



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



FRANCIELE SOUTO DA ROCHA

**UM ESTUDO TEÓRICO DA EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA DE LÚPULO PARA
APLICAÇÃO EM FORMULAÇÕES COSMÉTICAS**

Uberlândia – MG

2025

FRANCIELE SOUTO DA ROCHA

**UM ESTUDO TEÓRICO DA EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA DE LÚPULO PARA
APLICAÇÃO EM FORMULAÇÕES COSMÉTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina: “Trabalho de Conclusão de Curso”, do curso de graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

Uberlândia – MG

2025

**UM ESTUDO TEÓRICO DA EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA DE LÚPULO PARA
APLICAÇÃO EM FORMULAÇÕES COSMÉTICAS**

FRANCIELE SOUTO DA ROCHA

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE FRANCIELE SOUTO DA ROCHA
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 12/05/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
Orientador – (FEQUI/UFU)

Profª. Dra. Yanne Novais Kyriakidis
(FEQUI/UFU)

MSc. Warlen Agnelo Dias
(PPGEQ/UFU)

Uberlândia – MG

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado coragem para lutar por esse sonho mesmo quando parecia impossível, por ter colocado pessoas incríveis em meu caminho e pela sua graça cheguei até aqui.

Aos meus pais, Francisco e Cleusa, agradeço por todos os conselhos, amor e dedicação, vocês que sob muito sol me fizeram chegar até aqui na sombra e me deram algo maior que qualquer bem material: a liberdade de sonhar. O apoio e os valores que me ensinaram foram as fundações sobre as quais construí não só esse trabalho, mas toda a minha trajetória.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada e tornaram o caminho mais leve, meu muito obrigada. Em especial: Amanda Bittencourt, Amanda Sousa, Ângelo Diniz, Franciely Camargos, Gabriel Bonifácio, Gabrielly Veríssimo, João Vicente, Mateus Marçal, Sal Perez e Paulo Calaça. Vocês foram minha família e sei que onde estiverem, sempre terei um lar.

Agradeço imensamente ao Diretório Acadêmico de Engenharia Química, pelo qual tive a honra e alegria de fazer parte. O convívio com pessoas tão singulares e o aprendizado adquirido se tornaram parte essencial de quem sou hoje. Foram experiências que me proporcionaram crescimento, pertencimento e inúmeras oportunidades.

Agradeço também aos bons professores que me formaram e que despertaram em mim a curiosidade em aprender, questionar e buscar mais. Em especial, ao meu orientador Ricardo Malagoni, pela orientação, pelas críticas construtivas e pela confiança no meu potencial. Ao professor Marcos Barrozo, minha sincera gratidão por tantas vezes me acolher com palavras amigas e por ser sempre uma presença generosa ao longo da graduação. À professora Marina Seixas, agradeço a orientação durante o estágio, por sua paciência e bondade.

Também agradeço a mim mesma, por ter seguido em frente mesmo quando era difícil. Por ter continuado quando o cansaço parecia maior que a vontade, e por não ter deixado que o medo falasse mais alto do que o sonho. Chegar até aqui é também mérito do meu esforço, da minha disciplina e da minha fé no processo.

A todos que caminharam ao meu lado neste percurso, meu coração transborda gratidão.

“Entregue o teu caminho ao Senhor; confie nele, e ele tudo fará.”- Salmos 37:5

RESUMO

Nos últimos anos, a crescente demanda por cosméticos naturais e ambientalmente responsáveis tem impulsionado a pesquisa por novos ingredientes ativos de origem vegetal, bem como por tecnologias limpas de extração. Neste contexto, o presente trabalho avaliou a viabilidade do extrato supercrítico de lúpulo (*Humulus lupulus*) como ativo em formulações cosméticas, com ênfase em sua atividade antimicrobiana. A fundamentação teórica abrangeu as propriedades fitoquímicas do lúpulo, as vantagens da extração com dióxido de carbono (CO₂) em condições supercríticas, uma técnica seletiva, de baixo custo, eficiente e ecologicamente correta para a obtenção desses compostos e a aplicação desses extratos em produtos cosméticos. Como apoio prático à discussão, um estudo de caso foi analisado com foco na aplicação do extrato em desodorantes, avaliando sua eficácia frente a microrganismos típicos da microbiota axilar, como *Corynebacterium xerosis* e *Staphylococcus epidermidis*, por meio de testes *in vitro* e *in vivo*. A revisão teórica conduzida reforça que os parâmetros operacionais da extração influenciam diretamente a composição do extrato e sua bioatividade. Este trabalho traz também uma reflexão sobre a possibilidade de aproveitamento de partes vegetativas do lúpulo como uso potencial para práticas futuras de economia circular. O trabalho contribui, assim, para o avanço de formulações cosméticas, tendo como base matérias-primas naturais. Espera-se que este estudo ofereça uma compreensão abrangente das técnicas de extração supercrítica de dióxido de carbono para o lúpulo, destacando o potencial desses extratos na formulação de produtos que atendam ao consumidor contemporâneo.

Palavras-chave: lúpulo; extração supercrítica; compostos bioativos; cosméticos; sustentabilidade.

ABSTRACT

In recent years, the growing demand for natural and environmentally responsible cosmetics has driven research into new active ingredients of plant origin, as well as into clean extraction technologies. In this context, this study evaluated the viability of supercritical extract of hops (*Humulus lupulus*) as an active ingredient in cosmetic formulations, with an emphasis on its antimicrobial activity. The theoretical basis covered the phytochemical properties of hops, the advantages of extraction with carbon dioxide (CO₂) under supercritical conditions, a selective, low-cost, efficient and environmentally friendly technique for obtaining these compounds, and the application of these extracts in cosmetic products. As practical support for the discussion, a case study was conducted focusing on the application of the extract in deodorants, evaluating its efficacy against typical microorganisms of the axillary microbiota, such as *Corynebacterium xerosis* and *Staphylococcus epidermidis*, by means of in vitro and in vivo tests. The theoretical review reinforces that the operational parameters of the extraction directly influence the composition of the extract and its bioactivity. The work also reflects on the possibility of using the vegetative parts of hops as a potential use for future circular economy practices. The work thus contributes to the advancement of cosmetic formulations based on natural raw materials. It is hoped that this study will provide a comprehensive understanding of supercritical carbon dioxide extraction techniques for hops, highlighting the potential of these extracts in formulating products that cater to the contemporary consumer.

Keywords: hops; supercritical extraction; bioactive compounds; cosmetics; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Inflorescência feminina (cone), com flores protegidas pelas brácteas e a raquis.	12
Figura 2 - Cone de lúpulo.....	13
Figura 3 - Glândulas de lupulina.	13
Figura 4 - Composição química das inflorescências femininas de lúpulo	16
Figura 5 - Estrutura química do Xanthohumol.....	17
Figura 6 - Produtos cosméticos contendo extrato de lúpulo disponíveis no mercado.....	20
Figura 7 - Representação das isotermas de um gás real	23
Figura 8 - Representação de um processo por extração supercrítica.....	24
Figura 9 - Resultados da zona de inibição dos protótipos de desodorantes.	33
Figura 10 - Pontuações médias de odor nas axilas em voluntários humanos.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influência das condições operacionais na composição fitoquímica dos extratos de lúpulo.....	25
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- **°C** - Celsius (referente à temperatura)
- **C₅H₉**: Prenil
- **CO₂** - Dióxido de carbono
- **EtOH** - Etanol
- **MAE** – Microwave-Assisted Extraction (Extração Assistida por Micro-ondas)
- **mg/mL** – Miligrama por mililitro
- **MPa** - Megapascal
- **P&ID** - Piping and Instrumentation Diagram (Diagrama de Processo e Instrumentação)
- **SFE** – Extração com Fluidos Supercríticos (*Supercritical Fluid Extraction*)
- **UAE** - Ultrasonic-Assisted Extraction (Extração Assistida por Ultrassom)
- **Xn** - Xanthohumol

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivo geral.....	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Lúpulo.....	11
2.2 Composição química do lúpulo.....	15
2.3 Efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e antimicrobianos	17
2.4 Métodos de extração	20
2.4.1 Extração supercrítica com CO ₂	22
2.4.1.1 Limitações da extração supercrítica com CO ₂	27
2.5 Aplicações dos extratos de lúpulo e subprodutos em formulações cosméticas	29
3 ESTUDO DE CASO: DESENVOLVIMENTO DE DESODORANTE EM BASTÃO COM EXTRATO SUPERCRÍTICO DE LÚPULO – ANÁLISE DA EFICÁCIA ANTIBACTERIANA.....	31
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
4.1 Conclusão.....	36
4.2 Sugestões para trabalhos futuros	37
REFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

A indústria cosmética tem passado por transformações significativas diante da crescente demanda dos consumidores por produtos naturais, eficazes e sustentáveis. Ingredientes bioativos de origem vegetal vêm ganhando espaço como alternativas promissoras aos compostos sintéticos, não apenas por apresentarem menor potencial de toxicidade e irritação, mas também por atenderem às diretrizes globais de responsabilidade ambiental e consumo consciente. Dentro deste panorama, formulações cosméticas têm incorporado uma variedade de ativos, como flavonoides, vitaminas, taninos, enzimas, ácidos orgânicos e óleos essenciais com o objetivo de aliar desempenho funcional à valorização de insumos naturais (Parekk, 2012; Delgado, 2020).

Nesse contexto, a extração supercrítica com dióxido de carbono (CO₂) destaca-se como uma tecnologia limpa, eficiente e seletiva para obtenção de compostos bioativos sensíveis. Ao operar em condições de temperatura e pressão cuidadosamente controladas, essa técnica permite extrair frações de interesse com alta pureza, sem a presença de resíduos tóxicos, e com mínima degradação térmica dos ativos (Sanz *et al.*, 2019; McCabe, 2005; Veiga *et al.*, 2021). Sua aplicabilidade na cosmetologia é estratégica, pois possibilita o desenvolvimento de produtos mais seguros e compatíveis com a pele, ao mesmo tempo em que promove uma abordagem inovadora para a utilização de insumos vegetais de alto valor agregado (Dacal *et al.*, 2016; Barreto *et al.*, 2023; Veiga *et al.*, 2021).

Em se tratando de insumos vegetais, o lúpulo (*Humulus lupulus*), tradicionalmente conhecido por seu uso na fabricação de cerveja, surge como uma matéria-prima relevante para esse novo cenário. Rico em compostos como os ácidos amargos (alfa e beta), flavonoides, entre outras resinas, o lúpulo apresenta propriedades antimicrobianas, antioxidantes e anti-inflamatórias de interesse cosmético e farmacêutico (Karabin *et al.*, 2016; Zanolli; Zavatti, 2008). A possibilidade de extrair tais compostos por meio de CO₂ supercrítico amplia as perspectivas de sua aplicação em formulações naturais, como em dermocosméticos (Inumaro *et al.*, 2023).

Dessa maneira, a extração supercrítica surge como uma técnica de destaque para a obtenção desses compostos, devido à sua eficiência, seletividade, baixa toxicidade e baixo impacto ambiental. Essa abordagem permite uma maior facilidade de o solvente penetrar na camada sólida e entrar em contato com as substâncias a serem extraídas, minimizando a degradação de compostos termolábeis e possibilitando a remoção completa do solvente do extrato final. Isso resulta na obtenção de extratos de alta pureza, livres de resíduos de

solventes, enquanto preserva as propriedades bioativas dos compostos de interesse (Maul, Wasicky, Bacchi, 1996).

