético, o biochar se destaca como um material promissor no contexto de fontes renováveis e sustentáveis (Liu et al., 2019).

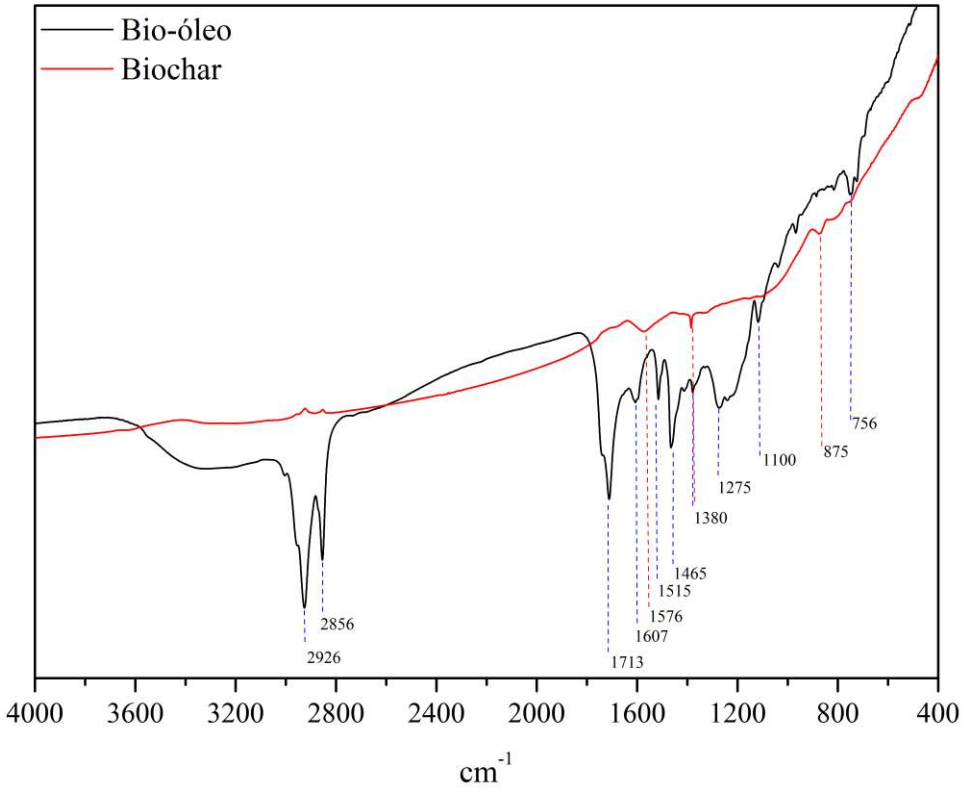
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

3.5.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR permitiu identificar os principais grupos funcionais presentes nos coprodutos, cujos resultados estão sintetizados na Figura 9 e Tabela 7.

Figura 9 - Grupos funcionais identificados no FTIR para o biochar e bio-óleo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o bio-óleo, observa-se, na região de 3400 cm^{-1} uma banda larga pequena, associada às vibrações de alongamento da ligação –OH, típica de grupos hidroxila. Isso sugere a presença de fenólicos, álcoois, ácidos carboxílicos e água, indicando compostos hidrossolúveis e umidade, mais intensamente presente no bio-óleo. Na região de 2926 cm^{-1} e 2856 cm^{-1}, as bandas representam o alongamento assimétrico e simétrico de C-H em alcanos, indicando grupos alifáticos nos hidrocarbonetos. A banda em 1713 cm^{-1}, está associada ao alongamento da ligação C=O, podendo indicar a presença de compostos oxigenados, como ácidos carboxílicos, ésteres e cetonas, derivados da decomposição da hemicelulose. A região de 1607 cm^{-1} e 1515 cm^{-1} representam vibrações de C=O e C=C, comuns em grupos carbonila e alcenos,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

típicos de estruturas lignocelulósicas. E a banda em 1275 cm^{-1}, associada ao estiramento C-O, é típica de éteres e fenóis, derivadas da lignina e hemicelulose. As bandas em torno de 1100 cm^{-1} refletem a presença de ligações C–O–C e $–CH_2$, características de estruturas derivadas de celulose e hemicelulose, refletindo o processo de decomposição dessas frações.

Para o biochar tem-se uma banda em 1576 cm^{-1}, indicando a presença de ligações C=C derivados da lignina que refletem a formação de uma estrutura carbonácea, se referindo a grupamentos aromáticos.

