

DO CAMPUS AO LABORATÓRIO: VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PINUS COMO FONTE DE FENÓIS TOTAIS

Alexandre Santuchi da Cunha¹, Ana Beatriz Sousa Machado¹, Nicolý Carneiro Pinheiro de Oliveira¹, Míriam Tvrzská de Gouvêa¹

¹Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia, São Paulo, Brasil
(alexandre.santuchi@mackenzie.br)

Resumo: Este trabalho avaliou o potencial de biomassa residual de *Pinus spp.* do campus Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) como fonte de compostos fenólicos. A extração assistida por ultrassom (EAU) foi realizada com água deionizada e a quantificação pelo método de Folin-Ciocalteu a 760 nm. A curva analítica apresentou $R^2 = 0,998$ e o extrato indicou 823 ± 3 mg EAG/L, evidenciando potencial para valorização química de resíduos vegetais em rotas sustentáveis.

Palavras-chave: *Pinus*; Resíduos vegetais; Ultrassom; Folin-Ciocalteu; Fenóis totais.

INTRODUÇÃO

A valorização de resíduos orgânicos tem se tornado uma estratégia relevante para instituições que buscam integrar sustentabilidade, pesquisa aplicada e formação de estudantes em engenharia. Em *campi* universitários, resíduos provenientes de podas, varrição, manejo de jardins e manutenção de áreas verdes são gerados de forma contínua e, muitas vezes, tratados apenas como materiais a serem coletados e destinados adequadamente. Entretanto, quando observados sob a perspectiva da economia circular e da biorrefinaria, esses resíduos deixam de representar apenas um passivo operacional e passam a ser compreendidos como fontes potenciais de energia, materiais e compostos químicos de maior valor agregado (Ferreira-Santos et al., 2020; Flores et al., 2021; Yusoff et al., 2022).

Este trabalho está inserido em uma sequência de ações iniciadas em 2022 na UPM, envolvendo graduandos da Escola de Engenharia com apoio do Instituto Presbiteriano Mackenzie (IPM), voltadas ao mapeamento e à valorização dos resíduos orgânicos produzidos no *campus* de Higienópolis. Em estudo anterior, foi apresentado um panorama de caracterização de resíduos provenientes do manejo dos jardins do *campus*, com vistas à proposição futura de uma política institucional de valorização desses materiais, que representam parcela expressiva dos resíduos orgânicos gerados diariamente na universidade (Mota et al., 2025). Nesse contexto, a presente investigação aprofunda a abordagem de valorização, deslocando o foco da caracterização energética para a recuperação de compostos bioativos, especificamente compostos fenólicos extraídos de biomassa residual de *Pinus spp.*

A escolha do *Pinus* é justificada tanto por sua relevância como biomassa florestal quanto por seu potencial químico. Resíduos de *Pinus* (RP) podem conter frações lignocelulósicas, como celulose, hemicelulose e lignina, além de compostos extrativos em menores proporções, incluindo fenóis, flavonoides, taninos, ácidos fenólicos, terpenos e outras substâncias associadas ao metabolismo vegetal. Esses compostos têm despertado interesse por sua possível aplicação em alimentos, cosméticos, fármacos, materiais funcionais e sistemas antioxidantes naturais (Ferreira-Santos et al., 2020; Duarte et al., 2022; Zhang et al., 2024).

No Brasil, espécies de *Pinus* são amplamente exploradas em cadeias produtivas florestais e industriais, como madeira serrada, celulose, painéis e biomassa energética. Como consequência, são gerados resíduos em diferentes etapas de manejo, processamento e manutenção. Barbosa et al. (2014), ao avaliarem resíduos de serraria de *Pinus elliottii* para produção de celulose *kraft*, observaram que esses materiais apresentam composição compatível com rotas industriais de aproveitamento. Embora a aplicação energética ou estrutural de RP seja frequentemente discutida, a recuperação de compostos de menor concentração e maior valor agregado, como fenóis e polifenóis, representa uma alternativa complementar dentro do conceito de biorrefinaria e da bioeconomia circular.

A Figura 1 sintetiza rotas possíveis de valorização da biomassa lignocelulósica, destacando o papel do pré-tratamento e do ultrassom como alternativa para intensificação de processos (Flores et al., 2021). Essa abordagem é coerente com a proposta deste trabalho, no qual a biomassa residual é submetida à EAU visando à recuperação de fenóis totais.

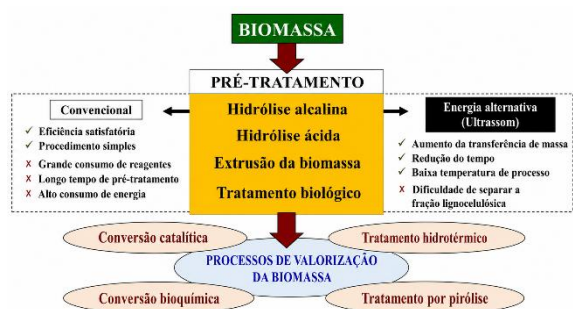


Figura 1. Rotas de valorização da biomassa lignocelulósica e aplicação do ultrassom em processos de conversão.