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho surgiu a partir da minha participação no programa Cientistas do Futuro, promovido pela L'Oréal, onde tive a oportunidade de apresentar uma proposta de formulação anticaspa utilizando extrato de lúpulo como ativo principal e empregando a extração supercrítica como metodologia de obtenção limpa e sustentável. A experiência reforçou o potencial multifuncional do lúpulo na cosmetologia e despertou o interesse em aprofundar a investigação científica sobre suas propriedades bioativas e aplicações cosméticas.

Posto isto, este trabalho propôs uma pesquisa bibliográfica a fim de avaliar a viabilidade do extrato supercrítico de lúpulo como ativo em formulações cosméticas, com ênfase em seu desempenho antimicrobiano e estabilidade em formulações naturais. Por meio da discussão entre a fundamentação teórica e um estudo de caso experimental, foram exploradas as vantagens da extração supercrítica com CO₂ na preservação da bioatividade dos compostos do lúpulo, bem como sua eficácia frente a microrganismos como *Corynebacterium xerosis* e *Staphylococcus epidermidis*, causadores de mau odor nas axilas, em testes *in vitro* e *in vivo*.

Adicionalmente, o trabalho discutiu o impacto dos parâmetros operacionais da extração (como temperatura, pressão e uso de cossolventes) sobre o rendimento e o perfil fitoquímico do extrato, destacando a importância da escolha das condições de processo para garantir sua funcionalidade em aplicações cosméticas.

A relevância desta pesquisa se evidencia ao unir engenharia de processos, fitoquímica e inovação cosmética. Além disso, ao explorar um ativo vegetal pouco usual na área cosmética e empregar uma tecnologia limpa e seletiva como a extração supercrítica, o estudo contribui para o avanço de formulações alinhadas às exigências do consumidor moderno.

Embora o foco deste estudo não tenha sido o uso direto de resíduos da indústria cervejeira, a utilização de partes vegetativas do lúpulo aponta para um potencial futuro de aproveitamento sustentável, reforçando a pertinência do tema dentro das práticas alinhadas à inovação verde. Dessa forma, o presente trabalho contribui para a discussão sobre a viabilidade técnico-científica do uso de extratos naturais em cosméticos, alinhando-se, ainda que de forma prospectiva, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis).

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma revisão da bibliografia acerca da extração supercrítica de lúpulo com dióxido de carbono para obter extratos bioativos visando formulações cosméticas.

1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos foram:

- Realizar uma revisão detalhada da literatura sobre os princípios e técnicas da extração supercrítica de lúpulo.
- Investigar os melhores parâmetros de operação no processo de extração supercrítica de lúpulo utilizando dióxido de carbono (CO₂) em termos de seletividade e rendimento.
- Avaliar a eficácia, segurança e atividade antimicrobiana dos extratos de lúpulo em formulações cosméticas por meio de estudo de caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho está organizado de modo a apresentar primeiramente os principais conceitos sobre os compostos bioativos do lúpulo e a técnica de extração supercrítica com CO₂ em comparação com outros métodos. Seguido do Capítulo 3

, em que é discutido um estudo de caso que avalia como o extrato obtido pode ser usado em formulações cosméticas, focando na sua ação contra bactérias. Com isso, espera-se incentivar o desenvolvimento de cosméticos baseados em ativos naturais, com maior desempenho funcional e alinhados às tendências por soluções mais responsáveis e que respeitem o meio ambiente.

2.1 Lúpulo

O lúpulo (*Humulus lupulus*) é uma planta originária da China e pertencente à família das *Cannabaceae*, amplamente reconhecida por seu uso na produção de cerveja, sendo cultivada desde tempos antigos para esse fim (Durello *et al.*, 2019). Além de seu papel na fabricação de cerveja, o lúpulo possui uma longa história de uso em diversas culturas para várias finalidades medicinais e culinárias. Na medicina tradicional, o lúpulo é comumente utilizado para tratar uma variedade de condições, como distúrbios do sono, ansiedade e problemas digestivos há mais de dois mil anos (Zanolli; Zavatti, 2008; Sung *et al.*, 2015). Cultivado em diversas regiões temperadas do mundo, os principais produtores incluem a Alemanha, os EUA, a China e a República Checa. No Brasil, destaca-se o "lúpulo da Mantiqueira", uma variedade cultivada na Serra Gaúcha (Tonini; Perez, 2020).

Do ponto de vista botânico, o lúpulo é uma planta trepadeira dioica, ou seja, com inflorescências masculinas e femininas em indivíduos separados (Rodrigues *et al.*, 2015; Spósito *et al.*, 2019). Esse tipo de planta requer a presença de ambos os sexos para a reprodução, sendo que as flores masculinas são responsáveis pela produção de pólen, enquanto as flores femininas (conhecidas como cones ou estróbilos), desenvolvem os frutos. A planta pode atingir alturas de 6 a 8 metros em cerca de três meses após o plantio (Spósito *et al.*, 2019).

À medida que a inflorescência feminina cresce, cada par de flores é envolvido por uma bráctea, e cada flor possui uma bractéola, processo que segue até a formação do cone. Este cone é composto por um eixo central chamado raquis, que contém entre 10 e 30 pares de flores por inflorescência (Spósito *et al.*, 2019). Durante o amadurecimento, as brácteas e as

bractéolas se desenvolvem ao redor desse eixo, completando a formação do cone como apresentado na Figura 1.

Durante o amadurecimento dos cones, desenvolvem-se na base das bractéolas estruturas menores chamadas tricomas secretores, conhecidos como glândulas de lupulina, responsáveis pela produção de uma variedade de compostos bioativos, como resinas, ácidos alfa e beta, óleos essenciais, flavonoides, terpenos e polifenóis (Nascimento, 2017; Delgado, 2020; Zanolli; Zavatti, 2008; Spósito *et al.*, 2019). Compreender a estrutura do cone é essencial para definir estratégias de extração mais eficientes, uma vez que na extração supercrítica, visa-se acessar diretamente as glândulas de lupulina.

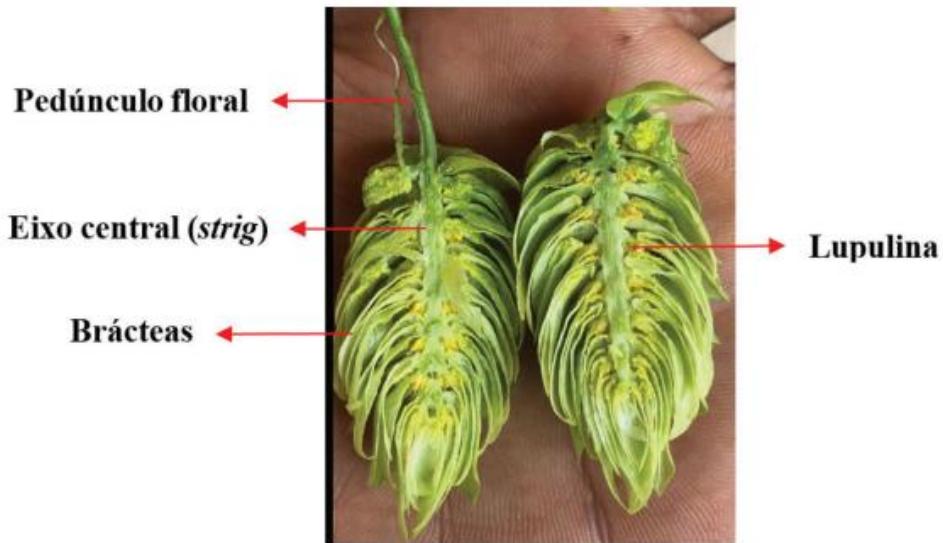
Figura 1 - Inflorescência feminina (cone), com flores protegidas pelas brácteas e a raquis.



Fonte: Spósito (2019).

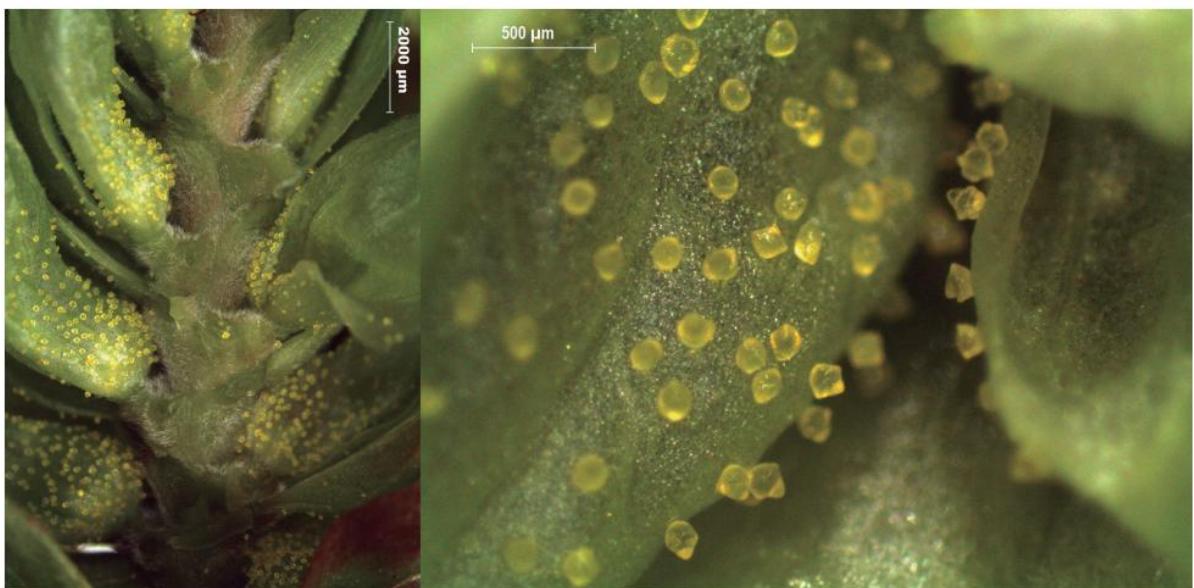
Esses compostos conferem ao lúpulo aroma, sabor característico e propriedades antioxidantes, antimicrobianas e anti-inflamatórias, que são amplamente exploradas tanto na indústria cervejeira quanto em aplicações modernas, como cosméticos e produtos farmacêuticos (Kowalczyk *et al.*, 2013; Karabin *et al.*, 2016). Nas Figuras 2 e 3 são ilustradas as glândulas de lupulina localizadas na base das bractéolas.

Figura 2 - Cone de lúpulo.



Fonte: Durello (2019).

Figura 3 - Glândulas de lupulina.



Fonte: Spósito (2019).

Ao apresentar essas propriedades, o lúpulo tem despertado interesse na indústria de cosméticos para aplicação em uma variedade de produtos. Incluindo formulações para cuidados com a pele, como cremes, protetor solar e loções faciais, bem como produtos para cabelo, como xampus e condicionadores (Delgado, 2020). Essa capacidade de combater bactérias deve-se principalmente à presença dos ácidos alfa e beta, o que torna o lúpulo um componente eficaz em desodorantes, proporcionando uma ação prolongada contra o mau odor

(Karabin *et al.*, 2016). Além disso, essas propriedades tornam o lúpulo um excelente aliado no combate ao envelhecimento precoce da pele (Zanolli; Zavatti, 2008).