As bandas em 1465 cm^{-1} (bio-óleo) e 1380 cm^{-1} (biochar e bio-óleo) estão associadas à deformação das ligações CH_2, CH_3 e OH, indicando a presença de grupos metila derivados de compostos orgânicos alifáticos ou aromáticos, característicos de materiais lignocelulósicos. Essas bandas são mais intensas no bio-óleo, reforçando a presença de compostos aromáticos. Por fim, as bandas em 875 cm^{-1} (bio-óleo) e 756 cm^{-1} (biochar) indicam, respectivamente, a presença de ligações β-glicosídicas, características de polissacarídeos como a celulose, e vibrações fora do plano C-H em anéis aromáticos.

Os resultados obtidos neste estudo são semelhantes aos bio-óleo e biochar de origem lignocelulósica. A presença de bandas associadas a grupos hidroxila (~3400 cm^{-1}), ligações C–H alifáticas (2926–2856 cm^{-1}) e grupos carbonila (~1713 cm^{-1}) no bio-óleo também foi reportada por Mafra et al. (2024) e Salim et al. (2021), indicando a predominância de compostos oxigenados nessa fração. Adicionalmente, a maior intensidade de bandas associadas a ligações C–O–C (~1100 cm^{-1}) no bio-óleo, também observada por Sousa et al. (2024), reforça a maior concentração de compostos oxigenados na fase líquida.

Por outro lado, a presença de bandas relacionadas a estruturas aromáticas na região de 1576 cm^{-1} e em ~875 cm^{-1} está de acordo com os resultados descritos por Janu et al. (2021) e Guo et al. (2022), evidenciando o maior grau de aromaticidade e condensação estrutural do biochar.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

Tabela 7. Grupos funcionais identificados no FTIR.

Posição (cm^{-1})	Grupo Funcional	Biochar	Bio-óleo	Referência
~3400	–OH	Ausente	Presente e larga	(Mafra et al., 2024; Salim et al., 2021)
2926 - 2856	C–H (alcanos, estiramento assimétrico)	Ausente	Intensa	(Silva et al., 2023; Mafra et al., 2024)
1713	C=O	Ausente	Intensa	(Mafra et al., 2024; Salim et al., 2021)
1607, 1576, 1515	C=C (anéis aromáticos)	Presente	Presente	(Silva et al., 2023; Janu et al., 2021; Guo et al. 2022)
1465	CH_2, CH_3	Ausente	Intensa	(Mafra et al., 2024)
1380	CH_2, CH_3, OH	Fraca	Fraca	(Silva et al., 2023)
1275	C–O (ésteres e fenóis)	Ausente	Presente	(Silva et al., 2023)
~1100	C–O–C	Ausente	Presente e intensa	(Sousa et al. 2024)
875	C–H (vibração fora do plano em anéis aromáticos)	Presente	Ausente	(Sousa et al. 2024)
756	C–H (vibração fora do plano em anéis aromáticos)	Ausente	Presente	(Sousa et al. 2024)

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. Conclusão

A análise experimental demonstra que a distribuição dos produtos da pirólise do resíduo de buriti é fortemente dependente das condições operacionais avaliadas, temperatura e o tempo de pirólise. Verificou-se que o rendimento de biochar é favorecido em temperaturas mais baixas (30,75% a 450 °C por 30 minutos), enquanto a produção de bio-óleo é maximizada em condições de temperaturas intermediárias e tempos mais elevados (48,98% a 525 °C por 60 minutos). A análise estatística por meio da ANOVA indicou que a temperatura é o fator mais relevante para o rendimento de biochar, apresentando efeito predominantemente linear, enquanto o tempo não demonstrou influência significativa dentro da faixa estudada. Para o bio-óleo, por outro lado, tanto a temperatura quanto o tempo exerceram influência significativa, com destaque para o tempo de pirólise como variável de maior impacto. Ressalta-se que esses resultados representam condições mais favoráveis dentro da faixa experimental avaliada, não configurando uma otimização global do processo. Adicionalmente, a caracterização dos coprodutos mostrou que o

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

biochar apresenta elevado poder calorífico (30,664 MJ kg^{-1}), enquanto o bio-óleo (PCS 10,68 MJ kg^{-1}) possui composição rica em compostos oxigenados, conforme evidenciado pela análise de FTIR. Por fim, os resultados obtidos auxiliam na compreensão da influência das variáveis operacionais na pirólise do resíduo de buriti. Como perspectiva futura, recomenda-se a ampliação da faixa experimental, especialmente em relação ao tempo de residência, bem como a inclusão de variáveis adicionais, como taxa de aquecimento e granulometria, visando ao aprimoramento do modelo estatístico e à validação das condições identificadas e posterior caracterização dos coprodutos quanto a possível aplicação combustível.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001

5. Referências

ABOELELA, D. *et al.* Recent advances in biomass pyrolysis processes for bioenergy production: optimization of operating conditions. *Sustainability*, v. 15, n. 14, p. 11238, 2023.

