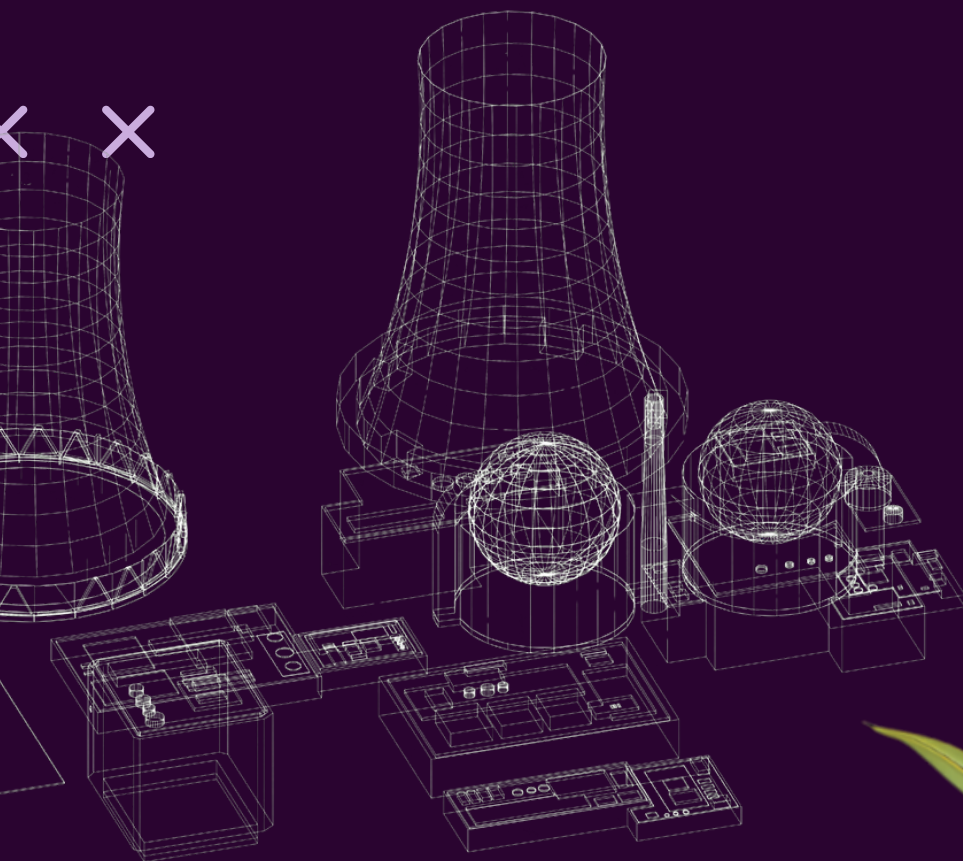


Protocolos em Química

Vol. 4
Nº. 3

04 de setembro de 2026

<https://protocolosemquimica.com/>



POR PET-QUÍMICA IQ/UNB

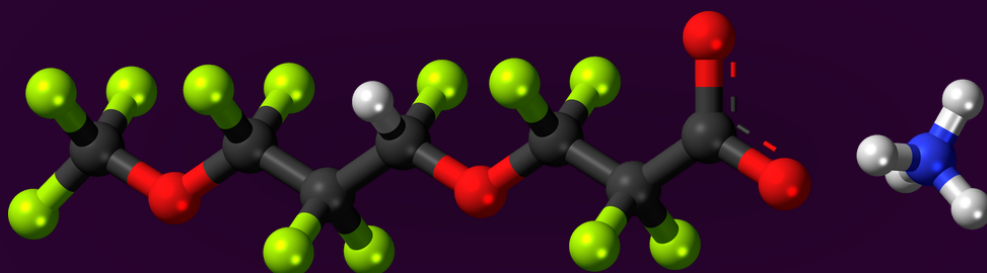
Revista científica editorada pelos estudantes dos cursos do Instituto de Química da Universidade de Brasília com o objetivo de divulgar textos de pesquisa, de ensino, artigos de revisão e os chamados QuiArtigos, que são artigos escritos exclusivamente por estudantes de graduação.



PQ

SUMÁRIO

Sobre o projeto.....	03
Editoração.....	04
Seção Pesquisa:	
Análise comparativa do perfil terpênico do óleo essencial (OE) Cannabis sativa em Cultivos Indoor e Outdoor.....	06
Análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar para aplicação em fermentação escura.....	10
Determinação colorimétrica de canabinoides em óleo medicinal utilizando análise RGB por smartphone.....	16
Síntese e dinâmica molecular de tinta ferrogálica.....	27
Seção QuiArtigo:	
Degradação da vitamina C em sucos de frutas: uma análise crítica dos avanços científicos.....	31
Diferentes métodos para a detecção de microvestígios de disparo: uma revisão.....	36
Difratometria e microscopia: uma abordagem crítica para o ensino de caracterização de materiais.....	41
Obtenção de Nanomateriais de Carbono por Arco Elétrico.....	47
Potencial energético da biomassa lignocelulósica e otimização da produção de etanol de segunda geração.....	51
Síntese Verde de Carbon Dots Obtidos de Resíduos Vegetais: Uma Revisão das Propriedades Fotofísicas.....	57
Soluções analíticas aplicadas à desinfecção de efluentes de ETEs por radiação ultravioleta.....	62
Uso de evaporadores de três efeitos no tratamento de águas residuais contaminadas com agroquímicos.....	66
Uso de um complexo de cobre para a determinação espectrofotométrica de cobre(ii) em amostras de aguardente.....	72



SOBRE O PROJETO

A Revista Protocolos em Química é um projeto desenvolvido pelo grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC visando proporcionar aos seus PETianos, aos discentes do Instituto de Química da Universidade de Brasília e aos demais jovens pesquisadores de áreas correlatas, a inserção de resultados próprios de suas pesquisas em um periódico idiomáticamente acessível e gratuito. Assim, revisões, resenhas, resultados de pesquisas, de trabalhos de Iniciação Científica, de Técnicas de Pesquisa, entre outros trabalhos, podem ser divulgados neste periódico após revisão por pares.

Dessa forma, ela conta com quatro seções, sendo elas: seção pesquisa, seção artigos de revisão, seção ensino e seção QuiArtigo. Dessa forma, na primeira seção poderão ser submetidos trabalhos de pesquisa, inéditos ou não, que visam a divulgação e ampliação do conhecimento químico. A segunda seção é destinada àqueles que desejam apresentar um levantamento de informações a respeito de alguma temática relacionada à Química, analisando-a e discutindo os dados apresentados com uma visão crítica. Na terceira seção, poderão ser submetidos trabalhos de pesquisa na área de ensino de química em todos os níveis de ensino, que considerem a devida relação entre o referencial teórico, o método e a técnica de análise dos dados. Por fim, a quarta seção é exclusiva aos estudantes de graduação e pós-graduação em Química: a seção QuiArtigo. Inicialmente, o QuiArtigo era um trabalho apenas do PET-Química/UnB/MEC, onde cada membro do grupo escrevia uma resenha crítica descrevendo um tema de difícil entendimento por parte do grande público, de uma forma mais acessível sem perder o caráter acadêmico.

Porém, o projeto foi ressignificado para aceitar os trabalhos de outros discentes. Diante disto, sejam todos muito bem-vindos!



EDITORACÃO

Prof. Dr. Davi Alessandro Cardoso Ferreira

Tutor do Grupo PET-Química/UnB, professor do Instituto de Química (IQ), pela Divisão de Físico-Química, na Universidade de Brasília (UnB) e idealizador da Revista Protocolos em Química

Ana Clara Bolson Pires de Almeida

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Anthony Monteiro

Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Gabriel Castro

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Hellen Ferreira

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Iago Cezario

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



Isabela Tanizaki de Camargos

Estudante de Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

João Luiz Dias Grilo Carvalho Formiga

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Julia Ribeiro

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Maria Eduarda de Melo Garcia

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Murilo Lino Roberto Barbosa

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Pedro Diniz de Oliveira Veloso

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



Pedro Henrique Carvalho Lima

Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Pedro Henrique da Rocha Lopes

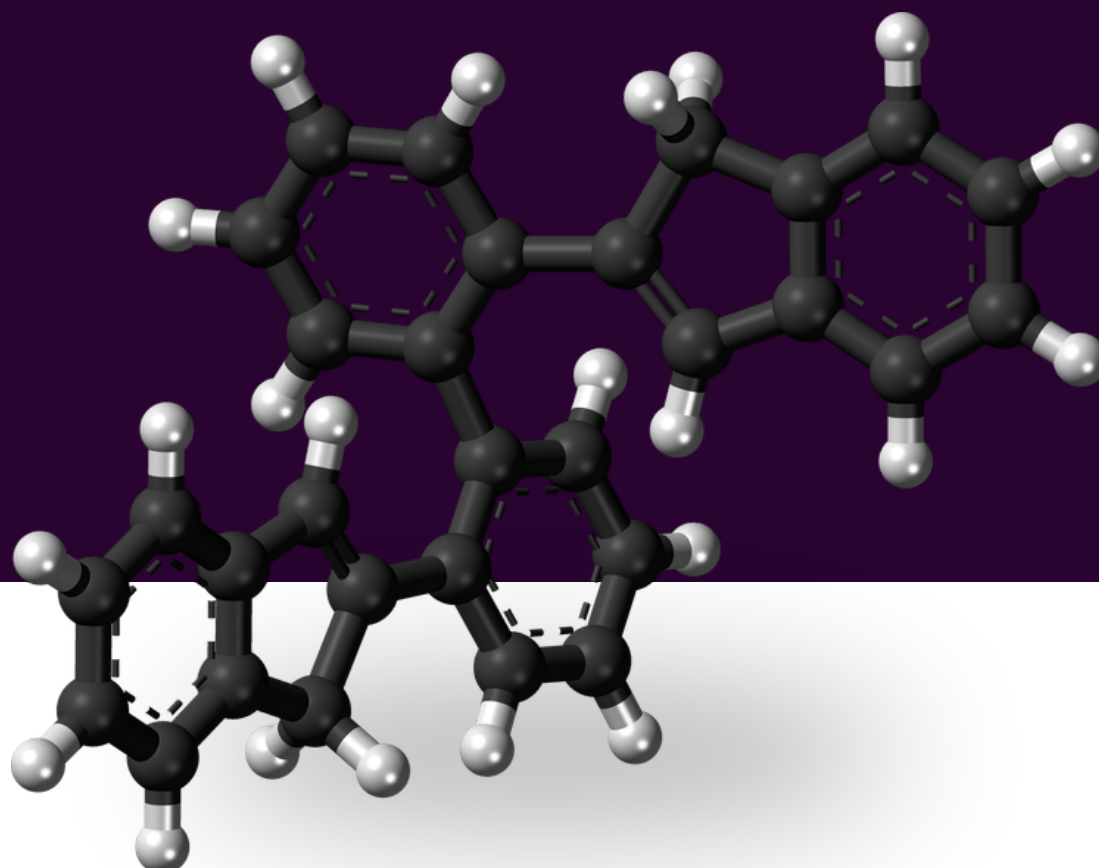
Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Pedro Henrique da Rocha Lopes

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Rahídes Farias Lima

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



Análise comparativa do perfil terpênico do óleo essencial (OE) *Cannabis sativa* em Cultivos *Indoor* e *Outdoor*

DOI:10.5281/zenodo.22311581

Pedro Henrique da Rocha Lopes^{a*}, Marina Azevêdo Vilhena^a, Fernanda Vasconcelos de Almeida^a.