Além dos estudos focados nos cones de lúpulo, alguns estudos investigam outras partes da planta e seus subprodutos, como folhas e caule, frequentemente descartados no processo cervejeiro, mas que apresentam atividades antioxidantes semelhantes aos encontrados no cone. Isso é relevante pois amplia as possibilidades de aproveitamento dos resíduos da indústria cervejeira, contribuindo para redução do desperdício e aproveitamento sustentável dos recursos naturais, podendo ser explorados em diferentes áreas (Macchioni; Picchi; Carbone, 2021).

2.2 Composição química do lúpulo

O lúpulo, por ser uma planta rica em metabólitos secundários, apresenta uma composição química complexa, envolvendo diversos compostos bioativos que são essenciais para o sabor, aroma e outras propriedades da planta. Esses compostos estão concentrados nas inflorescências femininas do lúpulo e uma forma eficiente de analisá-los é por meio da classificação dos metabólitos secundários em diferentes frações, como resinas, polifenóis, óleos essenciais, proteínas, ceras, esteroides, entre outros (Durello, 2019; Spósito *et al.*, 2019).

A proporção de compostos presentes no lúpulo varia de acordo com diversos fatores, como a variedade da planta, o local de cultivo, as técnicas utilizadas, o grau de maturação no momento da colheita, além de influências pós-colheita, como o processo de secagem, peletização e armazenamento (Santiago, 2022).

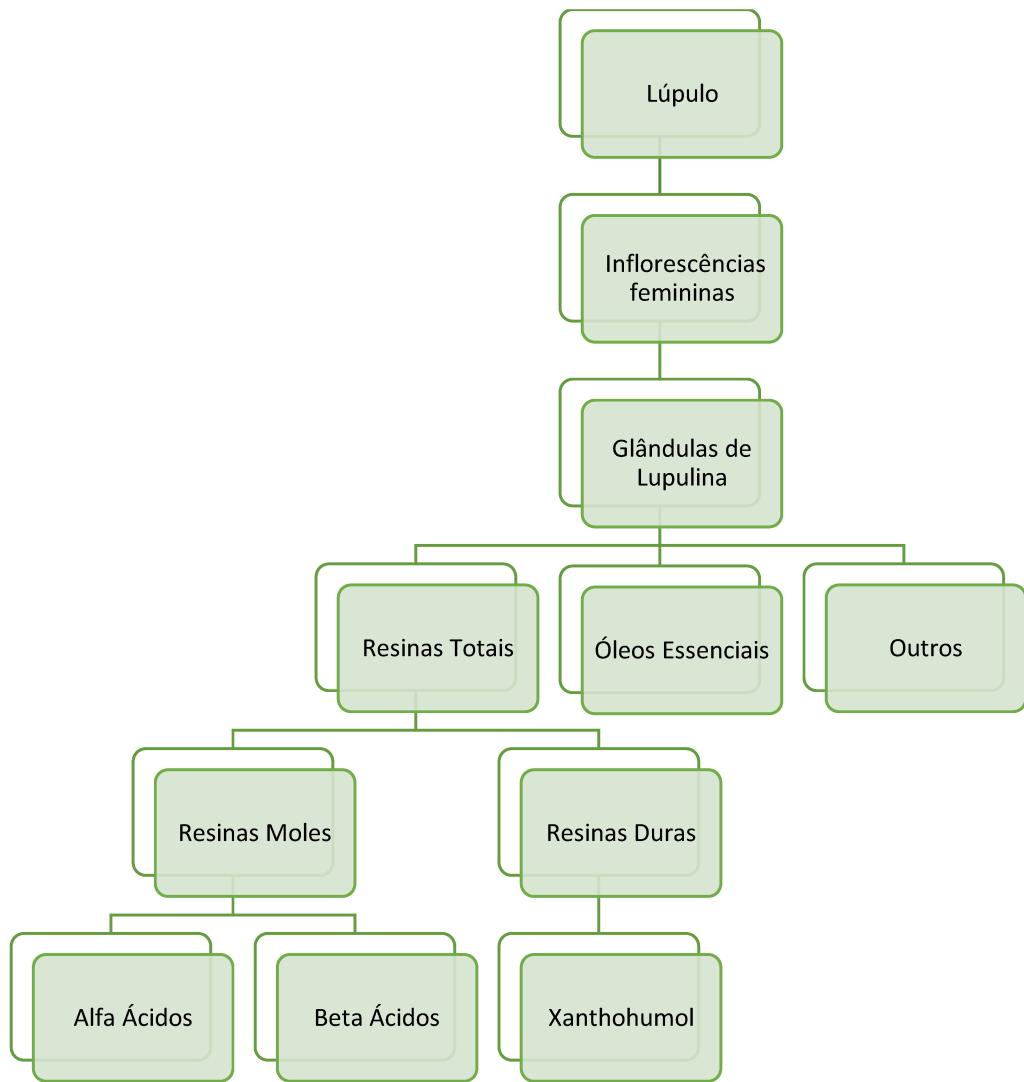
As resinas totais do lúpulo representam de 15% a 30% de sua massa e podem ser divididas em resinas macias e duras. Essas divisões estão apresentadas na Figura 4 (Durello, 2019).

As resinas macias contêm os α -ácidos (*Humulona*, *Cohumulona*, *Adhumulona*, *Prehumulona* e *Poshumulona*), além da fração β , podendo ser subdividida em β -ácidos (*Lupulona*, *Colupulona*, *Adlupulona*, *Prelupulona* e *Poslupulona*) e resinas macias não caracterizadas.

As resinas duras do lúpulo constituem de 3% a 5% do seu peso total e, em contraste com as resinas moles, são compostas por substâncias mais polares, o que explica sua insolubilidade em hexano. Estas resinas contêm uma combinação complexa de polifenóis, como proantocianidinas, ácidos fenólicos, glicosídeos de flavonóis e prenil calconas, com destaque para o prenilflavonóide xanthohumol (0,3-1,5%), que é um dos principais representantes desse grupo de compostos por ser o componente majoritário da resina dura, além de ser uma substância encontrada exclusivamente no lúpulo (Durello, 2019).

Já o óleo essencial do lúpulo é composto por uma ampla gama de substâncias com diferentes características físico-químicas, biológicas e organolépticas, que pode ser dividido em três frações principais: hidrocarbonetos (monoterpenos e sesquiterpenos), compostos oxigenados (álcoois terpênicos, álcoois sesquiterpênicos e outros compostos com oxigênio) e compostos contendo enxofre (tioésteres, sulfetos e outros compostos sulfurosos) (Karabin *et al.*, 2016).

Figura 4 - Composição química das inflorescências femininas de lúpulo



Fonte: Adaptado de Durello (2019).

Dessa forma, a complexidade estrutural e a diversidade dos metabólitos secundários do lúpulo evidenciam não apenas seu potencial de aplicação em diferentes áreas, mas também a necessidade de uma abordagem criteriosa para sua caracterização e aproveitamento. A distribuição desigual das suas frações demanda estratégias de extração que preservem a integridade e a funcionalidade desses constituintes. Nesse contexto, o conhecimento aprofundado sobre a composição química do lúpulo não só contribui para fins analíticos e científicos, como também fundamenta o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, capazes de concentrar os princípios ativos de interesse e direcionar sua aplicação em formulações de maior valor agregado.

2.3 Efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e antimicrobianos

O lúpulo (*Humulus lupulus*) é uma planta que, desde a antiguidade, tem sido utilizada para diversos fins relacionados à saúde. Os antigos egípcios e romanos já reconheciam suas propriedades medicinais, empregando-o no tratamento de insônia e indigestão (Ramos *et al.*, 2024; Zanolli; Zavatti, 2008). Hoje se sabe que o lúpulo é rico em compostos bioativos, como flavonoides, ácidos fenólicos e resinas, que possuem atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas, tornando a planta ainda mais relevante para a medicina moderna (Dabrowski *et al.*, 2024).

A crescente demanda por ingredientes naturais tem impulsionado a pesquisa sobre os compostos bioativos do lúpulo, especialmente na indústria farmacêutica e cosmética. Estudos recentes têm destacado o potencial do lúpulo na prevenção de doenças crônicas, no tratamento de distúrbios de pele e no combate ao envelhecimento celular. O xanthohumol (Xn), flavonoide citado anteriormente, por exemplo, tem sido amplamente investigado devido à sua capacidade de neutralizar radicais livres e reduzir o estresse oxidativo, fator chave no desenvolvimento de doenças degenerativas e no envelhecimento precoce da pele (Tošović, 2024; Durello, 2019). A representação da estrutura química do xanthohumol é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Estrutura química do Xanthohumol



Fonte: Sigmaaldrich.com (2016).

O xanthohumol (Xn) é um flavonoide pertencente ao grupo dos prenilflavonoides, distinguido pela presença de um grupo prenil (C_5H_9) em sua estrutura química. Essa modificação estrutural confere ao composto maior lipofilicidade, o que favorece sua absorção, distribuição e metabolização no organismo, além de potencializar sua afinidade por membranas celulares. Como consequência, o xanthohumol tende a se acumular em tecidos

lipofílicos, aumentando sua eficácia nas células-alvo. Essas propriedades farmacocinéticas, associadas à sua potente bioatividade, o torna um candidato promissor para aplicações terapêuticas, especialmente como agente anticancerígeno (Kasica; Kaleczyc, 2024; Jiang, 2018; Durello, 2019).

Estudos recentes também sugerem que o xanthohumol pode ter efeitos terapêuticos em condições inflamatórias graves. Uma pesquisa realizada por Dabrowski *et al.* (2023) demonstrou que o tratamento com xanthohumol em pacientes com COVID-19 resultou em uma redução significativa na resposta inflamatória e na gravidade da tempestade de citocinas, além de apresentar uma diminuição na taxa de mortalidade e melhorar os resultados clínicos em indivíduos gravemente afetados pela doença.

A capacidade anti-inflamatória do xanthohumol (Xn) foi confirmada em diversas condições patológicas, destacando suas propriedades benéficas no tratamento de disfunções inflamatórias por atuar inibindo respostas inflamatórias ao influenciar mecanismos de receptores e ativação celular (Vazquez, 2021; Kasica; Kaleczyc, 2024). Em um estudo *in vitro* com células endoteliais da veia umbilical humana expostas ao Xn, foi observada a redução do dano endotelial induzido pela inflamação (Corrado *et al.*, 2023). Além disso, um experimento em ratos diabéticos com feridas difíceis de curar revelou uma significativa diminuição das citocinas pró-inflamatórias e do estresse oxidativo após tratamento com Xn (Chen, 2021; Miranda, 2016; Rancán, 2017).

Estudos conduzidos pela Biodynamics, localizada em Ostend, Bélgica, também investigaram os efeitos do extrato de lúpulo em mulheres pós-menopausa e demonstraram uma melhoria significativa no desconforto relacionado à menopausa, além de uma melhor qualidade de vida (Heyerick, 2005). O mecanismo de ação do Xn e outras resinas presentes no lúpulo, reforça seu potencial terapêutico no tratamento de diversas doenças graves, incluindo sepse, infecções virais e cânceres. Suas propriedades anti-inflamatórias, antioxidantes e antiangiogênicas abrem caminho para seu uso em tratamentos para essas condições (Dabrowski *et al.*, 2024).

