

RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE ÓLEOS ESSENCIAIS: DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA VALORIZAÇÃO SUSTENTÁVEL NA ERA DA QUÍMICA VERDE

Jhonilson Pereira Gonçalves *

Vanessa Nunes Alves*

Resumo: A indústria de óleos essenciais apresenta crescimento significativo no cenário global, impulsionado pela demanda por produtos naturais nos setores cosmético, farmacêutico, alimentício e de bem-estar. Contudo, esse avanço é acompanhado pela geração de grandes volumes de resíduos sólidos e líquidos, tradicionalmente tratados como passivos ambientais. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar, à luz da química verde e da economia circular, o potencial de valorização sustentável dos resíduos gerados pela indústria de óleos essenciais. A metodologia baseou-se em um levantamento bibliográfico sistemático, realizado em bases científicas reconhecidas, com foco em publicações dos últimos dez anos que abordassem a geração, caracterização e aproveitamento desses resíduos. A análise da literatura indica que a biomassa vegetal pós-extração e os hidrolatos apresentam composição química e propriedades físico-químicas compatíveis com diversas rotas de valorização, como compostagem, digestão anaeróbia, pirólise, produção de biochar, recuperação de compostos bioativos e desenvolvimento de biomateriais. Essas estratégias possibilitam a reinserção dos resíduos em sistemas produtivos mais eficientes, reduzindo impactos ambientais e ampliando o valor agregado da cadeia. Apesar dos avanços relatados, persistem desafios relacionados à padronização metodológica, à viabilidade econômica e à integração entre pesquisa científica, setor produtivo e políticas públicas. Assim, os resultados discutidos refletem tendências consolidadas na literatura recente, não constituindo validação experimental direta. Conclui-se que a valorização dos resíduos da indústria de óleos essenciais constitui uma oportunidade concreta para a promoção de modelos produtivos mais sustentáveis e circulares.

Palavras-chave: óleos essenciais; resíduos industriais; química verde; economia circular; valorização de resíduos.

INTRODUÇÃO

Em primeiro lugar, a crescente demanda por produtos naturais tem impulsionado de forma expressiva a indústria de óleos essenciais, principalmente nos

* Instituto de Química – UFCAT: jhonilsonpg@gmail.com, vanessa.nunes@ufcat.edu.br.

setores cosmético, farmacêutico, alimentício e de fragrâncias. Esse movimento está associado à valorização de matérias-primas renováveis e à busca por alternativas menos agressivas ao meio ambiente, inserindo os óleos essenciais em um contexto estratégico da bioeconomia e da química sustentável (BAKKALI et al., 2008; SIMÕES et al., 2017). Contudo, embora o mercado apresente expansão contínua, o processo produtivo desses insumos é caracterizado por baixos rendimentos em relação à massa vegetal processada, o que resulta na geração de grandes volumes de resíduos sólidos e líquidos (BASER; BUCHBAUER, 2016).

Esses resíduos, compostos predominantemente por biomassa vegetal pós-extração e por efluentes aquosos como hidrolatos, foram historicamente tratados como passivos ambientais, sendo descartados ou subutilizados, sobretudo em sistemas produtivos de pequena e média escala (CLARK et al., 2019). Entretanto, evidências científicas recentes indicam que tais subprodutos mantêm composição química complexa e propriedades físico-químicas relevantes, o que os torna compatíveis com diferentes rotas de reaproveitamento sustentável (IRAKLI et al., 2021; KHIRI et al., 2025).

Nesse sentido, a valorização dos resíduos da indústria de óleos essenciais tem sido discutida à luz dos princípios da química verde e da economia circular, que propõem a prevenção de resíduos, o uso eficiente de recursos e a reinserção de materiais nos ciclos produtivos (ANASTAS; WARNER, 1998; GEISSDOERFER et al., 2017). Estratégias como compostagem, digestão anaeróbia, pirólise, produção de biochar, recuperação de compostos bioativos e desenvolvimento de biomateriais têm sido amplamente investigadas, demonstrando potencial para reduzir impactos ambientais e agregar valor econômico aos subprodutos do processo extrativo (CHERUBINI, 2010; MARCELO et al., 2025).

Apesar do avanço significativo da literatura, observa-se que grande parte dos estudos permanece fragmentada, com foco em rotas específicas de aproveitamento e limitada integração entre caracterização química, avaliação ambiental e viabilidade tecnológica. Além disso, a ausência de padronização metodológica e de análises comparativas robustas dificulta a transposição dos resultados acadêmicos para aplicações industriais consolidadas (NABI et al., 2025; BODEA et al., 2025). Tal cenário evidencia a necessidade de abordagens teóricas integradas, capazes de

sistematizar o conhecimento disponível e identificar tendências, lacunas e oportunidades de inovação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Óleos essenciais: definição e panorama global

Em termos normativos, os óleos essenciais são definidos como misturas complexas de compostos voláteis e odoríferos, obtidas exclusivamente a partir de matérias-primas vegetais botanicamente definidas, por processos físicos como hidrodestilação, destilação a vapor ou prensagem mecânica de pericarpos cítricos. Essa definição é consolidada pela norma internacional ISO 9235, adotada como referência terminológica para matérias-primas aromáticas naturais (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2021). Do ponto de vista químico, distinguem-se dos óleos graxos por não apresentarem natureza lipídica triglicerídica, sendo constituídos majoritariamente por frações voláteis de baixo peso molecular, elevada pressão de vapor e forte impacto sensorial (BAKKALI et al., 2008; SIMÕES et al., 2017).