Cannabis sativa has been the subject of medicinal studies since the era of the ancient *Pen-Ts'ao Ching* treatise, and has recently gained new scientific and legal visibility in Brazil with the approval of RDC No. 940/2024. Given this context, this study conducted a comparative analysis of the terpene profile of essential oils extracted from this plant. It evaluated the development of vegetables grown in indoor and outdoor systems. The hydrodistillation method in a Clevenger apparatus reached an optimal time of 40 minutes, and chemical characterization was performed by gas chromatography-mass spectrometry. Outdoor cultivation achieved a yield of 1.96%, while indoor obtained 1.32%. The main compounds in both systems were E-caryophyllene, selina-3,7(11)-diene, α -bulnesene, and α -humulene. The monoterpenes myrcene, 3-carene, and terpinene appeared only in the external system, proving that the environment influences plant metabolism.

A *Cannabis sativa* é alvo de estudos medicinais desde a época do antigo tratado *Pen-Ts'ao Ching*, e recentemente ganhou nova visibilidade científica e legal no Brasil com a aprovação da RDC nº 940/2024. Diante disso, este estudo realizou uma análise comparativa do perfil terpênico dos óleos essenciais extraídos desta planta. Avaliou-se o desempenho do vegetal cultivado em sistemas *indoor* e *outdoor*. O método de hidrodestilação em aparelho Clevenger obteve tempo ideal de 40 minutos, e a caracterização química ocorreu por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa. O cultivo *outdoor* alcançou rendimento de 1,96%, enquanto o *indoor* obteve 1,32%. Os principais compostos em ambos os sistemas foram E-cariofileno, selina-3,7(11)-diene, α -bulneseno e α -humuleno. Os monoterpenos mircenos, 3-careno e terpineno surgiram apenas no sistema externo, provando que o ambiente influencia o metabolismo da planta.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

* E-mail: rochahenrique0025@gmail.com

Palavras-chave: Terpenos; *cannabis sativa*; óleo essencial.

Recebido em 16 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

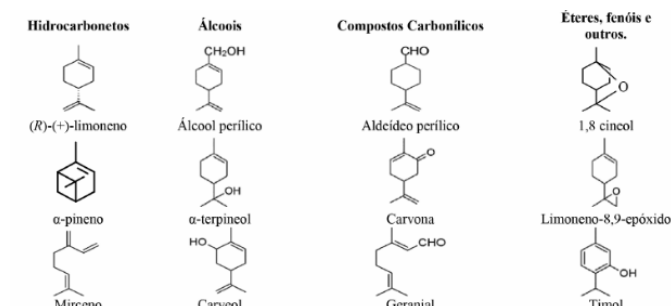
Ao longo do tempo os estudos com plantas medicinais têm desempenhado um papel importante em inovações nas áreas da medicina, servindo como fonte de diversos medicamentos. A importância dos estudos e práticas com essas plantas vai além de suas propriedades terapêuticas³, também é de grande importância estudos sobre as interações de suas substâncias com os organismos vivos. Em cada planta medicinal existem vários compostos, além de conterem uma combinação única de compostos químicos, muitos dos quais têm propriedades farmacológicas importantes. Os terpenos são compostos presentes em abundância nessas plantas e os principais constituintes dos óleos essenciais (OE). Os (OE) são extraídos de várias partes das plantas por diversos métodos.

Os óleos essenciais são em sua maioria formado por terpenos³, que são em sua maioria alcenos, entretanto é possível haver terpenos que vão além da apenas hidrocarbonetos, existem terpenos com grupos funcionais como ácidos, álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, fenóis ou éteres cíclicos com um anel de três membros contendo um

átomo de oxigênio e dois carbonos, abordando somente a estrutura molecular, os terpenos são formados por grupos de 5 carbonos (C_5H_8), que pela quantidade desses grupos formam classificações de terpenos, como os monoterpenos ($C_{10}H_{16}$) que são os terpenos mais voláteis dentre as moléculas que são consideradas dessa forma, durante as análises de cromatografia gasosa, dependendo do método aplicado no aparelho junto a uma série homóloga, é possível determinar quais tipos de terpenos estão mais presentes nas amostras. Os terpenos possuem inúmeras qualidades como serem anti-inflamatórias, antimicrobianas, antifúngicas e analgésicas, os terpenos desses óleos essenciais podem atuar isoladamente ou em harmonia, influenciando processos biológicos importantes, como a modulação do sistema imunológico e a regulação da inflamação. A atividade anti-inflamatória dos OE e seus terpenos ajuda a bloquear cascatas inflamatórias e a neutralizar radicais livres³, reduzindo o dano celular e o estresse oxidativo, um fator determinante para várias doenças humanas, abrangendo até cânceres e Alzheimer. O presente estudo objetiva a comparação do perfil terpênico e da atividade antioxidante dos óleos essenciais extraídos da *Cannabis medicinal*

cultivada em sistema *indoor* onde as plantas são germinadas em espaços fechados, usando luz artificial e controle total do ambiente para o desenvolvimento da planta e *outdoor* que se refere a prática de plantar diretamente no solo ou em vasos expostos à luz solar natural e ao clima do ambiente.

Figura 1. Exemplos de terpenos mostrados na literatura. Extraído da referência 3.



Metodologia

Para a produção do trabalho foi realizado uma prática de duas etapas, a extração do óleo essencial e a sua caracterização pela máquina de Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massa. Durante a extração, foi usado a hidrodestilação com auxílio do Clevenger por ser o mais utilizado de acordo com a literatura, sendo bem eficiente, barato e possuindo bons resultados. Trata-se de uma variante da hidrodestilação que utiliza um sistema de separação acoplado. Nele, o óleo essencial separa-se do vapor condensado e permanece na parte superior, enquanto a água retorna continuamente ao balão com a matéria vegetal, evitando perdas por solubilização.

A técnica de CG-MS (cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa) é amplamente utilizada na análise de óleos essenciais pela sua eficácia de separar o OE de compostos voláteis. O processo consiste na vaporização e injeção da amostra numa coluna cromatográfica, onde os constituintes são isolados segundo a sua volatilidade e afinidade com a fase estacionária. À medida que os componentes eluem da coluna, o espectrómetro de massa permite a sua identificação e quantificação rigorosa. O GC-MS a ser utilizado é o modelo 7890A da *Agilent* com coluna HP-5 MS (0,25 mm d.i.; 0,25 μ m de filme e 30 m de comprimento). A programação de temperatura proposta de acordo com a literatura será de 60 a 240 °C (3 °C/min), permanecendo em 240 °C por 5 min. A caracterização dos terpenos utilizará a literatura do ADAMS⁴ da biblioteca NIST (*Software Quantitative Analyses 10*), confirmada com os índices de retenção lineares de Van den Dool e Kratz e da literatura vigente.

Resultados e discussão

Observou-se que, após 40 minutos de extração, não houve aumento na quantidade de óleo essencial obtida, indicando que esse é o tempo ideal de hidrodestilação. Para as extrações de óleo essencial, foram realizadas em duplicatas para cada uma das nove amostras para o trabalho, foram realizados os cálculos sobre a média dos rendimentos, com desvio padrão de 0,0014 para as amostras *indoor* e 0,004 para as amostras *outdoor*. Em ambos os cultivos, mostrado na **Fig.2** foram identificados os rendimentos dos compostos (E)-cariofileno (in 20,21%; out 17,07%), selina-3,7(11)-dieno (in 14,75%; out 11,78%), α -bulneseno (in 6,03%; out 6,55%), α -humuleno (in 9,23%; out 5,49%) e terpinoleno (in 4,00%; out 10,11%). Além disso, os cromatogramas nas **Fig.3** e **Fig.4** mostram que os monoterpenos são abundantes no cultivo *outdoor* (que são identificados no lado mais esquerdo da figura), mas ficam abaixo do limite de detecção no *indoor*. Dessa forma, mirceno, 3-careno e terpineno foram os principais terpenos diferenciados entre os cultivos, demonstrando que suas proporções variaram conforme o ambiente e confirmando que as diferenças entre os sistemas *indoor* e *outdoor* eram as situações esperadas, pois o fator que influencia a produção de terpenos em plantas são os cuidados e cultivo das plantas, pois é um dos fatores que afetam o metabolismo da planta e sua produção de substâncias orgânicas³.

Figura 2. Gráfico da área de cada pico de acordo com os seus respectivos terpenos.

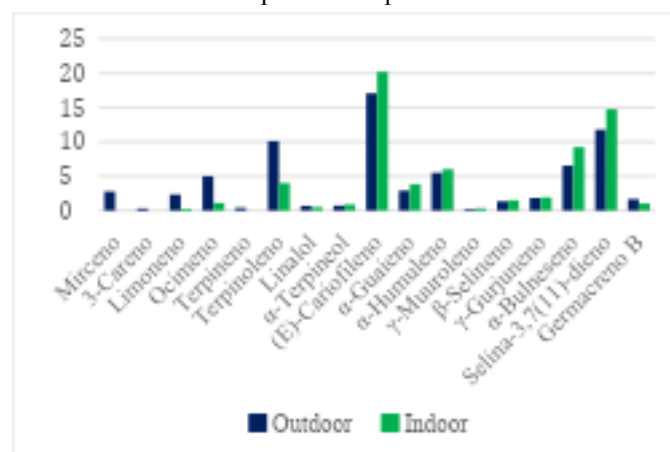


Figura 3. Cromatograma da amostra *Outdoor*. Área do pico x Tempo de corrimento no aparelho em minutos.