Fonte: Adaptado de Flores et al. (2021).

Os compostos fenólicos constituem uma classe ampla de metabólitos secundários vegetais caracterizados pela presença de grupos hidroxila ligados a anéis aromáticos. Essas moléculas estão associadas a mecanismos de defesa das plantas contra radiação ultravioleta, microrganismos, estresse oxidativo e danos ambientais. Em termos tecnológicos, os fenóis são investigados principalmente por sua atividade antioxidante, uma vez que podem doar elétrons ou átomos de hidrogênio, contribuindo para estabilizar espécies reativas e retardar processos oxidativos (Silva et al., 2010; Ferreira-Santos et al., 2020; Yusoff et al., 2022).

Em resíduos de *Pinus elliottii*, Zhang et al. (2024) demonstraram que a extração assistida por ultrassom pode ser empregada para recuperação de polifenóis de acículas, com avaliação de atividade antioxidante, identificação por técnicas cromatográficas e modelagem cinética. Esse estudo reforça a relevância de investigar RP em rotas de valorização de biomassa residual, ainda que o presente trabalho tenha caráter preliminar e esteja focado na quantificação de fenóis totais por método colorimétrico.

Para a recuperação desses compostos, técnicas de extração mais eficientes e ambientalmente favoráveis têm sido progressivamente estudadas. A EAU destaca-se entre essas alternativas por intensificar a transferência de massa em sistemas sólido-líquido. Durante a sonicação, ocorre o fenômeno de cavitação acústica, caracterizado pela formação, crescimento e colapso de microbolhas no meio líquido. Esse colapso pode gerar microjatos, turbulência localizada e alterações na superfície da matriz vegetal, favorecendo a ruptura parcial de estruturas celulares, o aumento da permeabilidade da biomassa e a difusão dos compostos solubilizáveis para o solvente extrator (Vernès et al., 2019; Dias et al., 2021; Flores et al., 2021; Yusoff et al., 2022; Albarri; Sahin, 2023). O mecanismo de cavitação acústica associado à extração por ultrassom é apresentado na Figura 2. Esse fenômeno explica a intensificação da

transferência de massa observada em processos de extração de compostos bioativos de matrizes vegetais (Flores et al., 2021).

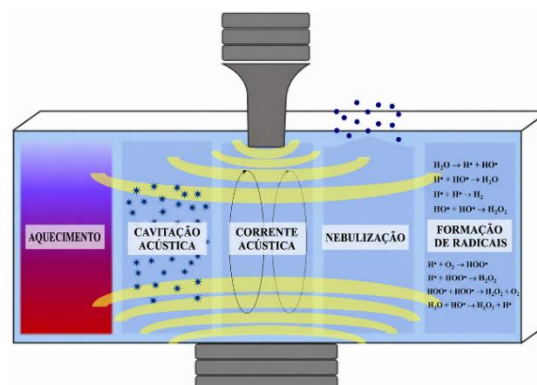


Figura 2. Mecanismo de cavitação acústica associado à extração assistida por ultrassom.

Fonte: Adaptado de Flores et al. (2021).

Além da intensificação do processo, a EAU pode ser conduzida em condições relativamente brandas de temperatura e tempo, reduzindo a necessidade de longos períodos de contato e de grandes volumes de solventes. Albarri e Sahin (2023) demonstraram que a EAU de moléculas bioativas de *Moringa oleifera* pode ser interpretada a partir de parâmetros cinéticos, termodinâmicos e de transferência de massa, reforçando a importância do controle das condições operacionais. De forma complementar, Yang et al. (2020) avaliaram o pré-tratamento de madeira de *Pinus* por ultrassom e micro-ondas em meio organossolve, mostrando a relevância de tecnologias assistidas por energia física no aproveitamento de frações lignocelulósicas e fenólicas. Revisões recentes também apontam que a eficiência da EAU depende de variáveis como tempo, temperatura, frequência, potência, granulometria e composição e tipo do solvente (Flores et al., 2021; Yusoff et al., 2022).

Duarte et al. (2022), ao estudarem resíduos de pinheiro-marítimo, demonstraram que a EAU pode ser empregada para obtenção de extratos enriquecidos em polifenóis, reforçando o potencial dessa tecnologia para a valorização de resíduos florestais. Embora as condições experimentais e a espécie vegetal sejam distintas, esse tipo de estudo fundamenta a aplicação de rotas extrativas intensificadas à recuperação de compostos fenólicos de biomassas de *Pinus*.