A composição química dos óleos essenciais é dominada por terpenoides, sobretudo monoterpenos e sesquiterpenos, além de compostos oxigenados, fenólicos e fenilpropanoides em menores proporções. A distribuição qualitativa e quantitativa dessas frações apresenta elevada variabilidade, condicionada por fatores como espécie vegetal, variação genética, condições edafoclimáticas, estágio fenológico e método de extração empregado (BASER; BUCHBAUER, 2016; SIMÕES et al., 2017). Essa variabilidade influencia diretamente as propriedades biológicas, tecnológicas e comerciais dos óleos essenciais, impactando seu valor agregado e suas aplicações industriais (BAKKALI et al., 2008).

No contexto global, a indústria de óleos essenciais apresenta crescimento contínuo, impulsionado pela demanda por produtos naturais nos setores de cosméticos, fragrâncias, alimentos, fármacos e bem-estar. Relatórios recentes indicam expansão sustentada do mercado internacional, associada à diversificação de fontes botânicas e à incorporação gradual de práticas alinhadas à bioeconomia e

à química sustentável (EUROPEAN COMMISSION, 2020; GRAND VIEW RESEARCH, 2023).

No Brasil, a indústria de óleos essenciais possui relevância agroindustrial, com destaque para os óleos cítricos obtidos da casca de laranja, fortemente integrados à cadeia do suco concentrado. O país figura entre os principais exportadores mundiais desse segmento, embora sua posição relativa varie conforme critérios estatísticos e classificações tarifárias adotadas (FAO, 2022; BIZZO; HOVELL; REZENDE, 2022).

Nesse sentido, determinados gêneros vegetais estruturam o mercado internacional de óleos essenciais, destacando-se Citrus, Eucalyptus, Mentha, Lavandula, Melaleuca e Cymbopogon, cujos produtos são caracterizados por compostos majoritários como limoneno, 1,8-cineol, mentol, linalol, terpinen-4-ol e citral (BASER; BUCHBAUER, 2016; SIMÕES et al., 2017). Além disso, estudos recentes indicam que a origem botânica e as condições de processamento definem a assinatura química desses óleos, influenciando não apenas sua aplicação final, mas também a natureza e o potencial de valorização dos resíduos gerados durante o processo produtivo (CLARK et al., 2019).

Técnicas de extração de óleos essenciais

A técnica de extração é determinante para o rendimento e a qualidade dos óleos essenciais, pois influencia diretamente o perfil químico e a integridade dos compostos voláteis, podendo induzir transformações térmicas ou oxidativas que alteram a proporção de monoterpenos, sesquiterpenos e compostos oxigenados (SIMÕES et al., 2017; BASER; BUCHBAUER, 2016).

De modo geral, os métodos empregados podem ser classificados em técnicas convencionais, como hidrodestilação e destilação a vapor, e abordagens consideradas mais alinhadas aos princípios da química verde, sobretudo pela redução de solventes tóxicos, menor consumo energético e maior seletividade do processo, incluindo a extração por CO₂ supercrítico e processos assistidos por micro-ondas ou ultrassom, além do uso de solventes alternativos, como DES/NADES, em estratégias diretas ou híbridas (UWINEZA; WAŚKIEWICZ, 2020).

Nesse contexto, a hidrodestilação permanece extensamente utilizada devido à simplicidade operacional e ao baixo custo, sendo frequentemente realizada em

aparato tipo Clevenger. Entretanto, apresenta limitações associadas ao elevado consumo energético, ao longo tempo de extração e ao risco de hidrólise ou degradação térmica de constituintes sensíveis (SIMÕES et al., 2017; BASER; BUCHBAUER, 2016). Por esse motivo, pequenas variações de parâmetros operacionais, como tempo, temperatura e razão planta/água, podem resultar em alterações significativas no rendimento e na composição do óleo, dificultando a padronização e a comparabilidade entre estudos (OLASCUAGA-CASTILLO et al., 2024).

A destilação a vapor mitiga parcialmente esses efeitos ao reduzir o contato direto com a água líquida, embora exija controle rigoroso de pressão e fluxo e possa apresentar menor eficiência na extração de frações menos voláteis, como determinados sesquiterpenos (NABI et al., 2025).

Em paralelo, técnicas assistidas por ultrassom (UAE) e micro-ondas (MAH) têm sido investigadas como alternativas para intensificação do processo, promovendo maior transferência de massa, redução do tempo de extração e menor consumo energético. Apesar dos resultados promissores, a aplicação em escala industrial ainda depende de avaliações sistemáticas de custo, controle de processo e reprodutibilidade (BODEA et al., 2025).

Quanto ao uso de solventes eutéticos profundos e naturais (DES/NADES), revisões apontam elevada eficiência para extração de compostos não voláteis, mas destacam limitações relacionadas à viscosidade, recuperação do solvente e compatibilidade sensorial, restringindo seu uso direto para óleos essenciais e favorecendo sua aplicação como pré-tratamento integrado à destilação (CHOI; VERPOORTE, 2019; FENG et al., 2022; ACOSTA-VEGA et al., 2025; YU et al., 2021).