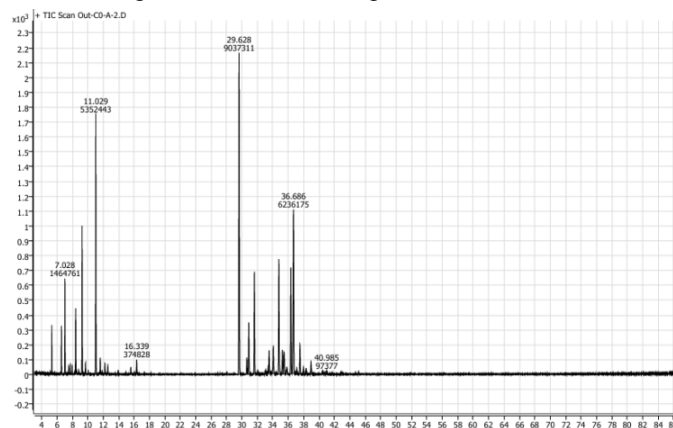
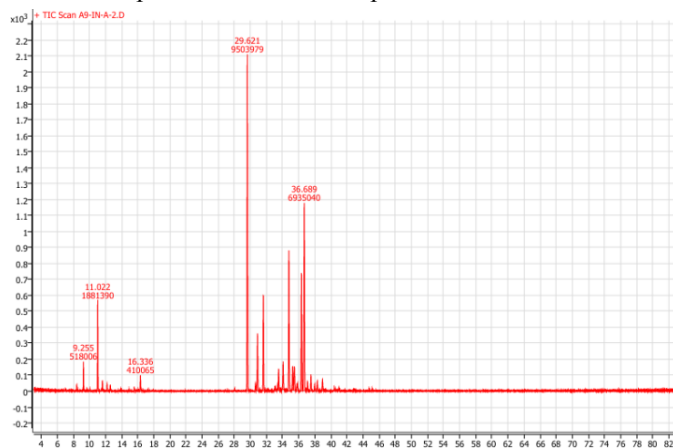


Figura 4. Cromatograma da amostra *Indoor*. Área do pico x Tempo de corrimento no aparelho em minutos.



Conclusões

O perfil terpenico da *Cannabis* variou conforme o tipo de cultivo. Os compostos terpinoleno, (E)-cariofileno, α -bulneseno e selina-3,7(11)-diene apresentaram as maiores áreas de pico, com destaque para o terpinoleno no cultivo *outdoor*. Abordando os rendimentos das extrações, no cultivo *outdoor* foi de 1,96% e o do *indoor* de 1,32%, que são resultados esperados ao padrão, pois o rendimento das extrações em pequena escala de óleos essenciais é baixo. Ressaltando que o ideal na metodologia e para a sessão experimental relevar é que seja realizado para as análises, triplicatas autênticas para melhor caracterização e determinar a presença de todos os possíveis terpenos presentes dentro dos óleos essenciais da *Cannabis Sativa*.

Seção experimental

Para começar o experimento realizando a extração do Óleo Essencial é importante tomar certos cuidados com o

uso do aparato Clevenger. Em todas as réplicas foram utilizados 15 g de amostra. Com a amostra dentro do aparato, utilizamos 250 mL de água Mili-Q e realizamos em conjunto uma análise de verificar o tempo ideal para manter a extração de OE (óleo essencial): pelos resultados foi definido o ideal é de 40 a 50 minutos, onde dessas extrações a média de OE extraído foi de 0,25 mL. Os produtos extraídos por meio da hidrodestilação são voláteis, então foi feito o armazenamento em frascos âmbar e refrigerados em -4°C. Para a caracterização dos terpenos pelo CG-MS é utilizado apenas o equipamento, suas especificações e seu uso correto, junto das literaturas disponíveis foi realizado a identificação dos terpenos de acordo com o IRK (Índice de Retenção de Kovats) e analisando pelos dados dispostos sobre o IRK de outras moléculas identificadas.

Contribuições por Autor

Todos os autores fizeram grande competências em seus trabalhos como a Prof. Dr. Fernanda Vasconcelos de Almeida teve o papel de orientar os membros dentro desse trabalho, Marina Azevêdo Vilhena que colaborou no trabalho com seu conhecimento da área de terpenos de amostras de cannabis e o aluno Pedro Henrique Rocha Lopes que dedicou tempo e esforço para a produção experimental deste trabalho.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço à direção, docentes, discentes e funcionários do Instituto de Química da Universidade de Brasília. À minha orientadora, pela oportunidade de iniciar na pesquisa. Ao grupo do AQQUA, pela ajuda e companheirismo dentro do laboratório. E ao PET-Química/IQ/UnB pela oportunidade de publicar meu trabalho da disciplina de Técnica de Pesquisa.

Notas e referências

- 1 Shennong, *Shennong Bencao Jing (Clássico da Matéria Médica)*, séc. I-II d.C.
- 2 Agencia Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 940, de

14 de novembro de 2024: Dispõe sobre a aprovação da Farmacopeia Brasileira, *Diário Oficial da União*.

- 3 L. O. Felipe e J. L. Bicas, *Quím. Nova Esc.*, 2017, **39**, 120–130.
- 4 H. Hendriks and A. P. Bruins, A tentative identification of components in the essential oil of *Cannabis sativa* L. by a combination of gas chromatography negative ion chemical ionization mass spectrometry and retention indices, *Biol. Mass Spectrom.*, 1983, **10**, 377–381.
- 5 E. Groce, The health effects of cannabis and cannabinoids: The current state of evidence and recommendations for research, *J. Med. Regul.*, 2018, **104**, 32–32.
- 6 A. N. De Faria Filho, J. Muniz, C. Soldi, M. C. Navroski and G. Kruker, *Anais da XI Jornada Catarinense de Plantas Medicinais*, Even3, Santa Rosa de Lima, 2025.

Análise imediata do bagaço de cana de açúcar para aplicação em fermentação escura

DOI: 10.5281/zenodo.22312800

Murilo Lino Roberto Barbosa^{*a}, Guilherme Fonseca Barbosa^a e Grace Ferreira Ghesti^a

The transition to renewable energy generation has driven the use of biomass as a strategic feedstock. Sugarcane bagasse stands out as an abundant substrate for biorefineries. Dark fermentation is a relevant route for its valorization, where process efficiency relates to substrate composition. Proximate analysis provides essential data regarding biodegradation potential. This study performs a proximate analysis of sugarcane bagasse to evaluate its viability for dark fermentation, aligning with UN Sustainable Development Goals (SDGs) 7, 8, and 12.

A transição para matrizes energéticas renováveis impulsiona o uso de biomassas residuais. O bagaço de cana-de-açúcar destaca-se como substrato promissor para valorização em biorrefinarias. A fermentação escura é uma rota relevante para esse reaproveitamento, cuja eficiência depende da composição físico-química do material. Dentre as etapas de caracterização, a análise imediata fornece parâmetros fundamentais sobre o potencial de biodegradação e teor de matéria orgânica útil da biomassa. O objetivo deste trabalho foi realizar a análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, avaliando sua viabilidade para aplicação em rotas de fermentação escura. Os resultados obtidos confirmam a estabilidade do resíduo e seu alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 8 e 12 da ONU.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

^{*}E-mail: muriloroberto.lino@gmail.com

Palavras-chave: Bagaço de cana-de-açúcar; Fermentação escura; Biocombustíveis.

Recebido em 16 de agosto de 2026,
Aprovado em 30 agosto de 2026,
Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

A economia circular propõe uma nova forma de pensar a produção e o consumo para enfrentar os problemas ambientais e econômicos atuais. Diferente do modelo tradicional que funciona na lógica de extrair recursos, fabricar produtos e descartar o lixo, a economia circular busca reaproveitar materiais, reduzir desperdício e regenerar os recursos naturais.¹ No Brasil, essa ideia é muito importante no setor agrícola e agroindustrial, que é um dos motores da economia do país, mas também gera uma quantidade enorme de resíduos orgânicos.

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos², o uso correto desses resíduos do campo e das indústrias é fundamental para diminuir os impactos ambientais e criar alternativas mais sustentáveis. Um dos principais resíduos gerados no país é o bagaço de cana-de-açúcar, produzido em grande quantidade nas usinas do setor sucroenergético.

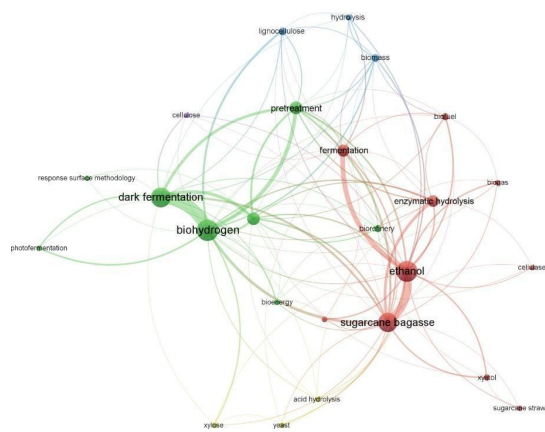
Esse material é formado principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes da estrutura vegetal, o que dá ao bagaço um grande potencial para ser usado como fonte de energia limpa ou na fabricação de novos produtos.

Nesse cenário, o bagaço de cana-de-açúcar destaca-se como uma das biomassas residuais mais abundantes do Brasil, mantendo propriedades estruturais e composicionais muito consistentes e padronizadas entre diferentes cultivares nacionais, o que facilita o seu processamento industrial.⁹

Além disso, o acoplamento da fermentação escura a rotas foto-fermentativas sequenciais surge como uma das estratégias biotecnológicas mais promissoras para superar as limitações termodinâmicas de rendimento e maximizar a produção biológica de hidrogênio.⁶

para embasar seu uso potencial em processos de fermentação escura.

Figura 1. Mapeamento de redes de ocorrência de palavras-chave relacionadas ao bagaço de cana-de-açúcar.



Observa-se que o uso do bagaço (*sugarcane bagasse*) está bastante consolidado para a produção de etanol. Por outro lado, a ligação entre o bagaço e a produção de biohidrogênio (*biohydrogen*) por fermentação escura (dark fermentation) ainda é pouco explorada e apresenta uma conexão fraca na literatura.

Para avançar no uso do bagaço em rotas menos exploradas, como a fermentação escura, primeiro é preciso conhecer bem as características do material. É aí que entra a análise imediata: um conjunto de testes em laboratório que mede a quantidade de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo no bagaço. Esses dados são práticos e mostram como a biomassa se comporta no processamento e qual o seu potencial para servir de matéria-prima nesses bioprocessos.³

Estudar e caracterizar o bagaço de cana se encaixa diretamente nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU),⁴ principalmente nos objetivos de garantir energia limpa e acessível (ODS 7), incentivar a inovação na indústria (ODS 9) e promover o consumo e a produção responsáveis (ODS 12). Assim, conhecer as propriedades desse resíduo ajuda a evitar o descarte inadequado e fornece os dados necessários para transformar o bagaço em um recurso valioso dentro da economia circular.⁴

Deste modo, este trabalho tem como objetivo realizar a análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, avaliando suas características físico-químicas como etapa fundamental

Metodologia

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado neste estudo foi coletado na região de Planaltina (DF). Logo após a coleta, o material passou por uma etapa de preparação que incluiu a moagem e a padronização do tamanho dos grãos (granulometria), garantindo que a amostra ficasse homogênea para as análises em laboratório.