No que se diz respeito às propriedades antibacterianas do lúpulo, diversos estudos realizados nos últimos 10 anos destacam a eficácia dos compostos bioativos, como a lupulona e o xanthohumol. Essas substâncias demonstraram capacidade de inibir o crescimento de bactérias Gram-positivas em testes *in vitro*. Além disso, quando combinados com outros antibióticos, esses compostos podem exercer efeitos sinérgicos, potencializando a atividade antibacteriana contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas (Betancur, Salazar, 2023;

Fahle *et al.*, 2022). Em pesquisas recentes, foi revelado que os extratos de lúpulo exibem atividade significativa também contra bactérias causadoras de acne. Os extratos de CO₂ de lúpulo, com alto teor de humulona e lupulona, mostraram um efeito inibitório sobre *Propionibacterium acnes* e *Staphylococcus aureus*, duas das principais bactérias responsáveis pelo desenvolvimento da acne, o que torna os compostos do lúpulo uma alternativa promissora para tratamentos antimicrobianos (Kolenc *et al.*, 2022).

A jornada dos compostos bioativos do lúpulo, começou com o crescente interesse da comunidade científica devido aos seus comprovados benefícios para a saúde (Kasica; Kaleczyc, 2024). Nesse contexto, suas propriedades bioativas têm se mostrado promissoras para o desenvolvimento de produtos cosméticos, levando à sua incorporação em diversas formulações, tornando-se um ingrediente valorizado em produtos de cuidados com a pele, principalmente por suas capacidades de proteger a pele contra danos causados por radicais livres, reduzir a inflamação cutânea e promover o rejuvenescimento da pele, aliviando os sinais de envelhecimento e melhorando sua estrutura e firmeza (Santos, 2020). No que se refere ao cuidado capilar, o lúpulo, quando associado a outros componentes, tem se mostrado relevante no tratamento de problemas do couro cabeludo, como caspa e irritações (Delgado, 2020).

Na produção cosmética, os compostos bioativos do lúpulo são extraídos por meio de técnicas avançadas, sendo a extração com CO₂ supercrítico uma das mais promissoras. Esse processo permite a obtenção dos extratos de maneira eficiente e pura, sem a utilização de solventes prejudiciais, assegurando a qualidade dos produtos finais e viabilizando a aplicação desses extratos em cremes, séruns, formulações semissólidas e outros cosméticos de cuidado da pele e dos cabelos (Durello, 2019; Santos *et al.*, 2024). Como forma de ilustrar essa aplicação prática, na Figura 6 são apresentados exemplos de produtos disponíveis no mercado que utilizam extratos de lúpulo em suas composições.

A Figura 6 é composta por três produtos: xampu anticaspa com extrato de lúpulo, desodorante masculino com ação refrescante e spray calmante reparador, todos contendo extratos vegetais em sua formulação, com destaque para o lúpulo.

Diante do exposto, os compostos bioativos do lúpulo, demonstram um notável potencial terapêutico, farmacêutico e cosmético, devido às suas propriedades. Esses atributos sustentam o crescente interesse por essa planta como ingrediente funcional em formulações dermatológicas. No entanto, a eficácia desses compostos está diretamente relacionada à forma como são extraídos e incorporados aos produtos, sendo essencial garantir a preservação de

suas propriedades bioativas. Nesse sentido, torna-se fundamental discutir as diferentes técnicas de extração existentes, avaliando suas vantagens e limitações em relação à preservação e à seletividade dos princípios ativos, tema abordado na próxima seção.

Figura 6 - Produtos cosméticos contendo extrato de lúpulo disponíveis no mercado.



Fonte: Cosméticos, Danny (2025); Idun Nature (2025); Sallve (2025).

2.4 Métodos de extração

Os óleos essenciais são compostos por uma complexa mistura de substâncias voláteis que se originam do metabolismo secundário das plantas, contribuindo para suas propriedades aromáticas e terapêuticas. Em geral, esses óleos são obtidos por meio de métodos de extração, sendo a hidrodestilação um dos processos mais utilizados, caracterizado pela destilação com o auxílio de água (Sharp; Laws, 1981 apud Justen, 2019). No caso da extração do lúpulo, o principal objetivo é a obtenção concentrada de seus componentes-chave, como os óleos essenciais e resinas. Esse processo varia de acordo com as tecnologias empregadas e as condições específicas de extração (Justen, 2019).

Os métodos tradicionais de extração dos constituintes do lúpulo incluem a utilização de solventes orgânicos, destilação a vapor, hidrodestilação, extração por fluido pressurizado, dentre outros métodos (Sanz *et al.*, 2019). Vale ressaltar que os métodos que utilizam solventes orgânicos exigem uma etapa adicional de separação para a recuperação do solvente, e durante a destilação, uma parte significativa dos componentes voláteis pode ser perdida do

extrato final. Além disso, esses solventes geralmente apresentam baixa seletividade, o que pode resultar na extração conjunta de compostos indesejados. A destilação a vapor, por sua vez, segundo Pavlić *et al* (2015), requer altas temperaturas, o que pode comprometer a qualidade do extrato devido à degradação dos compostos termossensíveis.

Além dos métodos já consolidados, técnicas emergentes como a extração assistida por ultrassom (UAE) e por micro-ondas (MAE) têm ganhado destaque como alternativas promissoras, principalmente por sua eficiência energética, menor tempo de processamento e uso reduzido de solventes (Chan *et al.*, 2016). Embora ainda sejam pouco aplicadas especificamente à matriz do lúpulo, essas abordagens vêm despertando interesse crescente em pesquisas voltadas à extração de compostos bioativos vegetais.

No entanto, apesar de seu potencial, essas tecnologias apresentam limitações importantes, como dificuldades de escalabilidade industrial, menor reprodutibilidade entre diferentes lotes e controle limitado da seletividade, especialmente em materiais vegetais complexos como o lúpulo, a MAE em específico, também pode gerar calor excessivo, especialmente em materiais de maior condutividade térmica, o que pode levar à degradação de compostos termolábeis (Chan *et al.*, 2016). Tais restrições comprometem sua aplicabilidade prática em processos que exigem alto grau de padronização, como na indústria cosmética. Por essas razões, UAE e MAE não foram priorizadas como uma possível técnica neste trabalho.

Diante dessas limitações, têm-se buscado métodos mais seletivos, eficientes e compatíveis com os requisitos da indústria, como a extração com fluido supercrítico (SFE). Essa técnica se destaca por operar em temperaturas moderadas, preservando compostos sensíveis ao calor, além de oferecer elevada eficiência de extração e seletividade ajustável por meio do controle de pressão, temperatura e co-solventes. A facilidade na remoção do solvente, devido à rápida evaporação do CO₂ sob pressão reduzida, também representa uma vantagem significativa, resultando em extratos mais puros e compatíveis com aplicações cosméticas (Veiga *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a extração por fluido supercrítico (SFE) apresenta características físico-químicas vantajosas, como baixa viscosidade, alta difusividade e densidade semelhante à de líquidos, o que favorece a penetração nos sólidos e o contato com os compostos-alvo, permitindo maior seletividade e eficiência no processo de extração (McCabe, 2005).

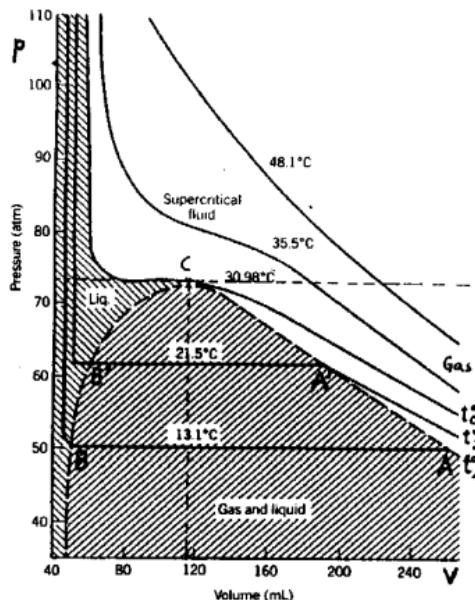
2.4.1 Extração supercrítica com CO₂

A extração por fluido supercrítico, utilizando dióxido de carbono (CO₂) como solvente, tem se destacado como uma das abordagens mais eficazes e sustentáveis para a obtenção de extratos de alta qualidade a partir do lúpulo. O CO₂ é amplamente utilizado nesse processo devido às suas propriedades favoráveis: trata-se de um solvente apolar, inodoro, inerte, não tóxico, não inflamável e com baixo impacto ambiental. Além disso, não deixa resíduos químicos no produto, sendo facilmente removido por despressurização, o que resulta em extratos puros e livres de solventes (Inumaro *et al.*, 2023).

Em comparação com os métodos tradicionais de extração que utilizam solventes orgânicos, o processo de extração por fluido supercrítico com CO₂ é mais econômico, pois elimina a necessidade de separação e recuperação do solvente, reduzindo os custos operacionais (Pavlić *et al.*, 2015). Além disso, o uso de CO₂ como solvente permite operar em temperaturas moderadas (10 a 70°C), evitando a degradação de compostos termolábeis presentes na matéria-prima. Portanto, a extração por fluido supercrítico com CO₂ emerge como uma alternativa promissora, oferecendo um processo mais acessível, eficiente e ambientalmente correto para a obtenção de extratos bioativos de alta qualidade (Oliveira, 2023).

Para que o CO₂ atinja o estado supercrítico, é necessário que tanto a temperatura quanto a pressão estejam acima dos seus valores críticos: 31,1°C e 73,8 bar, respectivamente. Acima da temperatura crítica, o CO₂ não passa mais por transição gasoso-líquido convencional, mas entra em estado supercrítico, com propriedades intermediárias entre líquido e gás, apresentando alta difusividade e baixa viscosidade, o que favorece sua penetração na matriz sólida e solubilização seletiva de compostos (Maul, Wasicky, Bacchi, 1996). A representação gráfica dessa transição pode ser observada na Figura 7, que ilustra o comportamento do gás em diferentes isotermas, destacando a região onde ocorre a mudança para o estado supercrítico.

Figura 7 - Representação das isotermas de um gás real.

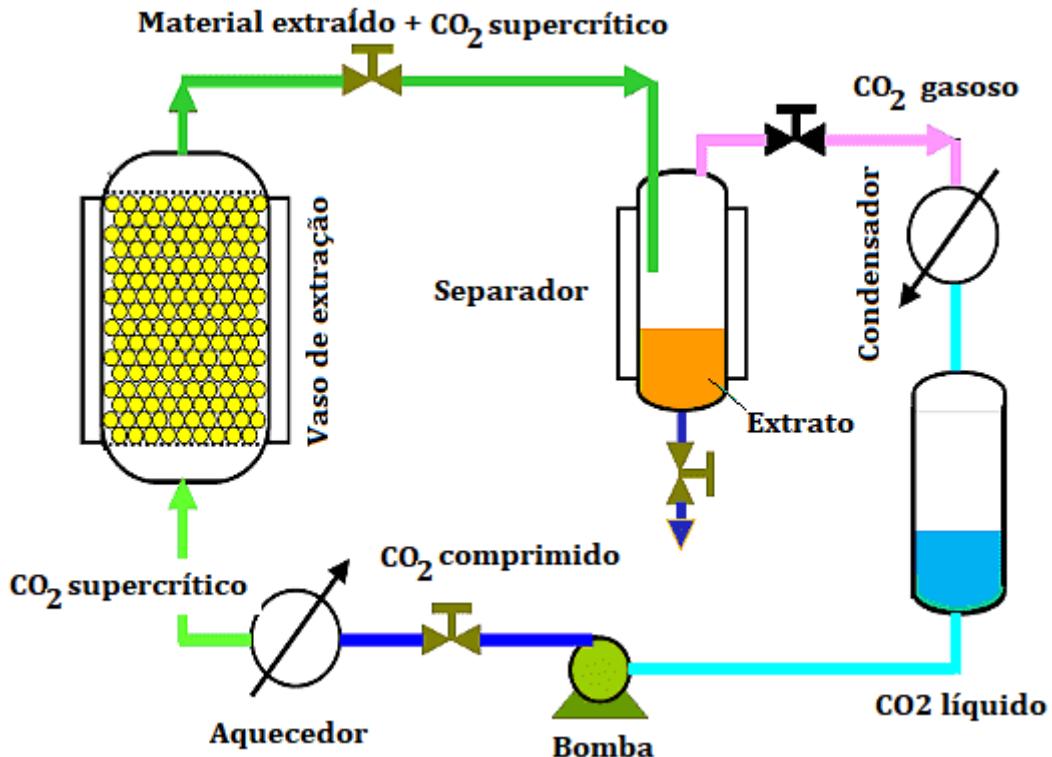


Fonte: Maul, Wasicky, Bacchi (1996).