Já a extração por CO₂ supercrítico é frequentemente citada como uma das rotas mais alinhadas aos princípios da química verde, por operar em temperaturas moderadas, permitir seletividade ajustável por pressão e temperatura e não deixar resíduos tóxicos no produto (UWINEZA; WAŚKIEWICZ, 2020). Desse modo, estudos relatam ganhos de rendimento e preservação de compostos termossensíveis, como observado na extração de óleo essencial de *Lavandula hybrida* (KAMALI et al., 2014). Contudo, o elevado custo de equipamentos, a necessidade de altas pressões e a sensibilidade à matriz vegetal ainda limitam sua adoção por pequenos produtores (EL AHMADI et al., 2024; NABI et al., 2025).

Em síntese, a literatura recente converge para a adoção de processos híbridos, nos quais técnicas assistidas são combinadas a métodos convencionais ou à extração supercrítica, com o objetivo de conciliar eficiência, qualidade e menor impacto ambiental (UWINEZA; WAŚKIEWICZ, 2020; CUI et al., 2024; NABI et al., 2025). A consolidação dessas rotas requer o avanço na padronização de parâmetros operacionais e no uso de métricas comparáveis, incluindo análises de ciclo de vida e ferramentas metrológicas compatíveis com o controle de qualidade industrial (YE et al., 2023; OLASCUAGA-CASTILLO et al., 2024).

Indústria de óleos essenciais e geração de resíduos

A produção industrial de óleos essenciais está inevitavelmente associada à geração de resíduos sólidos e líquidos, uma vez que o rendimento do óleo é, em geral, baixo em relação à massa total de matéria-prima vegetal processada. Em muitos casos, o resíduo gerado pode ultrapassar 90% da massa inicial, a depender da espécie vegetal e do método de extração adotado, o que transforma a gestão desses fluxos em um componente estratégico da sustentabilidade da cadeia produtiva (SIMÕES et al., 2017; BASER; BUCHBAUER, 2016; CLARK et al., 2019; BIZZO; HOVELL; REZENDE, 2022).

O principal resíduo sólido gerado corresponde à biomassa vegetal exaurida (folhas, caules, flores, ramos ou cascas) particularmente expressiva em processos baseados em destilação, nos quais pode representar mais de 60% da massa inicial. Ainda que os constituintes voláteis sejam removidos, essa biomassa não pode ser considerada quimicamente inerte, pois preserva metabólitos secundários menos voláteis e estruturalmente estáveis, com potencial de reaproveitamento (BASER; BUCHBAUER, 2016; SIMÕES et al., 2017; KHIRI et al., 2025).

Paralelamente, a extração gera resíduos líquidos, notadamente hidrolatos ou águas de destilação, que retêm compostos hidrofílicos, como fenóis simples, ácidos orgânicos e álcoois oxigenados. A composição dessas correntes depende da espécie vegetal e das condições operacionais do processo, embora historicamente tenham sido tratadas como efluentes de baixo valor e frequentemente descartadas sem aproveitamento (CLARK et al., 2019; KHIRI et al., 2025; NABI et al., 2025).

Além desses fluxos principais, processos alternativos podem originar resíduos intermediários, como solventes residuais, subprodutos de reações secundárias, lodos orgânicos e partículas finas dispersas em efluentes. Embora menos volumosos, esses materiais tendem a apresentar maior complexidade química e potencial de impacto ambiental, exigindo estratégias específicas de tratamento (CLARK et al., 2019; NABI et al., 2025).

Evidências analíticas recentes reforçam que esses resíduos constituem matrizes quimicamente ativas. Em biomassas pós-destilação de espécies da família Lamiaceae, por exemplo, análises por LC-MS indicaram a presença de dezenas de compostos fenólicos, demonstrando que o chamado “resíduo” frequentemente corresponde a um coproduto com valor químico relevante (IRAKLI et al., 2021).

Resultados semelhantes foram observados em resíduos industriais de laranja e em *Cannabis sativa*, nos quais compostos de alto valor agregado permaneceram concentrados após a extração de voláteis, evidenciando que o potencial da biomassa não é esgotado nos processos convencionais (DIKMETAS et al., 2024; FIORITO et al., 2024).

Além disso, a quantificação desses resíduos apresenta elevada variabilidade, influenciada pela condição da matéria-prima, teor de umidade, espécie vegetal e parâmetros operacionais, o que torna mais consistente o uso de intervalos comparáveis do que de valores absolutos universais (SIMÕES et al., 2017; BASER; BUCHBAUER, 2016; KHIRI et al., 2025).

Apesar desse potencial amplamente documentado, revisões recentes indicam que grande parte dos estudos permanece restrita à caracterização, sem avançar para propostas sistemáticas de aproveitamento em escala industrial, evidenciando a distância entre produção científica e aplicação prática (KHIRI et al., 2025). Do ponto de vista ambiental, o descarte inadequado desses resíduos pode intensificar emissões de gases de efeito estufa e elevar a carga orgânica de corpos hídricos, principalmente quando efluentes líquidos são lançados sem tratamento adequado.

Diante desse cenário, diferentes estratégias de valorização têm sido investigadas, incluindo biotransformação por cultivo de fungos, recuperação e conversão de moléculas remanescentes, compostagem e uso agrônômico, rotas energéticas e produção de adsorventes para remediação ambiental. Assim, o principal gargalo identificado não é apenas técnico, mas sistêmico, envolvendo a ausência de

protocolos comparáveis, avaliações integradas e maior articulação entre pesquisa, setor produtivo e políticas públicas, condição essencial para viabilizar a adoção dessas soluções em escala industrial (SEMENOVA et al., 2023; MARCELO et al., 2023; MARCELO et al., 2025; NABI et al., 2025; BIZZO; HOVELL; REZENDE, 2022).