A caracterização do bagaço seguiu o procedimento da análise imediata, realizada em três determinações principais.

Primeiro, mediu-se o teor de umidade por meio da diferença de massa da amostra antes e depois de ir à estufa a 105 °C, o que permitiu quantificar a quantidade de água no material. A determinação do teor de umidade (U) foi calculada pela perda de massa após a secagem, conforme a Equação 1:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Em que mi é a massa inicial da amostra úmida (g) e mf é a massa final da amostra seca (g).

$$MV(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde m_i é a massa inicial da amostra (g) e m_f é a massa residual da amostra após o aquecimento no forno mufla a 950 °C (g).

Por fim, o teor de cinzas foi determinado após a combustão completa da matéria orgânica em forno a 600 °C durante 4 horas, restando apenas os minerais inertes. O teor de cinzas (C) foi determinado pela razão entre a massa do resíduo inorgânico e a massa inicial da amostra seca, expresso pela Equação 3:

$$C(\%) = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

Sendo mi a massa inicial da amostra (g) e mf a massa final do resíduo após a incineração (g).

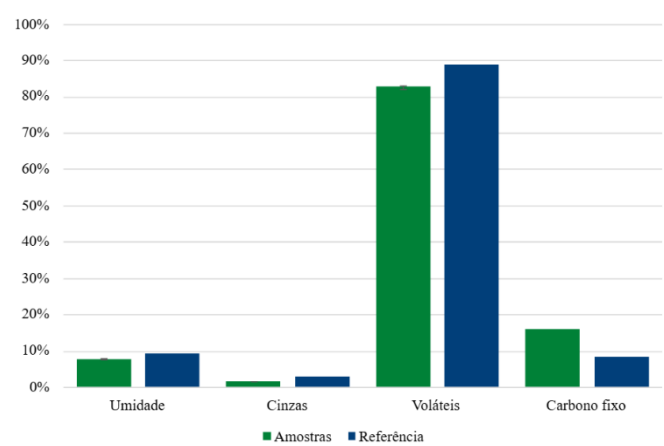
Para garantir a confiabilidade e a precisão dos dados, todas as etapas foram feitas em triplicata, utilizando materiais de referência certificados e brancos analíticos. Como critério de qualidade, aceitou-se apenas um desvio relativo inferior a 5% entre as medições de cada réplica.

Após a obtenção e o cálculo dos dados experimentais, os resultados foram comparados com valores relatados na literatura científica para biomassas semelhantes. Para isso, consultaram-se trabalhos anteriores, apresentados na seção a seguir, avaliando se os teores de umidade, materiais voláteis e cinzas obtidos estavam coerentes e dentro da faixa esperada para o bagaço de cana-de-açúcar.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos na análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar apresentaram boa concordância geral com os valores de referência compilados na literatura. De modo geral, o gráfico de caracterização confirma que a biomassa analisada possui um perfil adequado, com parâmetros estáveis e dentro dos padrões típicos esperados para resíduos agrícolas.

Figura 2. Comparação dos teores da análise imediata entre as amostras de bagaço de cana-de-açúcar e valores de referência.



Para consolidar as observações gráficas, a Tabela 1 apresenta os valores médios exatos e seus respectivos desvios, evidenciando a precisão das triplicatas experimentais realizadas.

Tabela 1. Resultados médios obtidos na análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar.

Parâmetro	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Desvio Relativo (%)
Umidade*	7,675	0,155	2,020
Materiais Voláteis**	82,566	0,606	0,734
Cinzas**	1,661	0,072	4,339
Carbono Fixo**	15,773	—	—

[*] Base Úmida (b.u.). [**] Base Seca (b.s.).

Para a correta interpretação dos resultados obtidos na análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, é fundamental distinguir as bases de cálculo empregadas na apresentação dos

dados, expressas em base úmida (b.u.) e base seca (b.s.). A base úmida avalia a amostra integral em seu estado original de recebimento, incluindo a umidade residual de 7, 675% ± 0, 155%. Sob esta condição, o balanço de massa global exige que a soma de todos os constituintes centesimais, umidade (7, 675%), materiais voláteis (82, 566%), cinzas (1, 661%) e o carbono fixo corrigido para base úmida (8, 098%), resulte em exatamente 100, 00%. Por outro lado, a base seca desconsidera a fração hídrica para expressar as concentrações dos componentes orgânicos e minerais exclusivamente na matéria seca, o que facilita a comparação direta com outras biomassas lignocelulósicas. Sob esta perspectiva recomendada para a caracterização química, a umidade é reportada isoladamente (7,675% b.u.), enquanto a soma dos componentes secos, materiais voláteis (82,566%), cinzas (1, 661%) e carbono fixo (15,773%), fecha o balanço matemático em exatamente 100,00%.

A avaliação do teor de umidade indicou um valor médio de 7,675%, ligeiramente inferior à faixa de 9% a 10% frequentemente reportada na literatura.⁵ Do ponto de vista do processamento, essa característica é altamente favorável. O baixo teor de umidade atua como um fator de preservação da biomassa, inibindo a proliferação de microrganismos deteriorantes (como fungos) durante o armazenamento em pátios industriais. Além disso, em rotas que exigem pré-tratamentos termoquímicos, a biomassa mais seca reduz a penalidade energética associada a evaporação da água intrínseca, otimizando o balanço de massa e energia do sistema.

O teor de cinzas determinado foi de 1,661%, situando-se abaixo da referência típica de 3%. As cinzas representam a fração inorgânica da biomassa, composta predominantemente por sílica e metais alcalinos. Um reduzido teor de cinzas é um indicador de alta qualidade para o substrato, pois minimiza o risco de incrustações e desgaste abrasivo em equipamentos. No contexto da biotecnologia, o baixo conteúdo mineral é crucial para evitar a inibição osmótica e a toxicidade aos consórcios microbianos, maximizando o volume de sólidos voláteis efetivamente disponíveis para a hidrólise enzimática. A fração de materiais voláteis, que atingiu a marca de 82,566%, reflete a parcela da biomassa que se decompõe e vaporiza termicamente. Embora ligeiramente inferior à referência literária (cerca de 88%), essa alta proporção atesta que a maciça maioria da estrutura do bagaço é constituída por matéria orgânica lábil e reativa, majoritariamente holo celulose (celulose e hemicelulose). É justamente essa fração que fornece os carboidratos e açúcares

fermentescíveis primários que atuarão como fonte de carbono no metabolismo bacteriano.

Por fim, o teor de carbono fixo, calculado por diferença em base seca, conforme a Equação 4, foi de 15,773%, um valor superior aos 8% típicos da literatura.

$$CF (\%) = 100\% - (\%V + \%C) \quad (4)$$

O carbono fixo está intimamente associado à fração mais recalcitrante da biomassa vegetal, como a lignina e porções altamente cristalinas da celulose, que não volatilizam nas temperaturas de ensaio. Este enriquecimento relativo no carbono fixo justifica cientificamente a necessidade e a importância da aplicação de métodos de pré-tratamento (sejam eles químicos, físicos ou biológicos) para desestruturar a matriz lignocelulósica do bagaço, rompendo a barreira da lignina e facilitando o acesso das enzimas aos açúcares.

Estudos de otimização revelam que o pré-tratamento com ácidos diluídos ou hidrotérmicos é fundamental para contornar essa recalcitrância e liberar frações concentradas de glicose e xilose, maximizando a eficiência de conversão por microflora termofílica e minimizando a geração de compostos inibidores.¹⁰ Adicionalmente, o mapeamento preciso dessas frações abre caminho para a aplicação de modelos metabólicos em escala genômica aplicados à otimização e ao desenho de linhagens industriais mais robustas para processos consolidados.¹³

Em suma, o balanço entre baixa umidade, reduzido teor de cinzas e a predominância de materiais voláteis assegura a viabilidade e a alta qualidade do bagaço de cana-de-açúcar analisado. O perfil físico-químico obtido atesta seu grande potencial como substrato robusto para processos de bioconversão, em especial como matéria-prima na produção de biohidrogênio por meio de reatores de fermentação escura.

Conclusões

A caracterização física e química do bagaço de cana-de-açúcar por meio da análise imediata cumpriu o objetivo científico de estabelecer parâmetros analíticos essenciais que validam o potencial biotecnológico deste coproduto lignocelulósico como substrato estável e de alta reatividade para processos de fermentação escura.

A importância estratégica desta investigação fundamenta-se em preencher uma lacuna crítica na literatura recente, uma vez que o mapeamento bibliométrico de

palavras-chave revela que, embora o bagaço de cana-de-açúcar esteja historicamente consolidado como matéria-prima para a produção de bioetanol, a sua rota biológica de conversão para biohidrogênio por fermentação escura ainda é fracamente explorada e carece de dados de partida padronizados que deem suporte à engenharia de processos.

Um dos fatores determinantes para a eficiência e aplicabilidade prática dos dados obtidos reside no controle e na discussão do teor de umidade da biomassa, estabelecido nesta pesquisa em $7,675\% \pm 0,155\%$. Na prática agroindustrial e logística brasileira, o bagaço é descarregado das moendas industriais em condições de saturação hídrica extrema, apresentando teores de umidade típicos de 45% a 50% em base úmida. A estocagem direta dessa biomassa úmida em grandes pilhas ao ar livre nos pátios das usinas desencadeia uma rápida fermentação exotérmica de açúcares residuais, elevando a temperatura interna para cerca de 60 °C, o que provoca o acúmulo de gases combustíveis sob risco iminente de incêndios e autocombustão. Além disso, a alta umidade atrai fungos causadores de podridão branca, que degrada os carboidratos e açúcares fermentescíveis primários que degradam aceleradamente os polissacarídeos estruturais (celulose, hemicelulose e lignina), acarretando perdas severas de até 15% em massa vegetal útil antes do processamento

Em rotas termoquímicas concorrentes, como a combustão e a gaseificação, a presença de água intrínseca consome uma fração expressiva da energia térmica útil do combustível exclusivamente para sua evaporação, reduzindo de forma drástica a eficiência operacional do sistema,^{5,12} razão pela qual as políticas de resíduos sólidos priorizam a queima apenas de biomassas com baixos teores de água (próximos a 8%).