A quantificação de fenóis totais pode ser realizada pelo método de Folin-Ciocalteu, uma técnica colorimétrica amplamente utilizada em análises de extratos vegetais. O método baseia-se na redução do reagente de Folin-Ciocalteu em meio alcalino, formando um complexo azul cuja intensidade é

proporcional à capacidade redutora da amostra. A quantificação é realizada por comparação com uma curva de calibração, normalmente preparada com ácido gálico, e os resultados são expressos como equivalentes de ácido gálico (Singleton; Rossi, 1965; Silveira, 2013; Kupina et al., 2019).

Embora seja uma técnica consolidada, o método de Folin-Ciocalteu não deve ser interpretado como identificação molecular específica dos fenóis presentes no extrato. A resposta analítica pode sofrer contribuição de outras substâncias redutoras, como ácido ascórbico, açúcares redutores, alguns aminoácidos e outros compostos presentes na matriz vegetal (Kupina et al., 2019; Pico et al., 2020). Assim, os resultados são adequadamente discutidos como teor de fenóis totais expressos em equivalentes de ácido gálico, ou como parâmetro inicial de triagem do potencial redutor associado aos extratos.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a biomassa residual de *Pinus* provenientes de podas preventivas no *campus* Higienópolis da UPM como fonte de compostos fenólicos totais. Para isso, foi empregada EAU utilizando água deionizada como solvente extrator, seguida de quantificação pelo método de Folin-Ciocalteu com leitura espectrofotométrica em 760 nm. O estudo busca contribuir para a construção de rotas de valorização química de resíduos vegetais, conectando ensino experimental, pesquisa aplicada e sustentabilidade institucional.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no contexto do projeto integrador “Do Campus ao Laboratório: Aplicações Sustentáveis de Resíduos Vegetais da UPM”, vinculado à Escola de Engenharia da UPM. O procedimento experimental contemplou o preparo e caracterização da biomassa, a extração assistida por ultrassom, a separação e concentração do extrato, a reação colorimétrica com o reagente de Folin-Ciocalteu e a leitura por espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis).

As etapas adotadas foram definidas a partir de práticas laboratoriais aplicadas à extração e quantificação de compostos fenólicos em matrizes vegetais, com base em procedimentos compatíveis com estudos de valorização de resíduos lignocelulósicos e análise espectrofotométrica de extratos vegetais (Singleton; Rossi, 1965; Silveira, 2013; Kupina et al., 2019; Lucas et al., 2022). O fluxo experimental geral é apresentado na Figura 3.

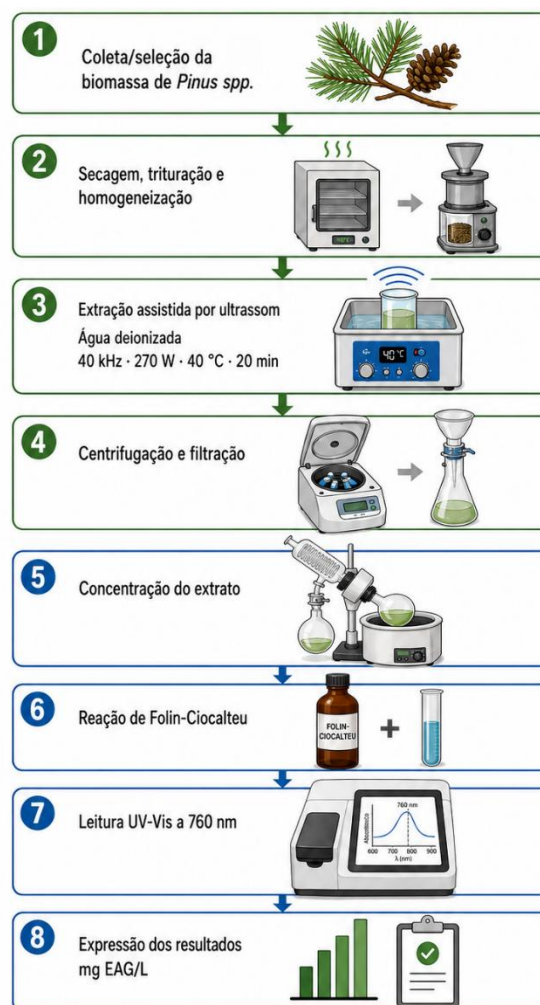


Figura 3. Fluxo experimental para obtenção e quantificação de fenóis totais em biomassa de *Pinus*.

O emprego de água deionizada na extração e de água ultrapura nas etapas analíticas buscou reduzir possíveis interferências em ensaios colorimétricos e espectrofotométricos, em consonância com recomendações gerais de controle de qualidade laboratorial (APHA, 2017).