Técnicas de caracterização de resíduos vegetais

A caracterização analítica de resíduos sólidos da indústria de óleos essenciais sustenta decisões sobre risco ambiental e potencial de valorização, pois permite integrar informações térmicas, morfológicas e elementares. Nesse conjunto, TGA, MEV/EDX, FAAS, ICP-OES e ICP-MS se complementam ao descrever estabilidade térmica, estrutura superficial e composição mineral/traço, fornecendo base técnica para descarte, tratamento e rotas de reaproveitamento (BASER; BUCHBAUER, 2016; CLARK et al., 2019; NABI et al., 2025).

A termogravimetria (TGA), por exemplo, monitora perda de massa em função da temperatura/tempo sob atmosfera controlada, permitindo estimar umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas, parâmetros centrais para biomassa lignocelulósica e para avaliação de aptidão a combustão, pirólise e gaseificação. Em geral, observa-se etapa inicial associada à remoção de água/voláteis leves e, posteriormente, degradação mais intensa entre 200 e 500 °C relacionada a hemicelulose, celulose e lignina, o que torna a técnica útil para comparar resíduos e orientar rotas termoquímicas (YANG et al., 2007; WHITE; DUBOIS; HEIDLER, 2014; KHIRI et al., 2025; MARCELO et al., 2025).

MEV/EDX oferece leitura morfológica e elementar superficial. A MEV evidencia fibras, poros, fraturas e deposições minerais, úteis para inferir alterações estruturais associadas ao processo de extração e ao pré-tratamento de materiais para adsorção ou conversão térmica. O EDX, por sua vez, indica presença de elementos como Si, Ca, Mg, K e Fe, frequentemente associados a minerais do solo, além de permitir rastrear sinais de contaminação inorgânica ou enriquecimento mineral após tratamentos térmicos (KUMAR et al., 2021; EL AHMADI et al., 2024; GOMEZ et al., 2020).

Quanto à quantificação elementar, FAAS permanece relevante por robustez e acessibilidade, sobretudo para monitorar metais potencialmente tóxicos (Pb, Cd, Cu,

Ni) após digestão ácida, ainda que analise um elemento por vez. Em estudos preliminares ou infraestrutura limitada, é uma via eficiente para triagem e avaliação de risco, além de apontar micronutrientes de interesse agrônômico (SKOOG et al., 2014; IORDACHE et al., 2016).

Já o ICP-OES amplia a produtividade ao permitir leitura multielementar simultânea e é indicado para perfis de macro e micronutrientes e para controle de contaminantes, o que é decisivo quando se discute aplicação agrícola, ambiental ou industrial do resíduo (BOSS; FREDEEN, 2004; EL AHMADI et al., 2024; KHIRI et al., 2025). O ICP-MS é apropriado quando se exige alta sensibilidade para traços, permitindo detecção em níveis muito baixos e fortalecendo controle de qualidade e avaliações de risco em matrizes complexas, complementando FAAS e ICP-OES (THOMAS, 2013; IORDACHE et al., 2016; CLARK et al., 2019).

Perspectivas internacionais para valorização de resíduos

Internacionalmente, cresce a leitura de que resíduos da cadeia de óleos essenciais podem ser tratados como recursos secundários. Nesse enquadramento, a biorrefinaria vegetal propõe integrar rotas para converter biomassa residual em múltiplos produtos, reduzindo perdas materiais e impactos ambientais (CLARK et al., 2019; NABI et al., 2025; CHERUBINI, 2010).

Entre as rotas energéticas, a digestão anaeróbia se destaca por converter resíduos orgânicos em biogás e digestato, com potencial de retorno ao solo e reforço de circularidade; há relatos de bom desempenho em resíduos de lavanda, hortelã, alecrim e eucalipto, além de relevância do digestato como fonte de nutrientes (HJOUJI et al., 2024; ANGELIDAKI et al., 2018). Nesse sentido, a pirólise aparece como alternativa termoquímica para gerar bio-óleo, gás combustível e biochar; este último, pela estabilidade e área superficial, tem aplicações como condicionador de solo e adsorvente, com viabilidade favorecida pelo caráter lignocelulósico e teor de voláteis da biomassa aromática (ABU BAKAR et al., 2020; LEHMANN; JOSEPH, 2015; MARCELO et al., 2025).

No eixo ambiental, resíduos ativados térmica ou quimicamente têm sido avaliados como adsorventes para remoção de corantes e metais em efluentes, com desempenhos próximos aos de carvões comerciais em alguns casos, reforçando a

premissa de uso de matérias-primas renováveis e redução de insumos perigosos, em linha com princípios clássicos de química verde (SAHA et al., 2018; SAHA et al., 2019; ANASTAS; WARNER, 1998).

Em paralelo, compostagem e vermicompostagem seguem como rotas consolidadas de retorno de matéria orgânica ao solo, porquanto há evidências de ganhos agrônômicos em cadeias específicas, como patchouli, inclusive com melhora de produtividade e rendimento de óleo, o que sugere ciclos internos de reaproveitamento (SINGH et al., 2013; MARCELO et al., 2023).