Sob a ótica bioquímica da fermentação escura, a manutenção e a padronização da biomassa com umidade controlada de aproximadamente 7,6% desempenham um papel crucial de preservação biológica, inibindo o apodrecimento e a biodegradação precoce das frações lignocelulósicas durante o armazenamento. Isso garante uma matéria-prima de alta qualidade composicional e com sólidos orgânicos altamente concentrados, reduzindo a penalidade energética nas etapas subsequentes de pré-tratamento hidrotérmico e hidrólise enzimática. A robustez e a alta precisão das triplicatas experimentais realizadas nesta pesquisa foram consolidadas pela comparação minuciosa de seus parâmetros analíticos com dados reportados

por múltiplos autores na literatura científica:

- **Materiais Voláteis (82,566% ± 0, 606%):** O teor de voláteis determinado neste estudo apresentou excelente consonância com os 83, 98% ± 1, 48% obtidos em bagaço bruto⁹ (*in natura*) coletado na região central de São Paulo, superando de forma expressiva os 79, 29% ± 0, 71% descritos no estado de Goiás,⁵ e os 69, 99% reportados em análises na África do Sul.¹² Uma vez que a matéria volátil da biomassa representa a fração orgânica que se vaporiza e se decompõe sob aquecimento térmico, sendo composta majoritariamente por hemicelulose e celulose, esse expressivo teor obtido (superior a 82%) comprova que a maior parte da parede celular do bagaço analisado constituído por material analisado passou por um processo eficiente de lavagem e moagem que minimizou a contaminação por sílica e óxidos inorgânicos do solo, que tendem a se acumular nas frações de menor tamanho de partícula nas moendas industriais.³
- **Carbono Fixo (15,773%):** O teor de carbono fixo determinado por diferença assemelhou-se aos 16, 14% ± 0,84%⁵ encontrados, aos 16,39%,¹² superando o índice de 12,56% ± 1,11%.⁹ Como o carbono fixo representa a porção carbonácea sólida que resiste à volatilização térmica imediata, ele está intimamente correlacionado aos componentes de maior recalcitrância física e estabilidade térmica da parede celular, especificamente a lignina e as regiões de celulose altamente cristalina. A presença dessa fração recalcitrante de cerca de 15,7% atesta que a biomassa possui uma barreira física robusta à penetração enzimática. Isso justifica, sob o ponto de vista biotecnológico, a indispensabilidade do acoplamento de tratamentos prévios (físicos, químicos ou enzimáticos) capazes de desestruturar a blindagem da lignina para expor a holo celulose ao ataque microbiano.¹⁰

Em suma, a análise imediata desenvolvida neste trabalho fornece um diagnóstico físico-químico padronizado da biomassa, essencial para que engenheiros e biotecnólogos possam calcular balanços de massa e dimensionar adequadamente as etapas de pré-tratamento e carregamento orgânico de reatores fermentativos. O reaproveitamento energético desse coproduto agroindustrial alinha-se de forma direta com as diretrizes do Plano Nacional de Resíduos Sólidos,² com as premissas da transição para a economia circular restaurativa e com os Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU),⁴ especificamente no que tange às metas de Energia Limpa e Acessível (ODS 7), Indústria, Inovação e Infraestrutura (ODS 9) e Consumo e Produção Responsáveis (ODS 12).

intuída por matéria orgânica lábil e altamente reativa. Essa característica é de suma importância para a digestão anaeróbica, pois assegura que a estrutura lignocelulósica, após desestruturação preliminar, fornecerá uma quantidade abundante de carboidratos livres para o metabolismo microbiano produtor de hidrogênio.

- **Teor de Cinzas (1,661% ± 0,072%):** O índice mineral residual verificado nesta pesquisa posicionou-se abaixo da referência média típica de 3% aceita na literatura para o bagaço de cana. Este resultado é notavelmente inferior aos índices de cinzas reportados de 4,55% ± 0,16%,⁵ de 3,56% ± 0,82%,⁹ e extraordinariamente menor do que resíduos agrícolas altamente mineralizados como a casca ou palha de arroz, que frequentemente ultrapassam a marca de 18% de cinzas inertes. A obtenção de um baixo conteúdo mineral é um indicador de alta pureza e qualidade da biomassa. Na engenharia de bioprocessos, a minimização de cinzas é fundamental para prevenir o desgaste físico abrasivo de bombas e tubulações, evitar fenômenos corrosivos e de incrustação e, sob o aspecto microbiológico, impedir a inibição osmótica e efeitos de toxicidade de cátions minerais sobre os consórcios de bactérias fermentativas anaeróbicas, maximizando o rendimento biológico global do biorreator. Esse resultado também evidencia que

Seção experimental

A descrição dos procedimentos experimentais a seguir visa fornecer o detalhamento necessário para garantir a reprodutibilidade do estudo por outros pesquisadores. A preparação da biomassa e a determinação dos parâmetros da análise imediata seguiram os métodos operacionais padronizados por Moraes, Rosa e Marconcini.³ e Inicialmente, o bagaço de cana-de-açúcar passou por um processo de preparação para assegurar a homogeneidade do material, compreendendo etapas de secagem ao ar, moagem em moinho de facas e peneiramento para padronização da granulometria das partículas antes dos ensaios.

A caracterização físico-química abrangeu a determinação dos teores de umidade, cinzas, materiais

voláteis e carbono fixo. O teor de umidade foi determinado pela perda de massa após a secagem da biomassa em estufa mantida a 105°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) até a obtenção de massa constante. O conteúdo de cinzas foi avaliado pela calcinação da matéria orgânica em forno mufla a 600°C (25°C) até a obtenção do resíduo mineral inerte. Para a mensuração das matérias voláteis, a amostra desidratada foi submetida ao aquecimento em forno mufla a 900°C ($\pm 20^\circ\text{C}$) por 7 minutos em cadinho fechado, prevenindo a combustão direta.

Para assegurar a precisão e a confiabilidade estatística dos dados permitindo sua futura replicação e citação por outros trabalhos todas as determinações analíticas foram realizadas em triplicata, sendo os resultados tabulados e expressos por meio da média aritmética acompanhada do desvio padrão.

Contribuições por Autor

A realização deste trabalho foi executada pelo autor do artigo, cujos experimentos foram conduzidos ao longo de seis meses, durante o segundo semestre de 2025, no Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis. O aluno de graduação em Engenharia Química Murilo Lino Roberto Barbosa foi responsável pela execução prática dos ensaios de análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, pelo tratamento dos dados, pelo levantamento bibliográfico e pela redação inicial do manuscrito. O aluno de mestrado Guilherme Fonseca Barbosa atuou no suporte metodológico e operacional das atividades de laboratório, no auxílio à interpretação dos resultados físico-químicos e na revisão crítica do texto. A professora doutora Grace Ferreira Ghesti respondeu pela concepção do estudo, orientação e supervisão geral do projeto.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de Brasília (UnB) e ao Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis (LMCERVA) pela infraestrutura concedida..

Notas e referências

- 1 Ellen MacArthur Foundation, *Towards the circular economy* Vol. 1: an economic and business rationale

for an accelerated transition}, Ellen MacArthur Foundation, Cowes, 2013.

- 2 Ministério do Meio Ambiente (MMA), *Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares*, MMA, Brasília, 2022.
- 3 J. P. S. Morais, M. F. Rosa and J. M. Marconcini, *Procedimentos para análise lignocelulósica*, Embrapa, Campina Grande, 1st edn., 2010.
- 4 Organização das Nações Unidas (ONU), *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*, ONU, Brasília, 2024.
- 5 D. C. Arantes, *Potencial de produção de biogás a partir do bagaço de cana-de-açúcar*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- 6 S. Gupta, A. Fernandes, A. Lopes, L. Grasa and J. Salafranca, *Appl. Sci.*, 2024, **14**, 10789.
- 7 E. K. Holwerda, K. D. Hirst and L. R. Lynd, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 2012, **39**, 943--947.
- 8 S. Sharma, S. Basu, N. P. Shetti and T. M. Aminabhavi, *Sci. Total Environ.*, 2020, **713**, 136633.
- 9 N. P. Pérez, J. A. R. Travieso, E. D. Shelton, D. T. Pedroso, E. B. Machin, C. E. Tuna and J. L. Silveira, *Bioresources and Bioprocessing*, 2025, **12**, 60.
- 10 Z. Lai, M. Zhu, X. Yang, J. Wang and S. Li, *Biotechnol. Biofuels*, 2014, **7**, 119.
- 11 A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton and D. Crocker, *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*, National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- 12 A. Anukam, S. Mamphweli, E. Meyer and O. Okoh, *J. Energy*, 2014, **2014**, 713054.
- 13 R. A. Thompson, S. Dahal, S. Garcia, I. Nookaew and C. T. Trinh, *Biotechnol. Biofuels*, 2016, **9**, 194

Determinação colorimétrica de canabinoides em óleo medicinal utilizando análise RGB por *smartphone*

DOI: 10.5281/zenodo.22313230

Gabriel Castro e Silva^{a*}, Luana Maira Curvello Wutke^a, Ana Cristi Basile Dias^a, Fernanda Vasconcelos de Almeida^a

This study developed and evaluated a portable, low-cost digital colorimetric method to quantify and differentiate cannabidiol (CBD) and tetrahydrocannabinol (THC) in oily matrices. The assay was based on a modified Duquenois-Levine reaction using salicylaldehyde in an acidic medium, with reaction solutions photographed under standardized optical conditions inside a 3D-printed chamber. Chromatic signal extraction and univariate analytical calibration curves were performed using the PhotoMetrix® application, highlighting the sensitivity of the blue channel for linear concentration correlation. The reaction systems exhibited concentration-dependent visual and digital responses, providing distinct colorimetric profiles for CBD, THC, and mixed formulations. The proposed methodology demonstrated high analytical potential for direct application in the quality control and routine monitoring of artisanal oils produced by patient associations, establishing itself as a complementary, decentralized, and accessible alternative to conventional chromatographic techniques.

O presente trabalho desenvolveu e avaliou um método colorimétrico digital portátil e de baixo custo para quantificar e diferenciar canabidiol (CBD) e tetra-hidrocanabinol (THC) em matrizes oleosas. O ensaio fundamentou-se na reação de Duquenois-Levine modificada com salicilaldeído em meio ácido, cujas soluções reacionais foram fotografadas sob condições ópticas padronizadas no interior de uma câmara impressa em 3D. A extração dos sinais cromáticos e a construção das curvas analíticas univariadas foram realizadas pelo aplicativo PhotoMetrix®, destacando-se a sensibilidade do canal azul para a correlação linear das concentrações. Os sistemas reacionais exibiram respostas visuais e digitais dependentes da concentração, conferindo perfis colorimétricos característicos para CBD, THC e formulações mistas. A metodologia proposta demonstrou elevado potencial analítico para aplicação direta no controle de qualidade e no monitoramento rotineiro de óleos artesanais produzidos por associações de pacientes, consolidando-se como alternativa complementar, descentralizada e acessível às técnicas cromatográficas convencionais.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*gabriel.cs018@gmail.com

Palavras-chave: Canabinoides; óleo medicinal; aplicativo RGB; *smartphone*.

Recebido em 16 de agosto de 2026.