O diagrama apresentado na Figura 7 evidencia a transição do estado gasoso para o estado supercrítico, sendo o ponto A: início da liquefação; B: fim da liquefação e C: ponto crítico, onde o fluido apresenta características supercríticas.

A extração supercrítica com CO₂ envolve um sistema composto por uma fonte de CO₂, compressor de alta pressão, vaso extrator, válvula de expansão e câmara de separação, além de controladores de temperatura e pressão. O CO₂ pressurizado no estado líquido é aquecido até atingir o estado supercrítico e, ao atravessar a matriz sólida no extrator, solubiliza os compostos desejados. Em seguida, a mistura soluto-solvente sofre expansão na válvula de descompressão, reduzindo temperatura e pressão, o que promove a precipitação do extrato no frasco coletor. O CO₂, agora no estado gasoso, pode ser recirculado no sistema, tornando o processo mais eficiente, especialmente em escala industrial (Maul, Wasicky, Bacchi; Delgado, 2020). A Figura 8 apresenta a representação esquemática desse processo em um diagrama

Figura 8 - Representação de um processo por extração supercrítica



Fonte: Sebrae, 2023.

A avaliação criteriosa dos parâmetros operacionais, como temperatura e pressão, é fundamental na extração supercrítica com CO₂, uma vez que essas variáveis influenciam diretamente a solubilidade dos compostos-alvo no solvente supercrítico. Condições adequadas de extração não apenas afetam o rendimento, mas também determinam a composição e as propriedades físico-químicas do extrato final. A seleção otimizada desses parâmetros pode resultar em maior seletividade e máxima eficiência na obtenção dos compostos desejados, contribuindo significativamente para a qualidade do produto e a viabilidade do processo. (Sanz *et al.*, 2019; Echim *et al.*, 2011).

A escolha adequada desses parâmetros permite direcionar a extração para determinados grupos de compostos, como óleos essenciais, ácidos amargos ou compostos fenólicos. Por exemplo, condições mais suaves, como temperatura em torno de 40°C e pressão de 10 MPa, têm sido associadas à preservação e maior concentração de compostos bioativos termossensíveis, conforme observado por Inumaro (2023). Por outro lado, temperaturas e pressões mais elevadas tendem a aumentar a solubilidade do CO₂, promovendo

maior rendimento global, porém com risco de degradação de compostos voláteis e menor seletividade.

Segundo Inumaro (2023), a extração de resíduos de cones de lúpulo por CO₂ supercrítico apresentou rendimentos e perfis fitoquímicos distintos de acordo com as condições experimentais. Temperaturas mais baixas (40°C), pressões moderadas (10 MPa) e a adição de 5% a 10% de etanol resultaram em extratos com maior concentração de compostos como α-copaeno, β-elemeno e óxido de cariofileno, bem como atividade antioxidante em ensaios celulares. Por outro lado, condições similares de temperatura e pressão, mas com 10% de etanol, favoreceram compostos como acetato de nerolidil e β-acorenol, além de melhorar a atividade antioxidante química.

Além disso, Sanz *et al* (2019) reforça que o rendimento da extração pode aumentar significativamente com a elevação da pressão, chegando a ser quase seis vezes maior entre 10 e 20 MPa a 55°C. A razão entre α-ácidos e β-ácidos também foi influenciada positivamente pelo aumento da pressão na faixa de 12–20 MPa, em temperaturas entre 40 e 60°C. No entanto, temperaturas superiores a 40°C podem provocar reações indesejadas, como degradação térmica, oxidação e isomerização de α-ácidos, resultando em alterações sensoriais e perda de compostos bioativos. Esses autores recomendam faixas operacionais de 20–30 MPa e 40–50°C como as mais adequadas para maximizar o rendimento e manter a integridade dos compostos do lúpulo.

A Tabela 1 ilustra exemplos de composições dos extratos em função das variações de temperatura e pressão observadas por Sanz *et al* (2019), bem como em três regimes de extração com CO₂: em estado líquido, supercrítico em um estágio e supercrítico em dois estágios e por último com adição de cossolventes, demonstrando a diversidade fitoquímica resultante dessas combinações. Esses dados reforçam a importância de uma avaliação criteriosa dos parâmetros operacionais, uma vez que a escolha adequada das condições de extração é essencial para direcionar a seletividade e maximizar a recuperação dos compostos de interesse, de acordo com o perfil fitoquímico desejado no extrato.

Tabela 1 - Influência das condições operacionais na composição fitoquímica dos extratos de lúpulo.

Condições operacionais	Composição do extrato
CO₂ líquido	Óleos, α-ácidos (>40%), β-ácidos
5 – 6,1 MPa, 16 – 25°C	

8 – 11 MPa, 40-60°C CO ₂ puro	Óleo essencial, α -ácidos, β -ácidos
Extração supercrítica com CO₂ em 2 estágios	
8 – 11 MPa, 50°C	Óleo essencial (floral)
11 MPa, 50°C	Óleo essencial (serquiterpenoides)
15 MPa, 40°C	Óleo essencial
25– 30 MPa, 40-48°C	α -ácidos (41%)
85 – 95 MPa, 75-90°C	Xanthohumol
8 – 11 MPa, 40-60°C CO ₂ puro	Xanthohumol
Extração supercrítica com CO₂ e cossolventes	
25 MPa, 50°C + EtOH	Flavonoides
2,5-6 MPa, 50°C + EtOH + acetona	Xanthohumol

Fonte: Adaptado de Sanz *et al.* (2019), com base em dados de diversos autores.

As conclusões do estudo em questão, demonstram que a extração com CO₂ líquido (5–6,1 MPa, 16–25°C) resultou majoritariamente na recuperação de óleos e altos teores de ácidos, sendo mais eficiente para compostos voláteis, porém com menor capacidade de extração global. A extração supercrítica com CO₂ puro em um único estágio permitiu a obtenção de óleo essencial e ácidos amargos, indicando um bom equilíbrio entre rendimento e seletividade. Já a extração em dois estágios, com variações de pressão e temperatura (de 8 a 95 MPa e 40 a 90°C), proporcionou fracionamento mais eficiente: em pressões mais baixas, predominam óleos essenciais florais e sesquiterpenoides; já em pressões mais altas (faixas entre 25-30 MPa), destacam-se α -ácidos, e em condições extremas (85–95 MPa, 75–90°C), houve extração seletiva de xanthohumol.

A adição de cossolventes como etanol (EtOH) e acetona demonstraram uma estratégia eficaz para ampliar a polaridade do meio extrator, viabilizando a recuperação de compostos mais polares, como flavonoides e xanthohumol, mesmo em pressões mais baixas (2,5–6MPa). Além disso, é fundamental considerar também fatores como tempo de extração, taxa de fluxo de CO₂ e tamanho das partículas de lúpulo para garantir resultados consistentes e reproduutíveis (Echim *et al.*, 2011).

No estudo da variedade de lúpulo Ella, as condições ótimas sugeridas para a extração supercrítica com CO₂ foram pressão entre 37 e 38 MPa, temperatura próxima a 43 °C e tempo de extração de 80 a 85 minutos. O material utilizado consistiu em pellets de lúpulo moídos com tamanho médio em torno de 0,5 mm, valor que otimiza a área de superfície disponível para o contato com o CO₂ supercrítico, sem causar problemas de compactação no leito de

extração. Nestas condições, o rendimento alcançado foi de aproximadamente 26,3 g de extrato para cada 100 g de pellets processados, correspondendo a um rendimento em torno de 26% (Nagybákay *et al.*, 2021).

2.4.1.1 Limitações da Extração Supercrítica com CO₂

Apesar das vantagens da extração supercrítica com CO₂, essa técnica também possui algumas limitações. Uma delas é a seletividade dos compostos extraídos, que pode ser influenciada pela temperatura e pressão durante o processo como visto anteriormente. Além disso, a eficiência da extração pode ser comprometida quando os compostos têm baixa solubilidade em CO₂ supercrítico (Inumaro *et al.*, 2023).

Outra limitação importante é o alto custo dos equipamentos envolvidos, o que restringe sua aplicação em produtos com baixo valor agregado ou rendimento limitado. No entanto, essa tecnologia é altamente indicada para o isolamento, remoção ou concentração de princípios ativos naturais, como antioxidantes, corantes, compostos responsáveis por características sensoriais e situações em que a seletividade e eficiência do método justificam seu investimento, como no caso da extração de compostos do lúpulo (Maul, 1996).

Para contornar a limitação técnica relacionada à solubilidade e seletividade, estratégias como o uso de co-solventes vêm sendo amplamente adotadas. Compostos como o etanol, como citado no estudo da seção anterior, são frequentemente utilizados como modificadores da polaridade do CO₂, aumentando sua capacidade de solubilizar substâncias polares e, consequentemente, melhorando a seletividade do processo (Inumaro *et al.*, 2023; Qamar, 2021; Echim *et al.*, 2011).

Como discutido, ajustar os parâmetros operacionais, também pode otimizar a solubilidade dos compostos desejados. Além disso, o desenvolvimento de métodos de pré-tratamento das matérias-primas, como moagem e secagem, pode facilitar a extração dos compostos bioativos, aumentando o rendimento e a eficiência do processo (Sanz *et al.*, 2019).

O pré-tratamento da matéria-prima é uma etapa essencial. Krofta, Mikyška e Hašková (2008) avaliaram o efeito da secagem, moagem, peletização, envelhecimento e armazenamento na atividade antioxidante dos cones de lúpulo. Os resultados indicaram que o processo de secagem causou perda significativa da atividade antioxidante, enquanto a moagem e a peletização não afetaram negativamente essa propriedade. Além disso, o

armazenamento sob diferentes condições, especialmente temperatura e forma de acondicionamento, resultou em redução progressiva da atividade antioxidante do material. Esses achados destacam a importância de um pré-tratamento adequado, aliado ao correto armazenamento, para preservar as propriedades funcionais do lúpulo e garantir maior eficiência na extração, contornando possíveis limitações.

2.5 Aplicações dos extratos de lúpulo e subprodutos em formulações cosméticas

Formulações cosméticas frequentemente incorporam ingredientes provenientes de produtos fitoterápicos e seus compostos ativos. A utilização dos extratos de lúpulo na cosmetologia ainda é uma área relativamente nova, porém, estudos recentes têm demonstrado sua eficácia com o uso de extratos de lúpulo no tratamento de várias condições dermatológicas, como acne, estrias, prevenção do envelhecimento cutâneo, formulações em gel, desodorantes, protetor solar, além de sua aplicação em produtos para os cabelos e saúde bucal (Dumas *et al.*, 2009; Vogt *et al.*, 2014).