AMENAGHAWON, A. N.; ANYALEWECHI, C. L.; OKIEIMEN, C. O. Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review. *Environmental Engineering Research*, 2021.

BRÓZDOWSKI, J. *et al.* Valorization of forest biomass through pyrolysis: a study on the energy potential of wood tars. *Energies*, v. 18, n. 5, p. 1113, 2025.

CONSUMI, M. *et al.* Analytical composition of flours through thermogravimetric and rheological combined methods. *Thermochimica Acta*, v. 711, p. 179204, 2022.

EMIOLA-SADIQ, T.; ZHANG, L.; DALAI, A. K. Thermal and kinetic studies on biomass degradation via thermogravimetric analysis: a combination of model-fitting and model-free approach. *ACS Omega*, v. 6, n. 34, p. 22233–22247, 2021.

FERREIRA, Charles Samuel Moraes *et al.* Torta de buriti (Mauritia flexuosa) como ingrediente alternativo em rações para juvenis de Tambaqui (Colossoma macropomum). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e24510817345, 11 jul. 2021.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

GÓMEZ-SANABRIA, A. *et al.* Potential for future reductions of global GHG and air pollutants from circular waste management systems. *Nature Communications*, v. 13, p. 106, 2022.

GUIMARÃES, Munique Gonçalves *et al.* Green energy technology from buriti (Mauritia flexuosa L. f.) for Brazilian agro-extractive communities. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 283, 6 mar. 2021.

GUO, W. *et al.* Comparison of 17β-estradiol adsorption on corn straw- and dewatered sludge-biochar in aqueous solutions. *Molecules*, v. 27, n. 8, p. 2567, 2022.

JANU, R. *et al.* Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature. *Carbon Resources Conversion*, v. 4, p. 36–46, 2021.

JERZAK, W.; ACHA, E.; LI, B. Comprehensive review of biomass pyrolysis: technologies, product distribution and mechanisms. *Energies*, v. 17, 2024.

LIU, W.-J.; JIANG, H.; YU, H.-Q. Emerging applications of biochar-based materials for energy storage and conversion. *Energy & Environmental Science*, v. 12, n. 6, p. 1751–1779, 2019.

MAFRA, E. R. M. L. *et al.* Comparative analysis of seed biomass from Amazonian fruits for activated carbon production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 14, n. 10, p. 11279–11293, 2024.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2016.

RACERO-GALARAGA, D. *et al.* Proximate analysis in biomass: standards, applications and key characteristics. *Results in Chemistry*, v. 12, p. 101886, 2024.

SALDARRIAGA, J. F. *et al.* Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA). *Fuel*, v. 140, p. 744–751, 2015.

SALIM, R.; ASIK, J.; SARJADI, M. S. Chemical functional groups of extractives, cellulose and lignin extracted from native *Leucaena leucocephala* bark. *Wood Science and Technology*, v. 55, n. 2, p. 295–313, 2021.

SILVA, J. B. S. da *et al.* Buriti (*Mauritia flexuosa* L.) wastes as potential lignocellulosic feedstock for bioenergy production: physicochemical properties, thermal behavior, and emission factors. *Industrial Crops and Products*, v. 206, p. 117689, 2023.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32

SOUSA, W. C. de; MORAIS, R. A.; ZUNIGA, A. G. D. Buriti (*Mauritia flexuosa*) shell flour: nutritional composition, chemical profile, and antioxidant potential as a strategy for valuing waste from native Brazilian fruits. *Food Research International*, v. 190, p. 114578, 2024.