A biomassa avaliada neste trabalho correspondeu a resíduo vegetal de *Pinus* do *campus* Higienópolis da UPM. Após a coleta/seleção do material, a amostra foi seca, triturada e homogeneizada, de modo a reduzir a heterogeneidade da matriz e favorecer o contato entre o sólido e o solvente extrator. Essa etapa é relevante em processos de extração sólido-líquido, pois a redução do tamanho de partícula tende a aumentar a área superficial disponível, intensificando a transferência de massa e favorecendo a liberação de compostos solubilizáveis para a fase líquida (Dias et al., 2021; Yusoff et al., 2022). As etapas de obtenção e preparo da biomassa residual de *Pinus* são apresentadas na Figura 4.



Figura 4. Obtenção e preparo da biomassa residual de *Pinus* utilizada nos ensaios: (a) resíduo vegetal de *Pinus* no campus Higienópolis da UPM; (b) amostra selecionada para processamento; (c) equipamento utilizado para trituração da biomassa; (d) biomassa residual seca e triturada empregada na EAU.

A extração dos compostos bioativos foi realizada utilizando água deionizada como solvente extrator. Para o ensaio, foram empregados 10,0 g de RP e 100 mL de água deionizada, mantendo-se razão sólido de 1:10 (g/mL). A escolha da água deionizada está alinhada à proposta de empregar um solvente verde, acessível e de baixo impacto ambiental, compatível com etapas iniciais de triagem de compostos solubilizáveis em biomassas vegetais. Embora solventes hidroalcoólicos sejam frequentemente utilizados para aumentar a extração de fenóis de diferentes polaridades, neste trabalho optou-se por avaliar a capacidade da água deionizada em recuperar compostos fenólicos totais em uma rota experimental sustentável e de baixo custo (Ferreira-Santos et al., 2020; Duarte et al., 2022).

Após a preparação da suspensão sólido-solvente, o sistema foi submetido à EAU em banho ultrassônico termostatizado, operando a 40 kHz, 270 W e 40 °C durante 20 min. Essas condições foram adotadas para promover a extração dos compostos solubilizáveis da biomassa para a água deionizada, mantendo-se controle de tempo, temperatura, frequência e potência durante o ensaio.

Ao término da etapa de sonicação, a suspensão foi centrifugada a 4000 rpm por 10 min, visando separar o sobrenadante do material sólido residual. O sobrenadante obtido foi filtrado a vácuo para remoção de partículas suspensas e, em seguida, concentrado em evaporador rotativo sob vácuo, com banho aquecido a 50 °C. O extrato concentrado foi armazenado sob refrigeração em frasco devidamente

identificado até a etapa de quantificação dos compostos fenólicos totais. As principais etapas experimentais de extração, centrifugação, concentração e obtenção do extrato concentrado estão apresentadas na Figura 5.

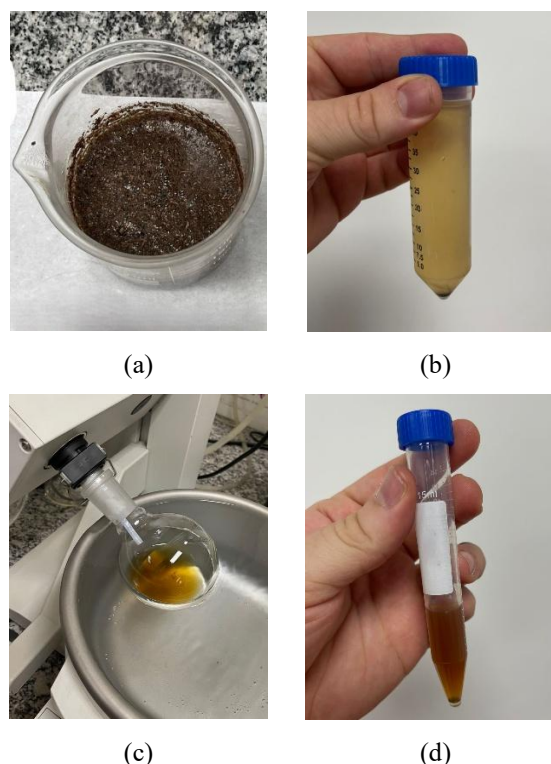


Figura 5. Etapas experimentais da extração assistida por ultrassom da biomassa de *Pinus*: (a) amostra após tratamento ultrassônico; (b) extrato após centrifugação; (c) concentração em evaporador rotativo sob vácuo; (d) extrato concentrado obtido após remoção parcial do solvente.

A determinação dos fenóis totais foi realizada pelo método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (Singleton; Rossi, 1965; Silveira, 2013; Kupina et al., 2019). Foram utilizados ácido gálico PA, metanol PA, reagente de Folin-Ciocalteu, carbonato de sódio PA e água ultrapura. A curva de calibração foi construída a partir de solução-mãe de ácido gálico em metanol, com concentração de 500 mg/L. A partir dessa solução, foram preparados padrões nas concentrações de 25, 50, 100, 150, 200 e 250 mg/L.