Mais recentemente, o uso da biomassa residual como carga natural em bioplásticos e compósitos amplia o repertório de valorização para além do energético e do agrônômico, contribuindo para reduzir a dependência de polímeros fósseis e, em alguns casos, melhorar propriedades mecânicas e biodegradabilidade (DINTCHEVA; MORICI, 2023). Por fim, as perspectivas internacionais convergem para reinserir matéria e energia no sistema produtivo, aproximando o setor de uma economia circular efetiva, desde que as rotas sejam avaliadas com critérios comparáveis e alinhadas aos princípios de prevenção de resíduos, eficiência energética e uso de fontes renováveis (ANASTAS; WARNER, 1998; CLARK et al., 2019).

MATERIAIS E MÉTODOS

Por se tratar de um estudo de natureza teórica, a metodologia fundamentou-se em um levantamento bibliográfico sistemático, com busca e triagem de literatura científica em bases reconhecidas (*Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* e *SciELO*), visando assegurar relevância, confiabilidade e atualidade. A estratégia de busca empregou descritores em língua inglesa, com o objetivo de ampliar o alcance internacional, incluindo “*essential oils industry residues*”, “*essential oils waste valorization*”, “*green chemistry valorization*”, “*biochar essential oils*” e “*circular economy essential oils*”, combinados por operadores booleanos e aplicados aos campos de título, resumo e palavras-chave. O recorte temporal priorizou publicações dos últimos dez anos (2015–2025), e as buscas foram realizadas entre agosto e dezembro de 2025, de modo a mapear os avanços tecnológicos recentes.

Os critérios de inclusão contemplaram: (i) artigos publicados entre 2015 e 2025; (ii) estudos experimentais ou de revisão envolvendo resíduos da indústria de óleos

essenciais; (iii) descrição explícita de técnicas de caracterização, valorização ou avaliação ambiental; e (iv) aderência conceitual aos princípios da química verde e da economia circular. Foram excluídos trabalhos com dados insuficientes, estudos puramente agrônômicos sem interface química e publicações repetidas entre bases.

Foram selecionados prioritariamente artigos de revisão e estudos experimentais que abordassem geração, caracterização e rotas de valorização de resíduos da indústria de óleos essenciais, com critérios de inclusão baseados em: descrição metodológica suficiente, clareza nas técnicas analíticas empregadas e aderência a princípios de química verde e economia circular.

Ademais, foram incluídas, como exceção justificada ao recorte temporal, normas técnicas e referências basilares indispensáveis para definição terminológica, fundamentos instrumentais e enquadramento conceitual, por exemplo, documentos normativos e obras clássicas consolidadas. Quando necessário para contextualização setorial, também foram utilizados documentos institucionais rastreáveis (literatura cinzenta), devidamente identificados quanto à autoria, ano e finalidade.

Quanto à análise do material selecionado, foi conduzida de forma crítica e comparativa, com síntese narrativa orientada à identificação de tendências, lacunas e oportunidades de inovação, relacionando desempenho técnico, riscos ambientais e potencial de integração em modelos de biorrefinaria e economia circular. A aplicação desses critérios resultou na seleção de aproximadamente 30 estudos relevantes, entre artigos de revisão e trabalhos experimentais, que constituíram o corpus teórico analisado ao longo do trabalho.

Esses estudos foram examinados de forma comparativa, com foco na identificação de tendências, convergências metodológicas e lacunas recorrentes na valorização de resíduos da indústria de óleos essenciais. Vale ressaltar que por se tratar de uma revisão teórica, o presente estudo não contempla validações experimentais próprias nem análises quantitativas comparativas. Portanto, as conclusões refletem tendências e consensos reportados na literatura, estando condicionadas à qualidade e ao escopo dos estudos analisados.

RESULTADOS

Compostagem dos resíduos orgânicos

Zaccardelli et al. (2021) observaram que resíduos foliares de manjerição, alecrim e sálvia podem ser convertidos em composto estável, com indicadores de maturidade agrônoma (pH próximo à neutralidade, condutividade elétrica adequada e ausência de fitotoxicidade em ensaios de germinação), sugerindo estabilização eficiente da matéria orgânica e redução de compostos inibitórios (ZACCARDELLI et al., 2021).

Em uma linha convergente, Ma et al. (2021) reportaram que compostos de resíduos de ervas medicinais puderam substituir parcialmente fertilizantes minerais (faixas entre 25% e 50%) sem perdas produtivas, o que sinaliza potencial de economia de insumos e, ao mesmo tempo, redução indireta de emissões associadas à produção de fertilizantes sintéticos (MA et al., 2021; CLARK et al., 2019).

Do ponto de vista ambiental, a compostagem evita parte das emissões de metano associadas à degradação anaeróbia em descarte inadequado e pode contribuir com melhoria de estrutura e retenção hídrica do solo, além de eventual efeito supressor de patógenos quando metabólitos residuais permanecem no composto (LEHMANN; JOSEPH, 2015; ZACCARDELLI et al., 2021).

Ainda assim, a literatura alerta que doses elevadas ou composto pouco maturado podem induzir fitotoxicidade, sobretudo quando resíduos ricos em metabólitos secundários entram no processo sem diluição; por isso, a co-compostagem com outros resíduos orgânicos aparece como ajuste simples e recorrente para melhorar desempenho e segurança agrônoma (ZACCARDELLI et al., 2021).