A extração supercrítica de CO₂ é uma técnica eficaz para obter os principais compostos do lúpulo, que incluem uma variedade de terpenos e ácidos amargos (Inumaro *et al.*, 2023). Estes componentes desempenham papéis cruciais em várias aplicações, incluindo a indústria cosmética. Neste contexto, o objetivo é explorar a viabilidade dos extratos de lúpulo obtidos por extração supercrítica com CO₂ em formulações cosméticas. Prevê-se que os resultados deste estudo ofereçam uma análise abrangente do uso desses extratos na cosmetologia, embasada em pesquisas recentes e evidências científicas.

Além dos cones, partes vegetativas como caules e folhas, geralmente tratadas como subprodutos têm demonstrado grande potencial cosmético devido à presença de compostos fenólicos com propriedades antioxidantes semelhantes às encontradas no cone. A valorização desses resíduos contribui não apenas para práticas mais sustentáveis, mas também amplia as oportunidades para o desenvolvimento de formulações cosméticas naturais e eficazes. Estudos recentes realizados pela Universidade de Parma, investigaram tecidos vegetais derivados *in vitro*, incluindo folhas e raízes de diferentes genótipos de lúpulo, revelando alta concentração de compostos bioativos e expressiva atividade antioxidante. A caracterização qualitativa dos extratos revelou a presença de 21 compostos diferentes, incluindo xanthohumol, isoxanthohumol, bem como α-ácidos e β-ácidos, os mesmos encontrados em plantas de lúpulo cultivadas em ambiente natural (Chiancone *et al.*, 2022).

Esses achados reforçam a viabilidade de estratégias biotecnológicas como alternativas sustentáveis para a produção de ingredientes ativos cosméticos. Tal abordagem é especialmente promissora para futuras pesquisas que visem otimizar a síntese de compostos bioativos e agregar valor a produtos naturais voltados para o mercado cosmético. Além disso, contribui para o aproveitamento de materiais vegetativos que, de outra forma, seriam

descartados pela indústria cervejeira, promovendo um modelo de produção mais circular e ambientalmente responsável (Delgado, 2020; Chiancone *et al.*, 2022).

Diante do exposto, ao longo desta seção foram explorados aspectos fundamentais sobre a composição química do lúpulo, suas propriedades bioativas, métodos de extração, especialmente a extração supercrítica com CO₂, bem como suas aplicações promissoras na indústria cosmética. Entre os compostos obtidos, destacam-se os óleos essenciais e as resinas, cuja atividade antioxidante, anti-inflamatória e antimicrobiana os torna altamente relevantes para formulações tópicas. Além disso, o aproveitamento de subprodutos vegetativos do lúpulo reforça o potencial sustentável e inovador dessa matéria-prima. A fim de demonstrar a viabilidade prática da aplicação cosmética desses extratos, o próximo capítulo apresenta um estudo de caso voltado ao desenvolvimento de um desodorante em bastão contendo extrato supercrítico de lúpulo, com foco na avaliação de sua eficácia antibacteriana.

3 ESTUDO DE CASO: DESENVOLVIMENTO DE DESODORANTE EM BASTÃO COM EXTRATO SUPERCRÍTICO DE LÚPULO – ANÁLISE DA EFICÁCIA ANTIBACTERIANA

Para aprofundar a aplicação prática da extração supercrítica de lúpulo na cosmetologia, este capítulo apresenta a análise do estudo intitulado “*Efeitos desodorantes de um extrato supercrítico de lúpulo: atividade antibacteriana contra Corynebacterium xerosis e Staphylococcus epidermidis e teste de eficácia de um bastão de lúpulo/ricinoleato de zinco em humanos por meio da avaliação sensorial da desodorização axilar.*” A pesquisa foi conduzida pela empresa norte-americana de produtos naturais para cuidados pessoais Tom’s of Maine, em colaboração com a Colgate-Palmolive, e publicada em 2009 no *Journal of Cosmetic Dermatology* (Wiley Periodicals, Inc.), pelos autores Elizabeth R. Dumas e colaboradores.

Apesar de não ser recente, a escolha desse estudo se justifica pela sua relevância pioneira e abordagem integrada. A pesquisa é uma das primeiras a explorar o uso do extrato de lúpulo obtido via extração supercrítica de CO₂ em uma aplicação cosmética concreta, utilizando metodologias científicas rigorosas para avaliar tanto a atividade antibacteriana *in vitro* quanto a eficácia sensorial *in vivo* em humanos. Além disso, o envolvimento da **Colgate-Palmolive**, multinacional com ampla experiência no desenvolvimento de produtos de higiene pessoal, confere credibilidade e aplicabilidade industrial ao estudo. Por essas razões, o trabalho serve como referência fundamental para investigações mais recentes e para a validação do potencial do lúpulo em produtos desodorantes naturais.

A pesquisa teve como foco avaliar a eficácia de um extrato de lúpulo obtido por extração com dióxido de carbono supercrítico, incorporado em uma formulação de desodorante em bastão, associada ao ricinoleato de zinco. O estudo propôs-se a investigar, em duas etapas, a atividade antibacteriana *in vitro* do extrato de lúpulo frente às bactérias *Corynebacterium xerosis* e *Staphylococcus epidermidis*, bem como a eficácia desodorante *in vivo* da formulação contendo lúpulo e ricinoleato de zinco, por meio de testes sensoriais com voluntários.

O mau odor axilar, também chamado de bromidrose é causado pela degradação das secreções humanas por bactérias presentes na região das axilas, principalmente do gênero *Corynebacterium* e, em menor grau, *Staphylococcus*. Essas bactérias produzem enzimas capazes de decompor proteínas, lipídios e esteroides, originando compostos voláteis

responsáveis pelo odor desagradável (Dumas, 2009; Kataoka, 2017). A formação desses compostos está diretamente ligada à ação enzimática sobre precursores presentes no suor. O controle desse odor pode ser realizado por meio do uso de antitranspirantes, agentes absorventes, fragrâncias ou antimicrobianos, que inibem o crescimento bacteriano e reduzem a decomposição microbiana do suor. Como discutido no capítulo anterior, o lúpulo possui propriedades antibacterianas em sua composição e este estudo visa demonstrar a eficácia de formulação com extrato de lúpulo no combate às bactérias que causam mau odor.

Um extrato supercrítico de cones de *Humulus lupulus* (lúpulo) foi produzido pela FLAVEX Natureextrakte GmbH (Rehlingen, Alemanha), a partir da cultivar Hallertauer Magnum, rica em alfa-ácidos. A extração foi realizada com dióxido de carbono (CO₂) sob pressão de 320 bar e temperatura de 40°C, resultando em cerca de 26% de extrato primário contendo aproximadamente 50% de alfa-ácidos e 22% de beta-ácidos. Posteriormente, o extrato foi reextraído em uma coluna de 6 metros sob condições mais seletivas de 130 bar e 50°C, gerando 20% de fração de extrato e 80% de fração refinada com sabor reduzido. Essa fração refinada foi padronizada com a adição de triglicerídeo caprílico/cáprico até atingir 50% de alfa-ácidos.

O extrato foi testado quanto à sua atividade antibacteriana contra bactérias associadas ao mau odor axilar, *Corynebacterium xerosis* e *Staphylococcus epidermidis*, por meio de culturas de esfregaço de axilas humanas, testes de inibição em ágar e ensaios de micro diluição. Além disso, a eficácia de um desodorante em bastão contendo esse extrato e ricinoleato de zinco foi avaliada em 42 voluntários humanos por meio de um painel sensorial treinado.

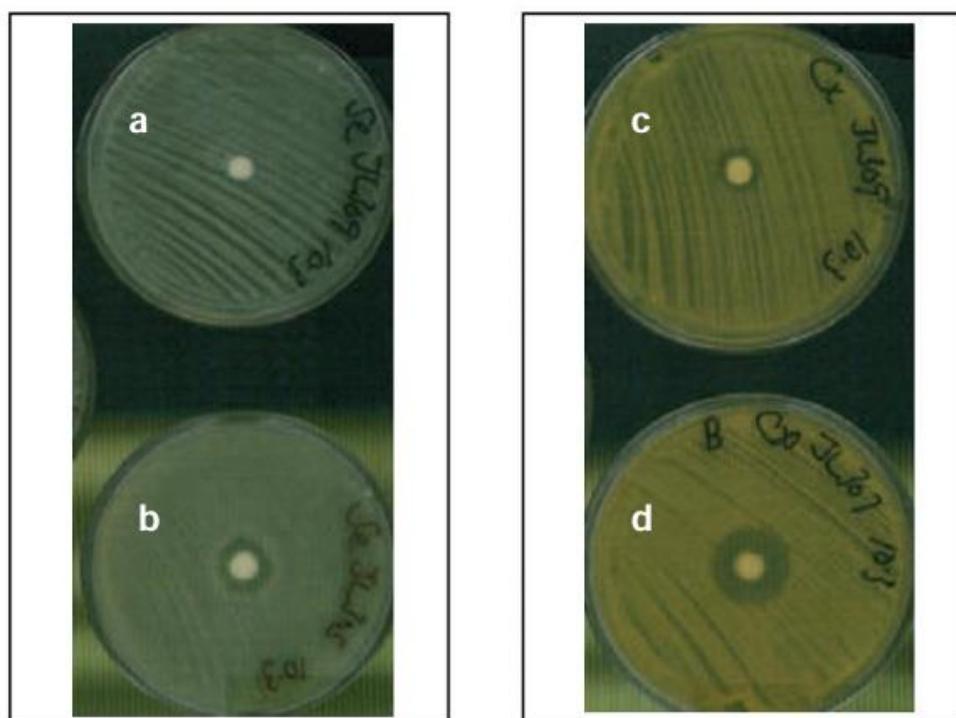
Em testes de laboratório, ele foi eficaz contra *Corynebacterium xerosis* e *Staphylococcus epidermidis*, com zonas de inibição visíveis em concentrações de 1,5 e 2 mg/mL. Um desodorante com 0,2% do extrato mostrou maior capacidade de inibir essas bactérias do que a versão sem o extrato. A ação antibacteriana também foi confirmada por outro teste (micro diluição em caldo), com bons resultados principalmente contra bactérias gram-positivas. A Figura 9 demonstra o meio de cultura com e sem o extrato.

Em testes com pessoas, o desodorante reduziu significativamente o mau odor, com nota média caindo de 6,28 para 1,80 após 8 horas. O efeito continuou perceptível por até 24 horas como mostrado na Figura 10 e não foram observados sinais de irritação cutânea. Esses resultados são consistentes com os resultados observados com outros desodorantes regulares no mercado. Acredita-se que os ácidos presentes no lúpulo, como a lupulona, sejam os

principais responsáveis pela ação contra as bactérias. A presença de outros ingredientes, como o ricinoleato de zinco, pode ter potencializado os efeitos, embora sua presença tenha apenas a função protetora sobre os ácidos do lúpulo e é capaz de retardar a sua degradação oxidativa. Apesar dos bons resultados *in vitro* e *in vivo*, os autores destacam que mais estudos são necessários para confirmar a duração da ação na pele.