O branco analítico e os padrões de ácido gálico utilizados na curva de calibração são apresentados na Figura 6, sendo possível observar o aumento da intensidade da coloração azul com o aumento da concentração do padrão.

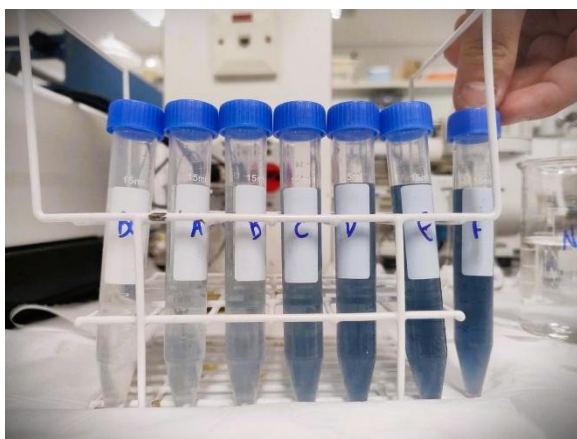


Figura 6. Branco analítico e padrões de ácido gálico, utilizados na curva de calibração do método de Folin-Ciocalteu antes da leitura em UV-Vis a 760 nm.

Para o desenvolvimento da reação, foram adicionados 500 μ L da solução padrão, do branco ou da amostra, 2,0 mL de água ultrapura, 500 μ L do reagente de Folin-Ciocalteu e 5,0 mL de solução aquosa de carbonato de sódio 7% (m/m). O volume final foi ajustado para 12,0 mL com água ultrapura. As soluções foram agitadas por aproximadamente 10 s e mantidas em repouso por 30 min a 40 °C, protegidas da luz. Após o tempo de reação, as soluções foram centrifugadas a 4000 rpm por 5 min e analisadas em espectrofotômetro UV-Vis.

A leitura espectrofotométrica foi realizada em 760 nm. Esse comprimento de onda foi adotado para acompanhamento do complexo azul formado na reação de Folin-Ciocalteu, sendo compatível com procedimentos analíticos empregados para determinação de fenóis totais em extratos vegetais, nos quais são comuns leituras próximas de 760-765 nm, a depender do protocolo e do equipamento utilizado (Singleton; Rossi, 1965; Silveira, 2013; Kupina et al., 2019; Lucas et al., 2022).

As leituras da amostra de RP foram realizadas em triplicata. Os resultados foram corrigidos pelo fator de diluição 10 e expressos em mg de equivalentes de ácido gálico por litro de extrato (mg EAG/L). Foram calculados média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). A equação da curva analítica e o coeficiente de determinação são apresentados na seção de Resultados e Discussão, pois correspondem a resultados experimentais obtidos neste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A curva de calibração obtida com ácido gálico apresentou boa linearidade na faixa de 25 a 250 mg/L, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,998$. Esse resultado indica que, nas condições adotadas, a resposta espectrofotométrica foi adequada para a quantificação do extrato de *Pinus* pelo método de

Folin-Ciocalteu. A Tabela 1 apresenta os valores de absorbância obtidos para os padrões de calibração.

Tabela 1. Padrões de ácido gálico utilizados na curva de calibração pelo método de Folin-Ciocalteu em espectrofotômetro UV-Vis a 760 nm.

Concentração (mg/L)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
25	0,148	0,147	0,148	0,148
50	0,265	0,265	0,265	0,265
100	0,516	0,516	0,516	0,516
150	0,810	0,811	0,813	0,811
200	1,009	1,013	1,012	1,011
250	1,255	1,256	1,262	1,258

A curva analítica foi descrita pela Equação 1:

$$A = 0,026 + 0,005C \quad (1)$$

em que A representa a absorbância e C corresponde à concentração de ácido gálico em mg/L.

A representação gráfica da curva de calibração é apresentada na Figura 7, evidenciando a linearidade entre a concentração de ácido gálico e a absorbância obtida após a reação de Folin-Ciocalteu.

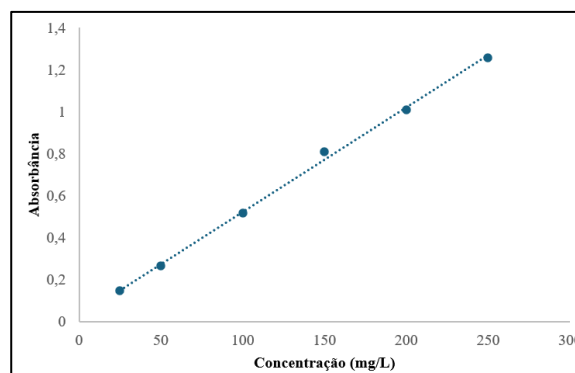


Figura 7. Curva de calibração do ácido gálico pelo método de Folin-Ciocalteu a 760 nm.