Pirólise para geração de bio-óleo e biochar

A pirólise tem sido destacada como rota termoquímica promissora para resíduos lignocelulósicos, com rendimentos típicos reportados para bio-óleo, biochar e gases combustíveis variando conforme biomassa e parâmetros operacionais (ABU BAKAR et al., 2020; MODAK et al., 2023). Em termos de produto, o bio-óleo costuma concentrar compostos oxigenados (ácidos, fenóis, derivados furânicos), e a temperatura tende a deslocar a distribuição: valores mais altos podem reduzir frações mais ácidas e aumentar componentes fenólicos, o que abre espaço para direcionamento do produto, embora a acidez e a instabilidade ainda sejam barreiras

para uso direto como combustível sem etapas de *upgrading* (ABU BAKAR et al., 2020).

Já o biochar, pelo maior teor de carbono fixo, estabilidade e área superficial, tem sido explorado tanto como adsorvente quanto como condicionador de solo. Modak et al. (2023) relataram alto desempenho na remoção de corantes em solução utilizando biochar de resíduos aromáticos, o que reforça potencial para remediação; além disso, a aplicação agrícola do biochar se conecta a sequestro de carbono e melhoria de fertilidade, ampliando os ganhos ambientais da rota (MODAK et al., 2023; LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Digestão anaeróbia e produção de biogás

A digestão anaeróbia aparece como alternativa eficaz para conversão energética de resíduos pós-extração, com resultados indicando produção de biogás em patamares comparáveis a outros resíduos agroindustriais. Por exemplo, Hjouji et al. (2024) reportaram desempenho energético para resíduos de lavanda, hortelã, eucalipto e alecrim em torno de centenas de kWh por tonelada de resíduo processado, ainda que haja variações entre espécies (HJOUJI et al., 2024).

Um ponto importante é que, embora óleos essenciais tenham atividade antimicrobiana, a biomassa residual tende a apresentar menor teor desses constituintes, permitindo o desenvolvimento do consórcio metanogênico; Assim, as diferenças observadas são frequentemente atribuídas ao teor lignocelulósico e a traços de compostos bioativos remanescentes, sem necessariamente inviabilizar o processo (HJOUJI et al., 2024). Além do biogás, o digestato é frequentemente apontado como coproduto relevante, por conter matéria orgânica estabilizada e nutrientes, o que viabiliza retorno ao solo e fechamento de ciclo de nutrientes, fortalecendo a lógica circular da tecnologia (ANGELIDAKI et al., 2018).

Aplicações tecnológicas e biomateriais inovadores

Além das rotas energéticas e agronômicas, a literatura tem ampliado o olhar para usos tecnológicos da biomassa residual, sobretudo pela presença de compostos bioativos e frações fibrosas. Por exemplo, estudos mostram que resíduos pós-

destilação podem permanecer ricos em polifenóis e flavonoides, passíveis de recuperação por extrações complementares e técnicas assistidas, gerando extratos com atividades antioxidante e antimicrobiana, com potencial de aplicação em cosméticos e produtos correlatos (IRAKLI et al., 2021; DIKMETAS et al., 2024).

De modo análogo, as fibras desses resíduos vêm sendo avaliadas como reforço em bioplásticos e compósitos biodegradáveis, com relatos de melhoria de propriedades mecânicas e de barreira, contribuindo para reduzir dependência de polímeros fósseis (DINTCHEVA; MORICI, 2023). Por fim, os resíduos líquidos também têm sido reposicionados como correntes de interesse: hidrolatos podem atuar como substratos ou aditivos em processos fermentativos, influenciando rendimento e propriedades funcionais de biopolímeros, como apontado em estudos recentes envolvendo goma xantana, o que sugere sinergias entre a indústria de óleos essenciais e rotas biotecnológicas (ALMEIDA et al., 2025).

Comparativo de Rendimentos e Benefícios

A comparação apresentada a seguir possui caráter qualitativo e conceitual, baseada em tendências recorrentes na literatura, e não em métricas quantitativas uniformizadas. Assim, de forma comparativa, as principais rotas de valorização dos resíduos da indústria de óleos essenciais apresentam vantagens complementares, incluindo recuperação de nutrientes, geração de energia, produção de materiais funcionais e mitigação de impactos ambientais.

Nesse contexto, a literatura converge no entendimento de que nenhuma dessas abordagens é universalmente superior, sendo a escolha dependente das características da biomassa, da infraestrutura disponível e dos objetivos ambientais e econômicos do sistema produtivo. Nesse sentido, estratégias integradas, fundamentadas nos princípios da economia circular, tendem a maximizar o aproveitamento da biomassa residual e a reduzir perdas materiais e energéticas (CHERUBINI, 2010; GEISSDOERFER et al., 2017).

Apesar dos avanços e dos resultados promissores, persistem lacunas metodológicas, técnicas e institucionais. Um dos entraves mais recorrentes refere-se à baixa padronização de protocolos e métricas, uma vez que diferentes estudos empregam condições distintas de compostagem, faixas térmicas de pirólise,

configurações de reatores e estratégias de digestão anaeróbia, dificultando comparações diretas e a definição de parâmetros generalizáveis (BODEA et al., 2025; KHIRI et al., 2025).