Aprovado em 30 de agosto de 2026.

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

O uso de *Cannabis sativa* L. por diferentes civilizações é registrado há milênios, abrangendo diversas finalidades, desde a produção de fibras têxteis e práticas religiosas até aplicações medicinais. Registros históricos das medicinas tradicionais chinesa, indiana e egípcia descrevem o emprego da planta no alívio de dores, inflamações e no tratamento de diferentes condições neurológicas. Esse amplo histórico de utilização medicinal despertou, ao longo do tempo, o interesse científico pela investigação dos constituintes químicos da cannabis e dos mecanismos associados aos seus efeitos biológicos.^{1,2} A morfologia geral da planta está ilustrada na Figura 1.

Figura 1. Planta *Cannabis sativa* L. Extraída da Referência 12.



O perfil fitoquímico da cannabis compreende uma rede diversa de metabólitos secundários, na qual os fitocanabinoides exercem papel de destaque. Dentre essa classe, o canabidiol (CBD) e o Δ^9 -tetrahydrocannabinol (THC) despontam como os constituintes majoritários e os mais

investigados em aplicações biomédicas e terapêuticas. Compartilhando a mesma fórmula molecular ($C_{21}H_{30}O_2$) e massa molecular idêntica ($314,46 \text{ g.mol}^{-1}$), ambas as substâncias atuam como isômeros constitucionais. A principal divergência topológica reside no fechamento do anel central. O THC possui um núcleo dibenzopirano tricíclico rígido, enquanto o CBD exibe um arcabouço bicíclico aberto com rotação livre entre a porção terpênica e o anel resorcinol. Essa variação conformacional altera a afinidade pelos receptores do sistema endocanabinoide, resultando em respostas farmacológicas distintas. As representações estruturais do CBD e do THC encontram-se ilustradas nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Figura 2. Estrutura química do Canabidiol (CBD). Extraída pelo autor do software *ChemSpider*.

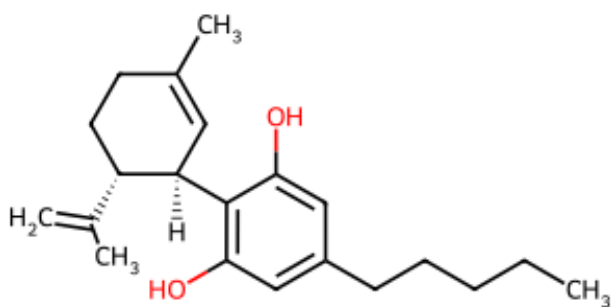
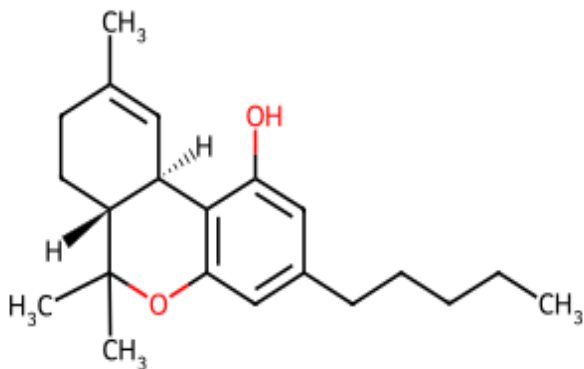


Figura 3. Estrutura química do Δ^9 -tetrahydrocannabinol (THC). Extraída pelo autor do software *ChemSpider*.



A atividade farmacológica desses fitocannabinoides decorre de sua atuação sobre o sistema endocanabinoide, interagindo primordialmente com os receptores CB_1 e CB_2 presentes no sistema nervoso central e em estruturas teciduais periféricas. Essa modulação desencadeia respostas terapêuticas expressivas, incluindo efeitos anticonvulsivantes, analgésicos, anti-inflamatórios, ansiolíticos e neuroprotetores, sustentando o crescente emprego de formulações de Cannabis no manejo

de patologias refratárias como dor crônica, espasticidade muscular e epilepsias de difícil controle.^{3,4}

No contexto nacional, o acesso às abordagens terapêuticas à base de cannabis foi estruturado por meio de resoluções técnicas emitidas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), conciliando a expansão da disponibilidade clínica com o rigor do controle sanitário. A Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 327/2019 estabeleceu os parâmetros iniciais para produção, importação, prescrição e controle de qualidade desses insumos.⁵ Complementarmente, a RDC nº 660/2022 normatizou a importação direta por pessoas físicas voltada ao uso individual sob prescrição, viabilizando tratamentos indisponíveis na indústria farmacêutica local.⁶

Esse cenário normativo vivenciou novos avanços jurídicos. Em 2024, no julgamento do Incidente de Assunção de Competência nº 16 (IAC 16), o Superior Tribunal de Justiça (STJ) admitiu a importação de sementes e o cultivo de linhagens de cannabis sativa com baixo teor de THC para destinação estritamente medicinal, farmacêutica ou industrial, determinando a regulamentação do cultivo pela União e pela ANVISA.⁷ A consolidação dessa etapa processual ocorreu em abril de 2026 com a declaração de cumprimento integral das medidas pelo tribunal, formalizando as bases operacionais para o cânhamo industrial no território brasileiro.⁸

Acompanhando essa determinação, a ANVISA instituiu novos marcos regulatórios em 2026 para o controle sanitário do setor. A RDC nº 1.014/2026 disciplinou a produção terapêutica realizada por entidades civis e associações de pacientes sem fins lucrativos, estabelecendo parâmetros obrigatórios de rastreabilidade e ensaios de controle de qualidade.⁹ Paralelamente, a RDC nº 1.015/2026 revisou os critérios de fabricação e importação de produtos medicinais para uso humano, substituindo integralmente a antiga RDC nº 327/2019 e exigindo ferramentas analíticas ágeis e reprodutíveis para a verificação de identidade e dosagem dos compostos.¹⁰

Essa necessidade analítica impulsionou a expansão de pesquisas acadêmicas voltadas à caracterização fitoquímica. No Instituto de Química da Universidade de Brasília (IQ/UnB), investigações avançadas abrangem a quantificação de cannabinoides e terpenos, a otimização de parâmetros de extração, rotas de descarboxilação e estudos de estabilidade química. Como desdobramento desse polo científico, foi estruturado o Observatório Brasileiro Interdisciplinar da Cannabis, integrando o desenvolvimento e a validação de

ensaios analíticos à avaliação dos impactos clínicos dos fitoterápicos, fortalecendo a articulação entre tecnologia laboratorial e saúde pública.¹¹

Não obstante a maturidade regulatória, os custos elevados das alternativas industrializadas continuam restringindo o acesso amplo da população aos tratamentos. Nesse cenário, organizações associativas desempenham função preponderante no acolhimento de pacientes. Destaca-se a Associação Brasileira do Pito do Pango (Abrapango), entidade dedicada ao acesso seguro e humanizado a derivados da Cannabis, atuando na interface entre clínica, assistência social e ciência. A dimensão dessa demanda reflete-se em seus registros institucionais, que contabilizam mais de 8.000 associados, mais de 300 assistidos de forma gratuita, 29.000 unidades medicinais dispensadas e o suporte técnico de uma rede de mais de 700 prescritores parceiros.¹²

Contudo, a execução de ensaios químicos de rotina configura um desafio substancial para entidades que operam sem infraestrutura laboratorial dedicada ou corpo técnico especializado. Instrumentos de separação considerados padrão-ouro, como a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), asseguram exatidão e sensibilidade analítica incomparáveis, mas impõem elevados investimentos em instrumentação, manutenção preventiva e solventes de alto custo operacional. Embora indispensáveis para etapas confirmatórias, surge a demanda premente por metodologias analíticas complementares, econômicas e portáteis, capazes de viabilizar a triagem e o monitoramento rotineiro das bateladas de produção.

Nesse âmbito, este trabalho propõe o desenvolvimento e a validação de uma ferramenta analítica alternativa, descentralizada e de baixo custo para a quantificação de canabinoides em matrizes oleosas, concebida como triagem complementar às técnicas instrumentais de referência. A colorimetria digital assistida por smartphone surge como uma metodologia promissora ao correlacionar reações de derivatização química à extração de grandezas analíticas no espaço de cor RGB. A implementação desse protocolo compreende a seleção de agentes cromogênicos seletivos, a padronização do preparo das amostras lipídicas e a aquisição digital padronizada de imagens, fornecendo subsídios técnicos para conferir maior confiabilidade, autonomia e reprodutibilidade ao controle de qualidade em associações de pacientes.

Metodologia

Amostras originais

As amostras de óleo analisadas neste estudo foram fornecidas pela Associação Brasileira do Pito do Pango (Abrapango), no âmbito da parceria estabelecida com o Observatório Brasileiro Interdisciplinar da cannabis da Universidade de Brasília (UnB), com finalidade de pesquisa e caracterização dos produtos terapêuticos. Foram avaliadas três formulações distintas: óleo de CBD, óleo de THC e uma formulação combinada de CBD/THC, denominada Mix, como é possível ver na Figura 3.

Figura 3. Amostras de óleos de CBD, THC e Mix (CBD/THC), respectivamente.



A formulação de CBD apresentava concentração nominal de 100 mg mL^{-1} (10% m/v), enquanto o óleo de THC apresentava concentração nominal de 100 mg mL^{-1} (10% m/v). O Mix apresentava concentração total de 50 mg mL^{-1} (5% m/v), correspondente a 25 mg mL^{-1} de CBD e 25 mg mL^{-1} de THC, em proporção 1:1.

Todas as formulações utilizavam óleo de triglicerídeos de cadeia média (MCT) como veículo. A amostra contendo CBD foi preparada a partir da solubilização de padrão isolado de canabidiol de grau farmacêutico. Em contrapartida, o óleo contendo THC foi obtido a partir de extrato de inflorescências de *Cannabis sativa* rico em THC, posteriormente incorporado à matriz de MCT. O Mix foi preparado pela combinação das frações contendo CBD e THC na matriz oleosa.

Preparo das soluções analíticas

As soluções utilizadas na construção das curvas analíticas foram preparadas a partir das formulações originais fornecidas, empregando acetonitrila (CH_3CN) de grau analítico como diluente. As soluções estoque apresentavam concentrações nominais de 10% (m/v) para CBD, 10% (m/v) para THC e 5% (m/v) para o Mix. Para cada formulação, foram estabelecidos quatro níveis de concentração, além do branco.

As diluições foram preparadas diretamente em béqueres com capacidade de 10 mL, utilizando micropipeta monocanal de deslocamento de ar (Labmate Pro, 100 – 1000 µL). Aliquotas previamente calculadas das respectivas soluções estoque foram transferidas para os recipientes e o volume foi ajustado para 2,0 mL com acetonitrila. Para o ensaio em branco, utilizou-se MCT isento de fitocanabinoides submetido ao mesmo procedimento de preparo. Os níveis de concentração empregados para cada formulação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Concentrações nominais utilizadas na construção das curvas analíticas.