A obtenção de uma curva com R^2 próximo de 1 demonstra que a faixa de calibração foi apropriada para o ensaio realizado. Em métodos colorimétricos, a qualidade da curva analítica é fundamental, pois a concentração das amostras é estimada por interpolação da resposta de absorbância em relação aos padrões. O resultado obtido também indica boa consistência no preparo dos padrões e na leitura espectrofotométrica.

A amostra de *Pinus* apresentou teores de fenóis totais de 825,80, 822,29 e 820,33 mg EAG/L nas três determinações. A média obtida foi de 823 ± 3 mg EAG/L, com coeficiente de variação de 0,34%, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Teor de fenóis totais no extrato de *Pinus elliottii* obtido por extração assistida por ultrassom, com dados determinados em triplicata.

Parâmetro	Valor
Amostra	<i>Pinus elliottii</i>
Triplicata 1 (mg EAG/L)	825,80
Triplicata 2 (mg EAG/L)	822,29
Triplicata 3 (mg EAG/L)	820,33
Média ± DP (mg EAG/L)	823 ± 3
CV (%)	0,34

A baixa variação entre as triplicatas evidencia boa repetibilidade experimental para a etapa de reação colorimétrica e leitura no UV-Vis. O coeficiente de variação inferior a 1% sugere que o preparo das soluções, o tempo de reação, a leitura espectrofotométrica e a correção pelo fator de diluição foram conduzidos de forma consistente. Essa estabilidade analítica é especialmente importante em estudos de triagem, nos quais se busca avaliar se uma biomassa apresenta potencial para investigações posteriores mais detalhadas.

O valor de 823 mg EAG/L indica que o extrato aquoso de *Pinus* obtido por ultrassom apresentou resposta expressiva no método de Folin-Ciocalteu. Embora o resultado não permita identificar individualmente os compostos presentes, ele demonstra que a biomassa avaliada contém substâncias redutoras compatíveis com a presença de compostos fenólicos totais. Esse resultado é coerente com a literatura que descreve subprodutos e resíduos de *Pinus* como fontes de compostos fenólicos, incluindo flavonoides, ácidos fenólicos, taninos condensados e outros extrativos de interesse (Ferreira-Santos et al., 2020). Duarte et al. (2022), ao avaliarem resíduos de *Pinus pinaster* por extração assistida por ultrassom com solventes eutéticos profundos, reportaram concentrações médias de polifenóis totais de 274,38 mg/g para acículas e 314,62 mg/g para casca, em base seca. Já Zhang et al. (2024), trabalhando com acículas de *Pinus elliottii* extraídas por ultrassom em solução etanólica, obtiveram teor máximo de 40,37 mg EAG/g. Como esses valores são expressos em base de massa seca, enquanto o presente trabalho apresenta os resultados em mg EAG/L de extrato aquoso, a comparação deve ser interpretada de forma qualitativa, reforçando o potencial de resíduos de *Pinus* como fonte de compostos fenólicos.

A presença de compostos fenólicos em resíduos de *Pinus* pode estar associada à composição química da matriz vegetal. Além da celulose, hemicelulose e lignina, materiais de origem florestal contêm

extrativos que exercem funções fisiológicas importantes na planta. Esses compostos podem atuar em mecanismos de proteção contra microrganismos, radiação, oxidação e estresses ambientais. Do ponto de vista tecnológico, a recuperação desses extrativos permite agregar valor a resíduos que, de outra forma, poderiam ser destinados apenas à compostagem, disposição externa, uso energético direto ou outras aplicações de menor valor agregado.

A EAU mostrou-se adequada como etapa inicial de recuperação desses compostos. O uso de 20 min de sonicação a 40 °C representa uma condição relativamente branda, o que pode ser vantajoso para compostos naturais sensíveis à degradação térmica. O emprego de água deionizada também contribui para a compatibilidade da rota com princípios de química verde, principalmente por se tratar de um solvente de menor impacto em comparação a alternativas como metanol, acetona ou solventes clorados.

Os resultados obtidos neste trabalho são preliminares, mas dialogam com estudos recentes sobre extração assistida por ultrassom em biomassas vegetais. Albarri e Sahin (2023) demonstraram que a EAU pode acelerar a extração de moléculas bioativas e favorecer a transferência de massa em matrizes vegetais. Yusoff et al. (2022) destacam que compostos fenólicos, flavonoides, timóis, saponinas e proteínas podem ser extraídos por ultrassom, desde que as condições operacionais sejam adequadamente ajustadas. No caso específico de matrizes de *Pinus*, Yang et al. (2020) e Zhang et al. (2024) reforçam que tratamentos assistidos por ultrassom podem favorecer a recuperação de compostos de interesse a partir de madeira ou acículas de *Pinus*. Assim, o resultado observado para RP no presente estudo sustenta a continuidade da investigação em condições experimentais mais amplas.