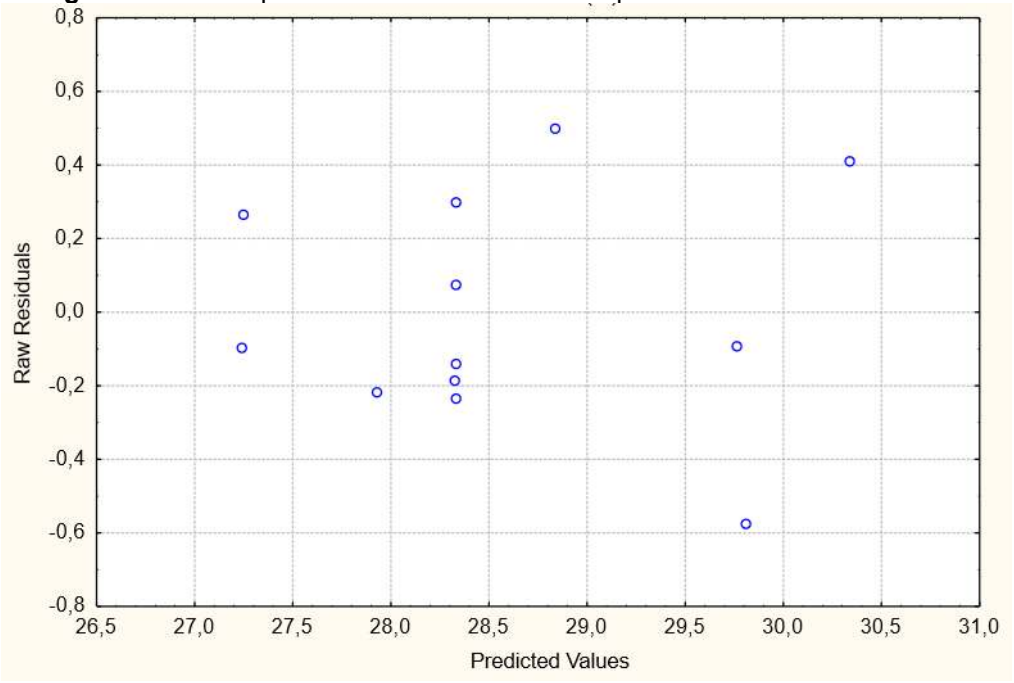
TU, P. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresources and Bioprocessing*, v. 9, n. 131, 2022.

WANG, G. *et al.* A review of recent advances in biomass pyrolysis. *Energy & Fuels*, v. 34, n. 12, p. 15557–15578, 2020.

WANG, W. *et al.* Current challenges and perspectives for the catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-value products. *Catalysts*, v. 12, n. 12, p. 1524, 2022.

APÊNDICE

Figura A. Valores preditos vs. Valores residuais para o rendimento do biochar.

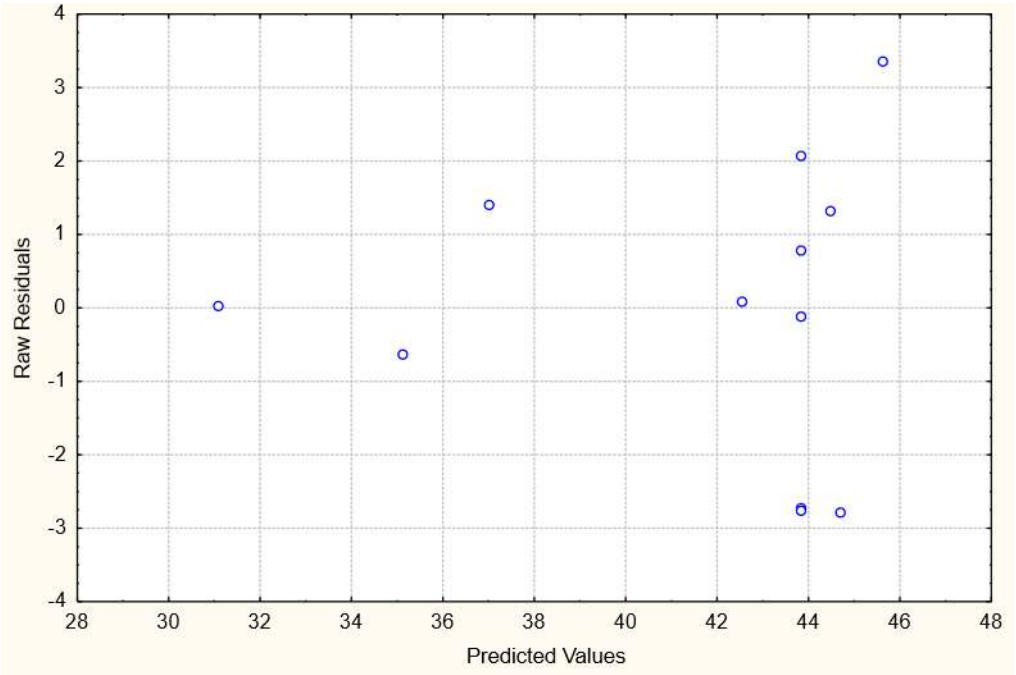


Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura B. Valores preditos vs. Valores residuais para o rendimento do bio-óleo.