Solução Estoque	Branco	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Óleo CBD (10% m/v)	MCT	1%	4%	6%	8%
Óleo THC (10% m/v)	MCT	0,2%	0,6%	1%	2%
Óleo Mix (5% m/v)	MCT	0,5%	1%	2%	3%

As faixas de concentração utilizadas para THC e Mix foram inferiores àquela empregada para CBD. Essa diferença esteve relacionada às características das matrizes contendo THC, provenientes de extrato vegetal, que apresentavam maior contribuição de componentes da matriz para a resposta óptica. Em concentrações elevadas, as soluções apresentaram escurecimento mais pronunciado, dificultando a diferenciação entre os níveis analíticos e ocasionando saturação da resposta cromática registrada pelo sistema de aquisição digital. Assim, as faixas de trabalho foram estabelecidas de acordo com a capacidade de resposta do sistema colorimétrico.

Preparo do reagente cromogênico

A determinação colorimétrica dos fitocanabinoides foi baseada em uma adaptação da reação de Duquenois-Levine, empregando o salicilaldeído (C₇H₆O₂) como reagente cromogênico em meio ácido e posterior extração para a fase orgânica. A estratégia foi baseada no procedimento descrito por Tsujikawa *et al.*, que investigaram reagentes colorimétricos baseados em derivados de aldeídos aromáticos para a detecção de canabinoides.¹³

No procedimento utilizado neste trabalho, o salicilaldeído foi empregado como agente cromogênico, enquanto o ácido clorídrico concentrado foi utilizado para promover as condições ácidas necessárias ao desenvolvimento

da resposta colorimétrica. O clorofórmio foi empregado como fase orgânica para a extração do produto colorido.

Como as amostras foram previamente diluídas em acetonitrila nos recipientes de reação, o salicilaldeído foi empregado diretamente como reagente cromogênico. Inicialmente, foram avaliadas proporções de 1000 µL de salicilaldeído, 500 µL de HCl concentrado e 2500 µL de clorofórmio. Entretanto, verificou-se que a elevada quantidade de ácido promovia desenvolvimento excessivamente intenso da coloração, sobretudo nas maiores concentrações, resultando em soluções muito escuras e reduzindo a faixa de resposta adequada para a análise digital.

A proporção de HCl foi, portanto, reduzida de 500 para 200 µL, buscando adequar a intensidade do sinal à faixa de resposta do sistema de aquisição por smartphone. A alteração também contribuiu para reduzir a ocorrência de saturação dos canais de cor durante o processamento digital das imagens. Para simplificar a execução do procedimento e aumentar a reprodutibilidade das etapas de adição dos reagentes, foi preparado um reagente de trabalho combinado em balão volumétrico de 10,0 mL. A solução foi constituída por 6,76 mL de clorofórmio, 0,54 mL de HCl concentrado e 2,70 mL de salicilaldeído, mantendo a proporção previamente otimizada entre os componentes.

Para cada ensaio, foram adicionados 1170 µL do reagente de trabalho aos 2,0 mL da solução analítica previamente preparada em acetonitrila. Após a homogeneização, o sistema foi submetido ao período de reação previamente estabelecido antes da aquisição das imagens. A Tabela 2 distribui e explica a função de cada solução do reagente de Duquenois-Levine modificado usado para esse trabalho.

Tabela 2. Reagentes empregados na reação colorimétrica e suas respectivas funções.

Etapas	Reagente	Função
Solução 1D	Salicilaldeído	Reage com os canabinoides para gerar a cor da reação.
Solução 2	Ácido Clorídrico (HCl) 37%	Cria o meio ácido necessário para ativar e acelerar a formação da cor.
Solução 3	Clorofórmio (CHCl ₃)	Separa e concentra o composto colorido na camada inferior do frasco.

Câmara de captura fotográfica e padronização das imagens

A aquisição das imagens foi realizada em uma câmara fotográfica desenvolvida por impressão 3D, disponibilizada pelo Laboratório de Instrumentação, Automação e Miniaturização Analítica (IQ/Unb/LIAMA). O dispositivo foi empregado com o objetivo de minimizar a influência das condições de iluminação externas e proporcionar condições ópticas constantes durante todas as aquisições. A câmara apresenta estrutura interna de coloração preta e sistema de iluminação por LEDs instalado na região inferior. Sobre o sistema de iluminação encontra-se uma base de suporte destinada ao posicionamento centralizado do béquer contendo a solução analisada. A tampa superior possui um orifício central alinhado ao recipiente, permitindo o posicionamento da câmera do smartphone em uma geometria fixa em relação à amostra.

A utilização desse arranjo permitiu manter constantes a distância entre a câmera e a solução, o enquadramento e as condições de iluminação, reduzindo variações associadas à luminosidade ambiente, sombras e reflexos nas paredes da vidraria. A padronização das condições de aquisição é particularmente importante em análises colorimétricas baseadas em imagens digitais, uma vez que alterações nas condições de iluminação podem modificar os valores dos canais de cor independentemente da concentração do analito.

Figura 4. Câmara fotográfica utilizada para aquisição das imagens, apresentada nas vistas frontal, superior e interna. Imagem feita pelo autor.



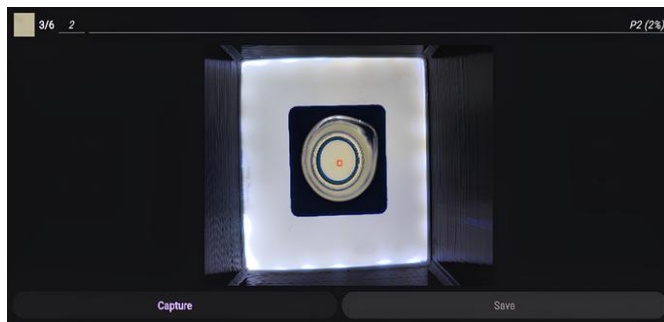
Aquisição e processamento digital das imagens utilizando o PhotoMetrix®

A conversão da resposta colorimétrica em parâmetros quantitativos foi realizada utilizando o aplicativo PhotoMetrix®, desenvolvido para análises colorimétricas e tratamento quimiométrico de imagens obtidas por dispositivos móveis. O aplicativo permite a utilização de imagens

capturadas diretamente pela câmera do dispositivo e a extração de informações relacionadas aos diferentes canais de cor, possibilitando a construção de modelos de calibração univariada e análises multivariadas.^{14,15}

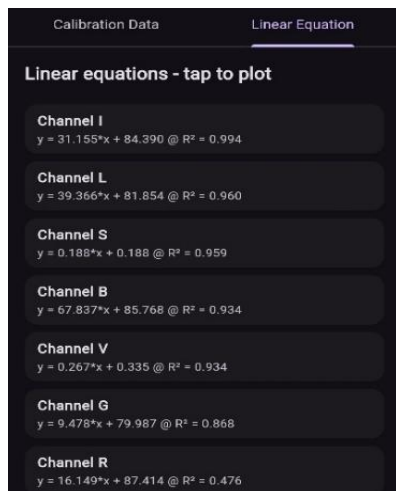
O processamento das imagens foi iniciado pela delimitação manual de uma Região de Interesse (ROI, *Region of Interest*). Para todas as imagens, foi utilizada uma região quadrada de 12×12 pixels, posicionada no centro da solução colorida. A localização central foi adotada para reduzir a influência de reflexos provenientes das paredes do recipiente, sombras e possíveis variações de iluminação nas regiões periféricas da imagem. Para cada padrão, a concentração correspondente foi informada ao aplicativo, permitindo estabelecer a relação entre a resposta cromática e a concentração nominal do analito.

Figura 5. Interface do PhotoMetrix® durante a seleção da região de interesse central da solução. Extraída do aplicativo PhotoMetrix®.



A partir da ROI selecionada, o aplicativo determina os valores médios dos pixels e disponibiliza diferentes parâmetros de cor, incluindo os canais RGB (R: vermelho; G: verde; B: azul), além de variáveis pertencentes a outros espaços de cor, como HSV (matiz, saturação e valor), além de parâmetros de luminância e escala de cinza. Os canais RGB apresentam valores discretos entre 0 e 255, permitindo que as alterações cromáticas produzidas pela reação sejam convertidas em variáveis numéricas para posterior tratamento estatístico. O aplicativo possibilita a escolha de diferentes canais (*channels train*) para a construção dos modelos de calibração. Entre as opções disponíveis encontram-se parâmetros derivados dos espaços RGB, HSV, HSL e HSI, como pode ser visto na Figura 6, a seguir.

Figura 6. Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) para cada canal univariado. Extraída do aplicativo PhotoMetrix®.



Neste trabalho, entretanto, buscou-se padronizar o tratamento dos três sistemas analisados, utilizando o parâmetro *VectorRGB* (RGB) para a construção das curvas analíticas de CBD, THC e Mix. Essa escolha permitiu manter o mesmo parâmetro de resposta para as três formulações, evitando que a comparação entre os sistemas fosse baseada em diferentes variáveis cromáticas. O PhotoMetrix® emprega correlação linear para a calibração univariada e fornece, a partir dos dados obtidos para os padrões, a equação da reta e o coeficiente de determinação (R^2), além de outros parâmetros estatísticos associados ao modelo. A relação entre a resposta cromática e a concentração foi representada pela equação da reta, descrita na Equação 1, em que y corresponde à resposta cromática obtida pelo aplicativo, x representa a concentração do analito, a corresponde ao coeficiente angular da curva e b ao coeficiente linear.^{14,15}

$$y = a \cdot x + b \quad (1)$$

A utilização de imagens digitais para a determinação de espécies químicas apresenta como principais vantagens a simplicidade da aquisição, o baixo custo da instrumentação e a possibilidade de processamento imediato dos dados, características que tornam o uso de smartphones uma alternativa promissora para métodos colorimétricos.¹⁴

Resultados e discussão

Padronização das imagens e análise visual

A utilização da câmara de captura fotográfica minimizou a influência das condições de iluminação do ambiente externo. A geometria fixa entre o orifício de captura na tampa superior, a base de suporte do béquer e o painel inferior de iluminação por LED permitiu manter constantes a distância, o enquadramento e as condições de iluminação durante o registro das imagens, possibilitando maior uniformidade e reprodutibilidade na aquisição das imagens e a comparação direta da resposta cromática entre os diferentes níveis de concentração dos analitos.