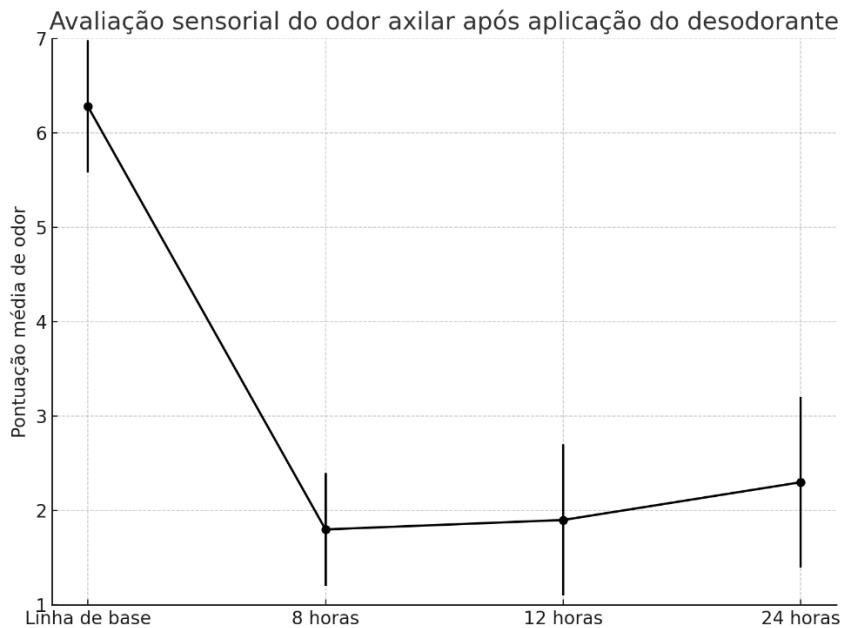
Figura 9 - Resultados da zona de inibição dos protótipos de desodorantes.

(a, b) Atividade da base desodorante sem (a) e com (b) 0,2% de extrato de lúpulo contra *Staphylococcus epidermidis*. (c, d) Atividade do base desodorante sem (c) e com (d) 0,2% de extrato de lúpulo contra *Corynebacterium xerosis*.



Fonte: DUMAS, 2009.

Figura 10 - Pontuações médias de odor nas axilas em voluntários humanos



Fonte: Adaptado de Dumas, 2009.

A análise do estudo de caso apresentado neste capítulo evidencia de forma clara como o extrato supercrítico de lúpulo, obtido por meio de condições otimizadas de temperatura e pressão, pode ser aplicado com sucesso em formulações cosméticas com foco natural e funcional. A comprovação de atividade antibacteriana significativa frente a cepas como *Corynebacterium xerosis* e *Staphylococcus epidermidis*, tanto em ensaios *in vitro* quanto em testes sensoriais *in vivo*, aponta que os compostos majoritários extraídos preservam sua bioatividade no produto final. O que reforça a premissa discutida na seção 3.5 de que a extração supercrítica com CO₂ é capaz de manter a integridade e funcionalidade dos princípios ativos do lúpulo, conferindo maior eficácia e estabilidade às formulações resultantes.

Ao articular os dados do estudo com os fundamentos teóricos abordados no Capítulo 2, observa-se uma convergência entre ciência de processos, fitoquímica e inovação cosmética. A escolha da extração supercrítica como tecnologia-chave justifica-se não apenas por sua seletividade e segurança toxicológica, mas também pelo seu alinhamento com princípios de economia verde e química limpa.

Além disso, o uso de um ingrediente natural de origem vegetal, como o lúpulo, em substituição a antimicrobianos sintéticos de potencial irritativo ou impacto ambiental elevado,

atende à demanda crescente por produtos “*clean label*” e ambientalmente responsáveis. Essa abordagem também abre caminho para a valorização de resíduos industriais da cadeia cervejeira, sugerindo uma estratégia de economia circular com potencial de inovação tecnológica ao poder utilizar os subprodutos.

Portanto, ao integrar os aspectos técnicos da extração supercrítica com a eficácia funcional de formulações cosméticas reais, este trabalho consegue evidenciar não apenas a viabilidade da aplicação do extrato de lúpulo, mas também sua relevância como alternativa sustentável e promissora para o setor.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusão

Este trabalho propôs uma revisão sobre o potencial do lúpulo (*Humulus lupulus*) como fonte de compostos bioativos aplicáveis em formulações cosméticas, com foco especial na extração supercrítica com dióxido de carbono (CO₂) como uma alternativa eficiente, seletiva e ambientalmente segura. A revisão dos aspectos fitoquímicos do lúpulo e das propriedades funcionais de seus constituintes como flavonoides, ácidos alfa e beta e resinas permitiu evidenciar sua relevância como ativo com potencial antioxidante, antimicrobiano e anti-inflamatório em formulações tópicas.

A discussão aprofundada sobre a técnica de extração supercrítica com CO₂ demonstrou suas vantagens frente a métodos convencionais, principalmente no que se refere à preservação da estabilidade térmica dos compostos, ausência de resíduos tóxicos e obtenção de extratos com elevada pureza e atividade biológica. Além disso, a análise dos parâmetros operacionais, como temperatura, pressão e uso de co-solventes destacou a importância do controle das condições de processo para garantir um perfil fitoquímico adequado às exigências cosméticas, contribuindo para a construção de formulações adequadas ao consumidor.

O estudo de caso apresentado ao final do trabalho serviu como ferramenta prática para ilustrar e validar os conceitos discutidos ao longo do desenvolvimento. A aplicação do extrato de lúpulo em uma formulação cosmética e sua avaliação frente a microrganismos típicos da microbiota cutânea reforçaram o potencial funcional do ativo e a viabilidade de sua incorporação em produtos dermocosméticos.

Embora o foco deste trabalho não tenha sido diretamente o reaproveitamento de resíduos industriais, a utilização de partes vegetativas do lúpulo, muitas vezes descartadas pela indústria cervejeira, abre caminhos para a implementação de práticas sustentáveis na cadeia produtiva. Essa possibilidade amplia o valor agregado de um insumo já conhecido, transformando um subproduto em recurso para outro setor da indústria. Tal perspectiva está em plena consonância com os princípios da economia circular e aponta para oportunidades de inovação tecnológica e redução de desperdício em setores interligados. Nesse sentido, a proposta deste estudo se alinha de forma significativa, ainda que prospectiva, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 9 (Indústria, inovação e

infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), contribuindo para uma visão mais integrada entre ciência, sustentabilidade e desenvolvimento industrial.

Dessa forma, este estudo contribui para o avanço da inovação cosmética baseada em ingredientes naturais e processos tecnológicos limpos, reforçando que é possível aliar desempenho, segurança para o consumidor e responsabilidade ambiental na busca por soluções cosméticas mais alinhadas às demandas do mercado contemporâneo.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir das discussões levantadas neste trabalho, surgem diversas possibilidades de aprofundamento científico e aplicação prática que podem ser exploradas em estudos futuros:

- **Aproveitamento de resíduos da indústria cervejeira:** Investigar a viabilidade do uso de resíduos vegetativos reais do lúpulo, provenientes de processos cervejeiros, como matéria-prima para extração supercrítica, avaliando sua composição química e desempenho funcional comparado ao material fresco ou comercial.
- **Desenvolvimento de diferentes formas cosméticas:** Aplicar o extrato supercrítico em outras formulações além de desodorantes, como cremes antissépticos, loções pós-barba ou produtos para peles sensíveis, avaliando estabilidade, eficácia e aceitação sensorial.
- **Estudos clínicos de longo prazo:** Realizar ensaios clínicos mais amplos e com acompanhamento prolongado para validar a eficácia e segurança do extrato em diferentes tipos de pele e faixas etárias, fortalecendo seu potencial de uso comercial.
- **Otimização econômica e escalonamento industrial:** Estudar a viabilidade técnico-econômica da extração supercrítica de lúpulo em escala piloto e industrial, considerando custos operacionais, rendimento e impacto ambiental, visando sua aplicação em larga escala no setor cosmético.

REFERÊNCIAS

BARRETO, M. et al. Novel Brazilian hop (*Humulus lupulus* L.) extracts through supercritical CO₂ extraction: enhancing hop processing for greater sustainability. *Food Research International*, v. 172, p. 113169–113169, 1 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113169>. Acesso em: 30 abr. 2025.

BETANCUR, María; LÓPEZ, Jéssica; SALAZAR, Fernando. Antimicrobial activity of compounds from hop (*Humulus lupulus* L.) following supercritical fluid extraction: an overview. *Chilean Journal of Agricultural Research*, v. 83, n. 4, p. 499–509, 2023. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-58392023000400499. Acesso em: 25 fev. 2025.

CHAN, Chung-Hung; SEE, Tiam-You; YUSOFF, Rozita; et al. Extraction of bioactives from *Orthosiphon stamineus* using microwave and ultrasound-assisted techniques: process optimization and scale up. *Food Chemistry*, v. 221, p. 1382–1387, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814616318404?via%3Dihub>. Acesso em: 30 abr. 2025.

CHIANCONE, Benedetta; GUARRASI, Valeria; LETO, Leandra; et al. *Vitro*-derived hop (*Humulus lupulus* L.) leaves and roots as source of bioactive compounds: antioxidant activity and polyphenolic profile. 2022. Disponível em: <https://www.researchsquare.com/article/rs-1908238/v1>. Acesso em: 5 abr. 2025.

CHEN, Ximiao; LI, Zhengli; HONG, Haofeng; et al. Xanthohumol suppresses inflammation in chondrocytes and ameliorates osteoarthritis in mice. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, v. 137, p. 111238–111238, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0753332221000238>. Acesso em: 25 fev. 2025.

COSMÉTICOS, Danny. Shampoo Urtiga & Lúpulo Anticaspa Flores & Vegetais 310ml. *Dannycosmeticos.com.br*. Disponível em: <https://www.dannycosmeticos.com.br/shampoo-urtiga-e-lupulo-anticaspa-flores-e-vegetais-310ml/p>. Acesso em: 6 abr. 2025.

CORRADO, Chiara; BARRECA, Maria Magdalena; RAIMONDO, Stefania; et al. Nobiletin and xanthohumol counteract the TNF α -mediated activation of endothelial cells through the inhibition of the NF- κ B signaling pathway. *Cell Biology International*, v. 47, n. 3, p. 634–647, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36378586/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

DACAL, Andrea; LIRA, Alberto; STRAGEVITCH, Luiz; et al. Extraction of *Acrocomia intumescens* Drude oil with supercritical carbon dioxide: process modeling and comparison with organic solvent extractions. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 111, p. 1–7, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0896844616300134?via%3Dihub>. Acesso em: 30 abr. 2025.

DABROWSKI, Wojciech; PFORTMUELLER, Carmen Andrea; KOTFIS, Katarzyna; et al. Is there a place for natural agents with anti-inflammatory and antioxidative properties in critically ill patients? Potential usefulness of xanthohumol. *Pharmacology & Therapeutics*, p. 108766–108766, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0163725824001864>. Acesso em: 30 abr. 2025.

DELGADO, Silva. *Humulus lupulus* L.: aplicação cosmética de extratos obtidos de cones e partes vegetativas. *Bvsalud.org*, 2020. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1222704>. Acesso em: 30 abr. 2025.

DUMAS, E. R. et al. Deodorant effects of a supercritical hops extract: antibacterial activity against *Corynebacterium xerosis* and *Staphylococcus epidermidis* and efficacy testing of a hops/zinc ricinoleate stick in humans through the sensory evaluation of axillary deodorancy. *Journal of Cosmetic Dermatology*, v. 8, n. 3, p. 197–204, 1 set. 2009.

DURELLO, R.; SILVA, L.; BOGUSZ JR., S. Química do lúpulo. *Química Nova*, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170412>. Acesso em: 30 abr. 2025.