Em estudos com resíduos de pinheiro-marítimo, Duarte et al. (2022) demonstraram que a extração assistida por ultrassom pode ser utilizada para obtenção de extratos enriquecidos em polifenóis a partir de resíduos florestais, reforçando a pertinência da estratégia aplicada neste trabalho. Embora as condições experimentais e a espécie vegetal não sejam idênticas, os resultados convergem quanto à possibilidade de recuperar compostos fenólicos de matrizes de *Pinus* por rotas extrativas intensificadas.

A resposta obtida também reforça a importância de se ampliar a visão sobre os resíduos vegetais do campus da UPM. O estudo anterior conduzido no âmbito das ações iniciadas em 2022 destacou a necessidade de avançar no mapeamento, caracterização e proposição de alternativas para resíduos provenientes do manejo dos jardins do campus de Higienópolis. Neste trabalho, a biomassa de *Pinus* é avaliada não apenas como resíduo



orgânico ou potencial substrato energético, mas como fonte de compostos químicos com possível valor agregado. Essa mudança de perspectiva é relevante para a construção de uma política de valorização mais abrangente, capaz de considerar diferentes rotas conforme a natureza do resíduo.

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações devem ser consideradas. O método de Folin-Ciocalteu é sensível, simples e amplamente utilizado, mas sua resposta está relacionada à capacidade redutora total da amostra. Assim, outras substâncias redutoras eventualmente presentes no extrato podem contribuir para o sinal analítico. Por isso, o resultado deve ser interpretado como teor de fenóis totais expresso em equivalentes de ácido gálico, e não como quantificação específica de moléculas fenólicas individuais (Kupina et al., 2019; Pico et al., 2020).

Além disso, os resultados foram expressos em mg EAG/L de extrato aquoso. Para comparações mais amplas com a literatura, recomenda-se que estudos futuros também expressem o teor de fenóis totais em base de massa seca da biomassa, como mg EAG/g de biomassa seca. Para isso, será necessário padronizar rigorosamente o volume final do extrato concentrado e o rendimento de extração. A obtenção desses dados permitirá comparar diferentes condições de extração e avaliar o real rendimento de recuperação por massa de resíduo processado. Também será relevante comparar, em etapas posteriores, a extração com água deionizada e com soluções hidroalcoólicas, avaliando o ganho de extração frente ao aumento de complexidade do processo.

Como continuidade, recomenda-se avaliar o efeito de variáveis operacionais, como tempo de sonicação, temperatura, razão sólido, granulometria, composição e tipo do solvente e número de ciclos de extração. Também é recomendável realizar análises complementares de atividade antioxidante, como ensaios com 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico) (ABTS) e poder antioxidante redutor férrico (FRAP). Além disso, técnicas como cromatografia líquida de alta eficiência com detector de arranjo de diodos (HPLC-DAD) ou cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS) podem contribuir para identificar os principais compostos responsáveis pela resposta colorimétrica observada.

CONCLUSÃO

A biomassa residual de *Pinus* avaliada neste trabalho apresentou potencial como fonte de compostos fenólicos totais. A extração assistida por ultrassom com água deionizada, seguida da quantificação pelo método de Folin-Ciocalteu a 760 nm, resultou em teor médio de 823 ± 3 mg EAG/L, com baixa

dispersão entre as triplicatas e coeficiente de variação de 0,34%.

A curva analítica construída com ácido gálico apresentou $R^2 = 0,998$, indicando linearidade adequada na faixa de concentração utilizada. Os resultados sugerem que resíduos de *Pinus* spp. podem ser inseridos em rotas de valorização química de resíduos vegetais do campus da UPM, complementando ações institucionais iniciadas em 2022 para mapeamento e valorização dos resíduos orgânicos do campus de Higienópolis.

O estudo reforça a possibilidade de integrar ensino, pesquisa e sustentabilidade por meio de práticas laboratoriais aplicadas à realidade institucional. Como próximos passos, recomenda-se otimizar as condições de extração, expressar os resultados em base de massa seca de biomassa, avaliar atividade antioxidante e realizar caracterização cromatográfica dos compostos presentes no extrato.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Presbiteriana Mackenzie, à Escola de Engenharia e ao Instituto Presbiteriano Mackenzie pelo apoio às ações vinculadas ao mapeamento e valorização de resíduos orgânicos do campus de Higienópolis. Agradecem também aos estudantes e colaboradores envolvidos nas etapas de preparo das biomassas, extração, análise espectrofotométrica e desenvolvimento das atividades laboratoriais do projeto integrador “Do Campus ao Laboratório: Aplicações Sustentáveis de Resíduos Vegetais da UPM”.