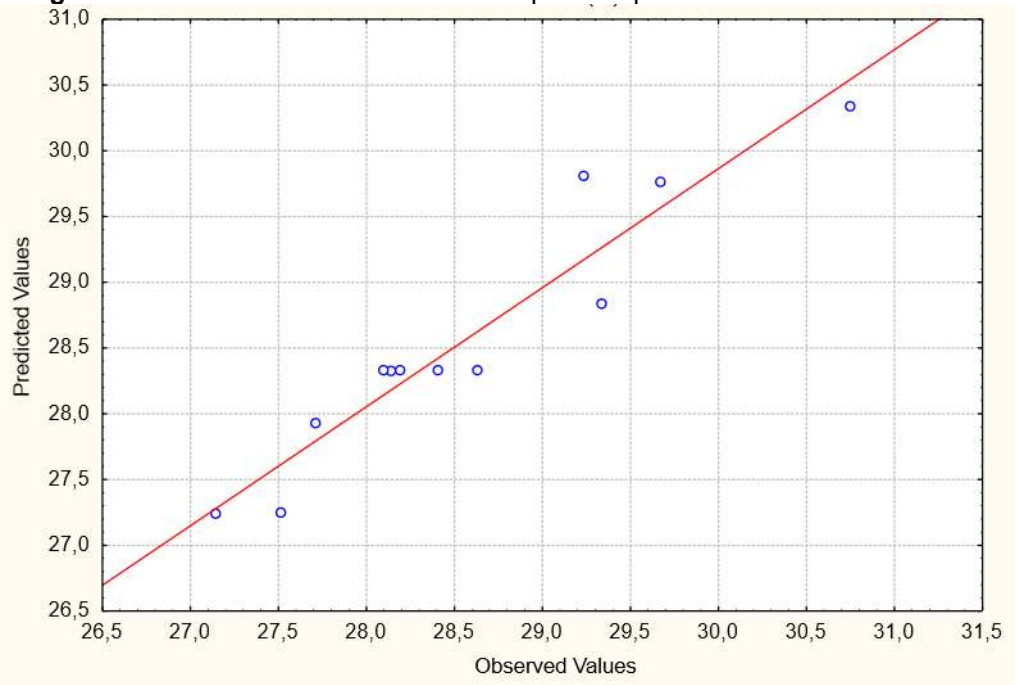
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura C. Valores observados vs. Valores preditos para o rendimento do biochar.

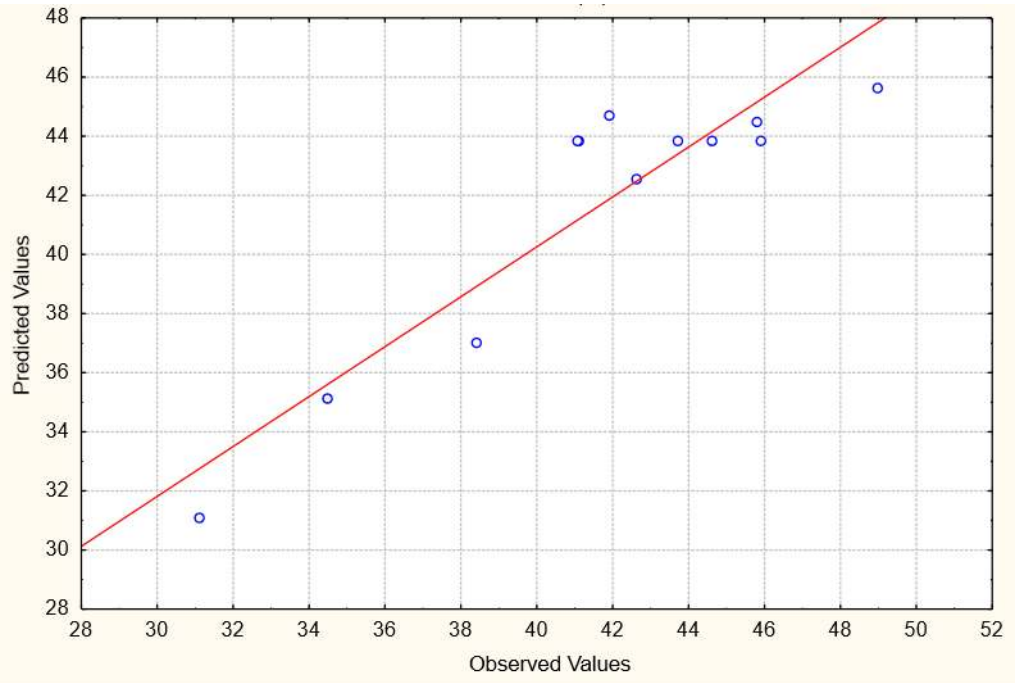


Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura D. Valores observados vs. Valores preditos para o rendimento do bio-óleo.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-32



Fonte: Elaborado pelos autores.