Ademais, indicadores ambientais são frequentemente reportados de forma heterogênea, com forte dependência das condições locais e do desenho experimental, sobretudo quando se avaliam estabilidade do carbono, redução de emissões ou impactos sobre propriedades do solo (EL AHMADI et al., 2024; MARCELO et al., 2025). Esse cenário reforça a necessidade de protocolos minimamente harmonizados, capazes de aproximar a linguagem entre academia, setor produtivo e gestores públicos.

Outro desafio relevante é a distância entre pesquisa e implementação industrial, porquanto maior parte das investigações permanece restrita às escalas laboratorial ou piloto, em razão de barreiras econômicas, conservadorismo tecnológico e limitada difusão de informação técnica junto aos produtores (CHERUBINI; STRØMMAN, 2011; NABI et al., 2025). Diante disso, estudos de avaliação tecnológica indicam que a adoção dessas rotas depende de evidências claras de viabilidade econômica, aliadas a análises integradas de custo-benefício e sustentabilidade, com indicadores comparáveis entre alternativas (LANGE et al., 2021).

Iniciativas baseadas em parcerias público-privadas e projetos cooperativos entre universidades e destilarias têm sido apontadas como caminhos promissores para acelerar essa transposição (KUMAR et al., 2024). Contudo, no plano institucional, a ausência de políticas públicas específicas e de instrumentos de incentivo constitui outro entrave. Embora existam diretrizes gerais para gestão de resíduos, os resíduos da indústria de óleos essenciais são frequentemente classificados como orgânicos de baixo risco, permanecendo fora de programas estruturados de estímulo à valorização.

Além disso, é importante ressaltar que a adoção dessas rotas não elimina integralmente impactos ambientais, mas os redistribui e reduz, tornando indispensável a avaliação integrada de *trade-offs* técnicos, energéticos e ambientais. Nesse contexto, mecanismos como créditos de carbono associados à bioenergia, certificações ambientais e linhas de financiamento direcionadas à infraestrutura de valorização são apontados como estratégias capazes de impulsionar a adoção

tecnológica, sobretudo em regiões de produção fragmentada (EUROPEAN COMMISSION, 2020; GEISSDOERFER et al., 2017).

Do ponto de vista técnico, cada rota apresenta gargalos específicos. A compostagem exige controle da variabilidade e da sazonalidade da biomassa, frequentemente demandando co-compostagem para ajuste da relação C/N (BERNAL et al., 2017). A pirólise enfrenta desafios relacionados à padronização do biochar e ao controle de frações indesejáveis do bio-óleo (LEHMANN; JOSEPH, 2015), enquanto a digestão anaeróbia requer estratégias de pré-tratamento ou co-digestão para resíduos mais lignificados e monitoramento de possíveis efeitos inibitórios (ANGELIDAKI et al., 2018).

Por sua vez, no campo dos biomateriais, ainda são necessárias caracterizações sistemáticas de propriedades mecânicas, térmicas e de biodegradação para atender requisitos normativos e reduzir incertezas na aplicação comercial (DINTCHEVA; MORICI, 2023).

Entretanto, mesmo diante dessas limitações, o panorama delineado pela literatura é de otimismo cauteloso. Os resíduos da indústria de óleos essenciais tendem a ser compreendidos como coprodutos estratégicos em sistemas de biorrefinaria vegetal, nos quais diferentes rotas de valorização podem ser combinadas de forma sequencial. Estratégias que integram recuperação de compostos bioativos, geração de energia por digestão anaeróbia e posterior compostagem do digestato exemplificam caminhos viáveis para o fechamento de ciclos de carbono e nutrientes, consolidando a valorização dos resíduos como oportunidade concreta de inovação tecnológica, econômica e ambiental (LANGE et al., 2021; MARCELO et al., 2025).

CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho permitiu evidenciar que os resíduos gerados pela indústria de óleos essenciais, tradicionalmente tratados como passivos ambientais, constituem, na realidade, matrizes complexas e quimicamente ativas, dotadas de elevado potencial de valorização. A revisão bibliográfica demonstrou, de forma consistente, que esses resíduos sólidos e líquidos apresentam características físico-químicas compatíveis com diferentes rotas tecnológicas, capazes de gerar

produtos de valor agregado e de reduzir impactos ambientais, em consonância com os princípios da química verde e da economia circular.

A análise das técnicas de extração e dos processos industriais revelou que a baixa eficiência mássica inerente à produção de óleos essenciais resulta em grande volume de biomassa residual, frequentemente rica em compostos não voláteis, nutrientes minerais e frações lignocelulósicas. Os resultados discutidos na literatura confirmam que essa biomassa não deve ser interpretada como material inerte, mas como um recurso secundário passível de reaproveitamento em múltiplas frentes, desde aplicações agrícolas até usos energéticos e tecnológicos.

As evidências reunidas indicam que rotas como compostagem, pirólise e digestão anaeróbia são tecnicamente viáveis e ambientalmente vantajosas para a valorização desses resíduos. A compostagem, por exemplo, mostrou-se eficaz na estabilização da matéria orgânica e no retorno de nutrientes ao solo, contribuindo para a melhoria da fertilidade e para a redução do uso de fertilizantes sintéticos.

A pirólise destacou-se pela capacidade de converter resíduos aromáticos em bio-óleo e biochar, promovendo a geração de bioenergia e materiais com aplicações ambientais e agronômicas. A digestão anaeróbia, por sua vez, revelou potencial significativo para a produção de biogás e biofertilizantes, integrando manejo de resíduos e geração de energia renovável.