ECHIM, C.; VERHÉ, R.; STEVENS, C.; et al. Valorization of by-products for the production of biofuels. In: *Handbook of Biofuels Production*, p. 581–610, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/carbon-dioxide-supercritical-extraction>. Acesso em: 30 abr. 2025.

FAHLE, Anton; BERESWILL, Stefan; HEIMESAAT, Markus M. Antibacterial effects of biologically active ingredients in hop provide promising options to fight infections by pathogens including multi-drug resistant bacteria. *European Journal of Microbiology and Immunology*, v. 12, n. 1, p. 22–30, 2022. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9036650/>. Acesso em: 25 fev. 2025

HEYERICK, A.; VERVARCKE, Stefaan; DEPYPERE, Herman; et al. A first prospective, randomized, double-blind, placebo-controlled study on the use of a standardized hop extract to alleviate menopausal discomforts. *Maturitas*, v. 54, n. 2, p. 164–175, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378512205002823>. Acesso em: 25 fev. 2025.

IDUN NATURE. Desodorante roll-on con Lúpulo para hombre. *Idun-nature.com*. Disponível em: <https://www.idun-nature.com/Cosnature/Desodorante-roll-on-con-LC3BApulo-para-hombre-p-20659.html>. Acesso em: 6 abr. 2025.

INUMARO, Rodrigo Sadao; FERRARI, Renan Alves; CAMPOS, Eduardo V. R.; et al. Supercritical fluid-assisted extraction of hop cone residue from craft breweries. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 72, p. 102498–102498, 1 jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102498>. Acesso em: 30 abr. 2025.

JIANG, Chuan-Hao; SUN, Tao-Li; XIANG, Da-Xiong; et al. Anticancer activity and mechanism of xanthohumol: a prenylated flavonoid from hops (*Humulus lupulus L.*). *Frontiers in Pharmacology*, v. 9, 2018. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/pharmacology/articles/10.3389/fphar.2018.00530/full>. Acesso em: 8 mar. 2025.

JUSTEN, Danize de Souza. Composição química do óleo essencial *Humulus*. *Engenharia de Alimentos*, Universidade Federal do Rio Grande, 2019. Disponível em: https://sistemas.furg.br/sistemas/sab/arquivos/conteudo_digital/2f804293d02b28bec429ec0d175ee5b6.pdf. Acesso em: 30 abr. 2025.

KARABÍN, M.; HAŠEK, J.; MIŠÍK, T.; et al. Biologically active compounds from hops and prospects for their use. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 15, n. 3, p. 542–567, 1 mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12201>. Acesso em: 30 abr. 2025.

KARABÍN, M.; MIŠÍK, T.; ELIÁŠOVÁ, M.; et al. Xanthohumol, a prenylated flavonoid from hops (*Humulus lupulus L.*) exerts multidirectional pro-healing properties towards damaged zebrafish hair cells by regulating the innate immune response. *Toxicology and Applied Pharmacology*, v. 483, p. 116809, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2024.116809>. Acesso em: 30 abr. 2025.

KASICA, N., & KALECZYC, J. Xanthohumol, a prenylated flavonoid from hops (*Humulus lupulus L.*) exerts multidirectional pro-healing properties towards damaged zebrafish hair cells by regulating the innate immune response. *Toxicology and Applied Pharmacology*, v. 483, p. 116809, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2024.116809>.

KATAOKA, Alexandre. Surgical treatment of bromhidrosis. *Revista Brasileira de Cirurgia Plástica (RBCP) – Brazilian Journal of Plastic Surgery*, v. 32, n. 3, p. 377–382, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbcp/a/LtpyzYkMWCD43sSJsN9qzdq/?format=pdf&lang=pt&utm_source. Acesso em: 1 maio 2025.

KOWALCZYK, D.; ŚWIECA, M.; CICHOCKA, J.; GAWLIK-DZIKI, U. The phenolic content and antioxidant activity of the aqueous and hydroalcoholic extracts of hops and their pellets. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 119, n. 3, p. 103–110, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jib.73>. Acesso em: 30 abr. 2025.

KROFTA, K.; MIKYŠKA, A.; HAŠKOVÁ, D. Antioxidant characteristics of hops and hop products. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 114, n. 2, p. 160-166, 2008. doi: <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00321.x>

MACCHIONI, V.; PICCHI, V.; CARBONE, K. Hop leaves as an alternative source of health-active compounds: effect of genotype and drying conditions. *Plants*, v. 11, n. 1, p. 99–99, 29 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11010099>. Acesso em: 30 abr. 2025.

MAUL, Aldo Adolar; WASICKY, Roberto; BACCHI, Elfriede Marianne. Extração por fluido supercrítico. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 5, n. 2, 1996. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfar/a/6pZbYHtVFRDcB9vYZLfWsKC/?lang=pt>. Acesso em: 6 abr. 2025.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7. ed. International Edition. cap. 23, p. 790, 2005.

MIRANDA, C. L. et al. Xanthohumol improves dysfunctional glucose and lipid metabolism in diet-induced obese C57BL/6J mice. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, v. 599, p. 22–30, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003986116300601>. Acesso em: 25 fev. 2025.

NASCIMENTO, I. C. do. Tricomas secretores em espécies de *Cannabaceae* e *Ulmaceae*. 2017. Dissertação (Mestrado em Biologia Comparada) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.59.2018.tde-03012018-122202>.

NAGYBÁKAY, Nóra Emilia; SYRPAS, Michail; VILIMAITĖ, Vaiva; TAMKUTĖ, Laura; PUKALSKAS, Audrius; VENSKUTONIS, Petras Rimantas; KITRYTĖ, Vaida. Optimized supercritical CO₂ extraction enhances the recovery of valuable lipophilic antioxidants and other constituents from dual-purpose hop (*Humulus lupulus L.*) variety Ella. *Antioxidants*, Kaunas, v. 10, n. 6, p. 918, 6 jun. 2021. <https://doi.org/10.3390/antiox10060918>.

OLIVEIRA, M. T. Extração de compostos bioativos a partir de resíduo de molho de soja com dióxido de carbono em condições supercríticas. 2023. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2023.1>.

PAREEK, A. *et al.* Mushrooming of Herbal's in New Emerging Market of Cosmaceuticals. *International Journal of Advanced in Pharmaceutical & Bio Science*, v. 2, n. 4, p. 473–480, 2012.

PAVLIĆ, B. *et al.* Isolation of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil by green extractions versus traditional techniques. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 99, p. 23–28, 1 abr. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.01.029>.

QAMAR, S. *et al.* Effects of Ethanol on the Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Cannabinoids from Near Equimolar (THC and CBD Balanced) Cannabis Flower. *Separations*, v. 8, n. 9, p. 154, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2297-8739/8/9/154>.

RAMOS, S. *et al.* Explorando as potencialidades das folhas do lúpulo: caracterização química e avaliação das suas bioatividades. [2024]. Disponível em: <https://rdu.unicesumar.edu.br/bitstream/123456789/11502/1/913961.pdf>.

RANCÁN, L. *et al.* Protective effect of xanthohumol against age-related brain damage. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, v. 49, p. 133–140, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955286316306696>. Acesso em: 25 fev. 2025.

RODRIGUES, M. A.; CASTRO, J. P.; MORAIS, J. S. A cultura do lúpulo em Portugal: passado, presente e futuro. *A Voz do Campo*, v. 185, p. 40–41, 2015. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/entities/publication/538b82f6-fbb9-4fc3-a6a5-422109ec5791>. Acesso em: 22 fev. 2025.

SALLVE. Spray Reparador Calmante. [S. l.], 2025. Disponível em:
<https://www.sallve.com.br/products/spray-reparador-calmante>. Acesso em: 6 abr. 2025.

SANZ, V. et al. What is new on the hop extraction? *Trends in Food Science and Technology*, v. 93, p. 12–22, 1 nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.018>.

SANTIAGO, P. Lúpulo: um olhar químico sobre a planta e sua aplicação na cerveja. *Science of Beer*, 2022. Disponível em: <https://www.scienceofbeer.com.br/br/post/lupulo-um-olhar-quimico-sobre-a-planta-e-sua-aplicacao-na-cerveja-2>. Acesso em: 23 fev. 2025.

SANTOS, B. Desenvolvimento de uma formulação cosmética de gel anti-idade com extratos de plantas espontâneas e cultivares de *Humulus lupulus* L. 2020. Disponível em:
<https://bibliotecadigital.ipb.pt/entities/publication/af162752-aa49-4a51-8df0-ff30e0bab850>.

SANTOS, B. dos; COELLO, M. del C. S.; SOUSA, M. J. Sustentabilidade de cosméticos com subprodutos do lúpulo. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2024. Disponível em:
https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/28046/1/Briolanja_dos_Santos_et_al_ciencias.pdf.

CO2 supercrítico acentua pureza de extratos - Sebrae. Sebrae.com.br. Disponível em:
<<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/co2-supercritico-acentua-pureza-de-extratos,16fe57a0d6837810VgnVCM1000001b00320aRCRD>>. Acesso em: 6 jun. 2025.

SHARP, F. R.; LAWS, D. R. J. The essential oil of hops – a review. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 87, p. 96–107, 1981.

SIGMA-ALDRICH. Xanthohumol. 2016. Disponível em:
<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sial/01130595>. Acesso em: 6 abr. 2025.

SPÓSITO, M. B. et al. A cultura do lúpulo. *Série Produtor Rural*, v. 68, Piracicaba: ESALQ – Divisão de Biblioteca, 2019. Disponível em:
https://www.esalq.usp.br/biblioteca/file/4098/download?token=h3Ea_cPL. Acesso em: 22 fev. 2025.

SUNG, B. *et al.* *Humulus japonicus* extract exhibits antioxidative and anti-aging effects via modulation of the AMPK-SIRT1 pathway. *Experimental and Therapeutic Medicine*, v. 9, n. 5, p. 1819–1826, 17 fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3892/etm.2015.2302>.

TONINI, C.; PEREZ, V. H. Levantamento de dados de produção do lúpulo Mantiqueira no Brasil. *Galoá Proceedings*, 2020. Disponível em: <https://proceedings.science/confict-conpg/confict-conpg-2020/trabalhos/levantamento-de-dados-de-producao-do-lupulo-mantiqueira-no-brasil?lang=pt-br>.

TOŠOVIĆ, J.; KOLENC, Z.; HOSTNIK, G. *et al.* Exploring antioxidative properties of xanthohumol and isoxanthohumol: An integrated experimental and computational approach with isoxanthohumol pKa determination. *Food Chemistry*, v. 463, p. 141377, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814624030279>. Acesso em: 25 fev. 2025.

VAZQUEZ-CERVANTES, G. I. *et al.* Redox and anti-inflammatory properties from hop components in beer-related to neuroprotection. *Nutrients*, v. 13, n. 6, p. 2000, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/13/6/2000>. Acesso em: 8 mar. 2025.

VEIGA, B. A. *et al.* Compressed fluids extraction methods, yields, antioxidant activities, total phenolics and flavonoids content for Brazilian Mantiqueira hops. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 170, p. 105155, 1 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105155>.

VOGT, O.; SIKORA, E.; OGONOWSKI, J. The effect of selected supercritical CO₂ plant extract addition on user properties of shower gels. *Polish Journal of Chemical Technology*, v. 16, n. 4, p. 51–54, 1 dez. 2014.

ZANOLI, P.; ZAVATTI, M. Pharmacognostic and pharmacological profile of *Humulus lupulus* L. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 116, n. 3, p. 383–396, 1 mar. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.01.033>.