REFERÊNCIAS

- ALBARRI, R.; SAHIN, S. Kinetics, thermodynamics, and mass transfer mechanism of the ultrasound-assisted extraction of bioactive molecules from Moringa oleifera leaves. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 13, n. 9, p. 7919-7926, 2023.
- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington: American Public Health Association, 2017.
- BARBOSA, L. C.; PEDRAZZI, C.; FERREIRA, É. S.; SCHNEID, G. N.; WILLE, V. K. D. Avaliação dos resíduos de uma serraria para a produção de celulose kraft. *Ciência Florestal*, v. 24, n. 2, p. 491-500, 2014.
- DIAS, A. L. B.; AGUIAR, A. C.; ROSTAGNO, M. A. Extraction of natural products using supercritical fluids and pressurized liquids assisted by ultrasound: current status and trends. *Ultrasonics Sonochemistry*, Amsterdam, v. 74, p. 105584, 2021.



- DUARTE, H.; GOMES, V.; ALIAÑO-GONZÁLEZ, M. J.; FALEIRO, L.; ROMANO, A.; MEDRONHO, B. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from maritime pine residues with deep eutectic solvents. *Foods*, v. 11, n. 23, p. 3754, 2022.
- FERREIRA-SANTOS, P.; ZANUSO, E.; GENISHEVA, Z.; ROCHA, C. M. R.; TEIXEIRA, J. A. Green and sustainable valorization of bioactive phenolic compounds from Pinus by-products. *Molecules*, v. 25, n. 12, p. 2931, 2020.
- FLORES, Erico M. M.; CRAVOTTO, Giancarlo; BIZZI, Cezar A.; SANTOS, Daniel; IOP, Gabrielle D. Ultrasound-assisted biomass valorization to industrial interesting products: state-of-the-art, perspectives and challenges. *Ultrasonics Sonochemistry*, Amsterdam, v. 72, p. 105455, 2021.
- KUPINA, S.; FIELDS, C.; ROMAN, M. C.; BRUNELLE, S. L. Determination of total phenolic content using the Folin-C assay: single-laboratory validation, First Action 2017.13. *Journal of AOAC International*, v. 102, n. 1, p. 320–321, 2019.
- LUCAS, B. N.; DALLA NORA, F. M.; BOEIRA, C. P.; VERRUCK, S.; ROSA, C. S. Determination of total phenolic compounds in plant extracts via Folin-Ciocalteu's method adapted to the usage of digital images. *Food Science and Technology*, v. 42, e35122, 2022.
- MOTA, G. C. C.; ALVES, N. C.; VILLEGAS, B.; GUIDA, M. M.; TIRELLI, M. A.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M. Valorização de resíduos de jardinagem da Universidade Presbiteriana Mackenzie: desafios e perspectivas para o campus de Higienópolis. *Anais do 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Química e 20º Encontro Brasileiro sobre o Ensino em Engenharia Química*, 2025.
- PICO, J.; PISMAG, R. Y.; LAUDOUZE, M.; MARTINEZ, M. M. Systematic evaluation of the Folin-Ciocalteu and Fast Blue BB reactions during the analysis of total phenolics in legumes, nuts and plant seeds. *Food & Function*, v. 11, p. 9868–9880, 2020.
- SILVA, M. L. C.; COSTA, R. S.; SANTANA, A. S.; KOBLITZ, M. G. B. Compostos fenólicos, carotenoides e atividade antioxidante em produtos vegetais. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, n. 3, p. 669–682, 2010.
- SILVEIRA, A. L. C. Validação de métodos para a determinação de compostos fenólicos em melancia. *Dissertação (Mestrado em Inovação e Qualidade na Produção Alimentar)* – Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, 2013.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, v. 16, n. 3, p. 144–158, 1965.
- VERNÈS, L.; ABERT-VIAN, M.; EL MAËTAOUI, M.; TAO, Y.; BORNARD, I.; CHEMAT, F. Application of ultrasound for green extraction of proteins from spirulina: mechanism, optimization, modeling, and industrial prospects. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 54, p. 48–60, 2019.
- YANG, Xingwei; CUI, Chaoxian; ZHENG, Anqing; ZHAO, Zengli; WANG, Chenyang; XIA, Shengpeng; HUANG, Zhen; WEI, Guoqiang; LI, Haibin. Ultrasonic and microwave assisted organosolv pretreatment of pine wood for producing pyrolytic sugars and phenols. *Industrial Crops and Products*, Amsterdam, v. 157, p. 112921, 2020.
- YUSOFF, Ida Madiha; TAHER, Zarani Mat; RAHMAT, Zaidah; CHUA, Lee Suan. A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food Research International*, Essex, v. 157, p. 111268, 2022.
- ZHANG, Siheng; XIE, Hongzhao; HUANG, Jie; CHEN, Qiumei; LI, Xin; CHEN, Xiaopeng; LIANG, Jiezheng; WANG, Linlin. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from pine needles (*Pinus elliottii*): comprehensive insights from optimization, antioxidant activity, UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS analysis and kinetic model. *Ultrasonics Sonochemistry*, Amsterdam, v. 102, p. 106742, 2024.