Além das rotas tradicionais de valorização, a literatura internacional aponta um campo emergente de aplicações tecnológicas, incluindo a produção de biomateriais, biossorventes, compostos bioativos e substratos para processos biotecnológicos. Esses usos ampliam o escopo da valorização e reforçam o conceito de biorrefinaria aplicada a plantas aromáticas, na qual diferentes frações da biomassa residual são direcionadas a produtos diversos, maximizando o aproveitamento da matéria-prima.

Por outro lado, a análise crítica também evidenciou limitações importantes. A ausência de padronização metodológica, a elevada variabilidade dos resíduos, a predominância de estudos em escala laboratorial e a limitada integração entre academia, indústria e políticas públicas ainda constituem entraves à consolidação dessas estratégias em escala industrial. Ademais, a carência de análises econômicas robustas e de avaliações de ciclo de vida comparáveis dificulta a tomada de decisão por parte dos produtores e gestores.

Diante desse cenário, conclui-se que a valorização sustentável dos resíduos da indústria de óleos essenciais representa uma oportunidade real e estratégica, mas que sua efetivação exige abordagens integradas. Portanto, é necessário avançar simultaneamente no desenvolvimento de protocolos analíticos padronizados, na demonstração de viabilidade técnica e econômica em escala real e na criação de instrumentos institucionais e políticas públicas que estimulem a adoção de modelos circulares.

Por fim, este trabalho contribui ao discutir criticamente, à luz da literatura, as técnicas disponíveis, oferecendo uma visão integrada sobre os desafios e perspectivas da valorização de resíduos aromáticos. Ao fazê-lo, reforça-se que a transição para modelos produtivos mais sustentáveis no setor de óleos essenciais não depende apenas de inovação tecnológica, mas também de planejamento sistêmico, articulação institucional e mudança de paradigma na forma como os resíduos são concebidos, não mais como descarte inevitável, mas como recursos estratégicos para uma química analítica e ambiental alinhada às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABU BAKAR, M. S.; TITILADUNAYO, I. F.; ODETOKUN, S. M. Thermochemical conversion of residual biomass to bio-products: a review of pathways, catalysts and products. **Energy Reports**, v. 6, p. 229–251, 2020. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.005.
- ALMEIDA, H. H. S. et al. Circular use of essential oil post-distillation by-products for enhanced gum bioproduction and antimicrobial treatments. **Waste and Biomass Valorization**, 2025. DOI: 10.1007/s12649-025-03302-3.
- ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. Green chemistry: theory and practice. **Oxford: Oxford University Press**, 1998.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018.
- BAKKALI, F. et al. Biological effects of essential oils – a review. **Food and Chemical Toxicology**, v. 46, n. 2, p. 446–475, 2008. DOI: 10.1016/j.fct.2007.09.106.

- BASAK, B. B. et al. Biochar–mineral complexes for removal of heavy metals: sustainability and prospects. **Science of the Total Environment**, v. 766, 144260, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144260.
- BASER, K. H. C.; BUCHBAUER, G. (org.). **Handbook of essential oils: science, technology, and applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- BODEA, D. et al. Green extraction technologies for essential oils: a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 411, 137353, 2025.
- CHERUBINI, F. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 7, p. 1412–1421, 2010. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.01.015.
- CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 437–451, 2011.
- CLARK, J. H. et al. Circular economy and green chemistry: future opportunities. **Green Chemistry**, v. 21, p. 1–17, 2019.
- DINTCHEVA, N. T.; MORICI, E. Bio-based composites reinforced with plant residues: mechanical and environmental performance. **Polymers**, v. 15, n. 4, 2023.
- EUROPEAN COMMISSION. **A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe**. Brussels, 2020.
- FAO. **FAOSTAT: food and agriculture data**. Rome, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 11 dez. 2025.
- FARDAD, K. et al. Bioenergy and biofertilizer production from distillation residues of aromatic plants. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 8, p. 501–511, 2018.
- GEISSDOERFER, M. et al. The circular economy – a new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 2017.
- HJOUJI, Y. et al. Anaerobic digestion of residual biomass from essential oil extraction: energy and nutrient recovery. **Industrial Crops and Products**, v. 216, 118820, 2024.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9235: Aromatic natural raw materials — Vocabulary**. Geneva, 2021.
- KHIRI, A. et al. Transforming essential oil extraction wastes into sustainable resources: characterization and eco-friendly valorization. **Biomass and Bioenergy**, 2025.

- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (org.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015.
- MA, Y. et al. Herbal residue composting as partial substitute for mineral fertilizer in agriculture. **Waste Management**, v. 120, p. 846–856, 2021.
- SAHA, A.; BASAK, B. B. Scope of value addition and utilization of residual biomass from medicinal and aromatic plants. **Industrial Crops and Products**, v. 145, 111979, 2020.
- SIMÕES, C. M. O. et al. **Farmacognosia: do produto natural ao medicamento**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentals of analytical chemistry**. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2014.
- THOMAS, R. **Practical guide to ICP-MS: a tutorial for beginners**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- UWINEZA, P. A.; WAŚKIEWICZ, A. Recent advances in supercritical CO₂ extraction of essential oils. **Molecules**, v. 25, n. 17, 3844, 2020.
- YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.
- ZACCARDELLI, M. et al. Utilization of vegetable residues from aromatic plant supply chains in quality compost production. **Industrial Crops and Products**, v. 162, 113255, 2021.