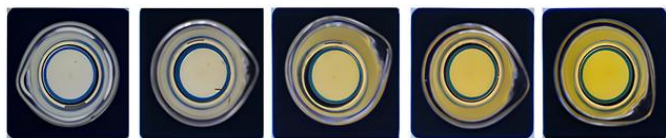
Durante os ensaios preliminares, verificou-se que a intensidade e a tonalidade da coloração apresentavam alterações após a adição do reagente cromogênico, indicando que o desenvolvimento do sinal não era instantâneo. Com o objetivo de padronizar o estágio de desenvolvimento da reação e reduzir a influência do tempo sobre a resposta analítica, foi estabelecido um intervalo de 10 minutos entre a adição do reagente e a aquisição das imagens. A escolha desse período foi baseada na observação da evolução visual da coloração, sendo adotado como tempo fixo para todas as análises subsequentes. A evolução da resposta cromática de uma solução de THC de concentração constante, registrada imediatamente após a adição do reagente e após 10 minutos de reação, é apresentada na Figura 7.

Figura 7. Solução de THC a 1% (m/v) imediatamente após a adição do reagente e após 10 minutos de reação, respectivamente. Imagem feita pelo autor.



Para as soluções contendo majoritariamente CBD, a adição do reagente de Duquenois-Levine modificado promoveu o desenvolvimento de uma coloração predominantemente amarelo-alaranjada. A intensidade da coloração apresentou aumento gradual com a concentração do analito, permitindo distinguir visualmente os diferentes níveis empregados na construção da curva de calibração. A resposta cromática foi mais evidente nos pontos de maior concentração, conforme apresentado na Figura 8.

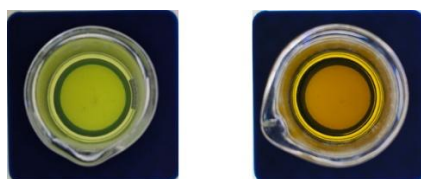
Figura 8. Soluções de CBD utilizadas na construção da curva de calibração: branco (MCT), 1%, 4%, 6% e 8% (m/v). Imagem feita pelo autor.



Para o THC, inicialmente foram avaliados pontos de concentração de até 8% (m/v), utilizando-se a mesma faixa superior inicialmente empregada para o CBD. Entretanto, as soluções de maior concentração apresentaram coloração progressivamente mais intensa e escura, dificultando a diferenciação visual entre os níveis e a obtenção de uma resposta cromática adequada para o processamento digital. Esse comportamento pode estar relacionado à natureza da amostra utilizada, uma vez que os óleos de THC fornecidos pela Abrapango foram obtidos a partir de extrato de cannabis, e não de um padrão de THC isolado. Dessa forma, outros componentes presentes na matriz podem contribuir para a resposta óptica observada.

Nas maiores concentrações, a elevada intensidade da coloração resultou em saturação dos valores registrados pelos canais RGB, reduzindo a capacidade do sistema de discriminar adequadamente as respostas entre os diferentes níveis de concentração. Em razão disso, a faixa de trabalho foi reduzida, priorizando-se os pontos que apresentaram resposta cromática mensurável e adequada ao sistema de detecção. A diferença visual entre as concentrações de 2% e 8% (m/v), utilizada para evidenciar esse comportamento, é apresentada na Figura 9.

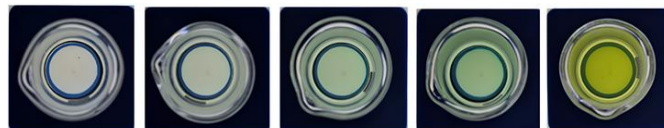
Figura 9. Comparação visual das soluções de THC nas concentrações de 2% e 8% (m/v), respectivamente. Imagem feita pelo autor.



Além da variação de intensidade, o sistema contendo THC apresentou uma alteração característica de tonalidade ao longo do tempo de reação. Imediatamente após a adição do reagente, as soluções apresentaram coloração predominantemente azulada. Após 10 minutos, verificou-se uma transição gradual para tonalidades azul-esverdeadas e, nos pontos de maior concentração, para tonalidades predominantemente verdes. Esse comportamento evidencia a importância da padronização do intervalo entre a adição do

reagente e a aquisição da imagem, uma vez que a resposta cromática é influenciada tanto pela concentração do analito quanto pelo desenvolvimento da reação ao longo do tempo. As soluções utilizadas na construção da curva analítica de THC são apresentadas na Figura 10.

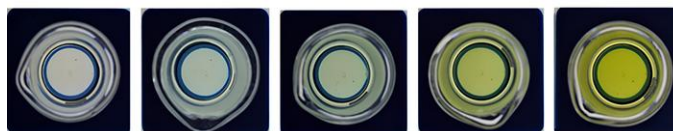
Figura 10. Soluções de THC utilizadas na construção da curva de calibração: branco (MCT), 0,2%, 0,6%, 1% e 2% (m/v). Imagem feita pelo autor.



Para as soluções preparadas a partir do Mix de CBD/THC, a faixa de concentração também foi limitada a 3% (m/v). Assim como observado para o THC, as maiores concentrações apresentaram intensificação excessiva da coloração, atribuída à presença de THC proveniente do extrato, comprometendo a diferenciação entre os pontos e a resposta adequada do sistema de aquisição. Dessa forma, foi estabelecido o limite de 3% (m/v) para o Mix, de modo a manter os ensaios em uma faixa de resposta cromática adequada para o processamento digital das imagens.

O comportamento do Mix apresentou tendência semelhante à observada para o THC. Após a adição do reagente, as soluções desenvolveram inicialmente tonalidades azuladas, que evoluíram, ao longo dos 10 minutos de reação, para tonalidades verde-amareladas. Paralelamente, verificou-se aumento da intensidade da coloração com a elevação da concentração, indicando uma resposta visual dependente da concentração dos componentes presentes no sistema. As soluções empregadas na construção da curva analítica do Mix são apresentadas na Figura 11.

Figura 11. Soluções de Mix (CBD/THC) utilizadas na construção da curva de calibração: branco (MCT), 0,5%, 1%, 2% e 3% (m/v). Imagem feita pelo autor.

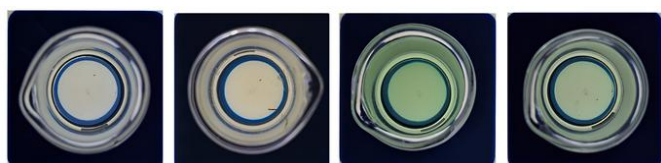


A comparação dos diferentes sistemas evidencia a capacidade do reagente de Duquenois-Levine modificado de produzir respostas cromáticas distintas em função da composição das soluções. Essa diferenciação visual é particularmente relevante para a aplicação da colorimetria

digital, pois permite associar as alterações cromáticas decorrentes da reação química a parâmetros numéricos obtidos a partir das imagens digitais.

Para evidenciar essa diferença de resposta entre os sistemas, foi realizada uma comparação visual entre o branco e soluções de 1% (m/v) de CBD, THC e Mix, todas submetidas às mesmas condições de reação e aquisição, como apresentado na Figura 12.

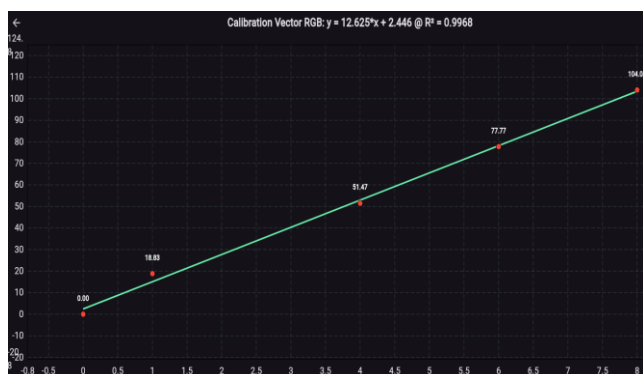
Figura 12. Comparação visual do branco e das soluções de CBD, THC e Mix, respectivamente, na concentração de 1% (m/v). Imagem feita pelo autor.



Curva analítica

A partir das imagens obtidas sob condições padronizadas, os valores de resposta cromática foram processados no PhotoMetrix® utilizando o parâmetro *VectorRGB*, conforme estabelecido para os três sistemas analisados. Para o CBD, foi construída uma curva analítica utilizando o branco e as soluções nas concentrações de 1%, 4%, 6% e 8% (m/v). A relação entre a concentração de CBD e a resposta obtida pelo parâmetro *VectorRGB* apresentou comportamento linear na faixa investigada, resultando em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,997. Esse valor indica elevada correlação entre a concentração dos padrões e a resposta cromática do sistema, evidenciando a capacidade do método de acompanhar as variações de concentração de CBD por meio da análise digital das imagens.

Figura 13. Curva analítica obtida para CBD utilizando o parâmetro *VectorRGB*, com concentrações de 1%, 4%, 6% e 8% (m/v). Extraída do aplicativo PhotoMetrix®.

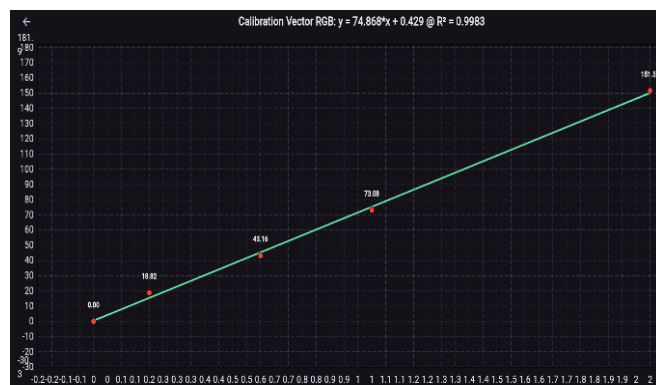


Esse comportamento está de acordo com a observação visual apresentada anteriormente, na qual o aumento da concentração de CBD foi acompanhado pela intensificação da coloração amarelo-alaranjada. A resposta quantitativa obtida pelo *VectorRGB* demonstra, portanto, que as alterações de intensidade cromática podem ser convertidas em uma variável numérica com comportamento aproximadamente linear na faixa estudada.

A curva analítica para determinação de THC foi construída utilizando as soluções padrão nas concentrações de 0,2%, 0,6%, 1,0% e 2,0% (m/v), além do branco, empregando o parâmetro *VectorRGB* como resposta analítica. A faixa de concentração foi definida a partir dos ensaios preliminares, nos quais concentrações superiores apresentaram elevada intensidade de coloração e saturação da resposta dos canais RGB.

Na faixa selecionada, a resposta cromática obtida pelo parâmetro *VectorRGB* apresentou comportamento linear em função da concentração de THC, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9983, demonstrando forte correlação entre as variáveis, como apresentado na Figura 14.

Figura 14. Curva analítica de THC obtida pelo parâmetro *VectorRGB* utilizando o PhotoMetrix®, na faixa de concentração de 0,2–2,0% (m/v). Extraída do aplicativo PhotoMetrix®.

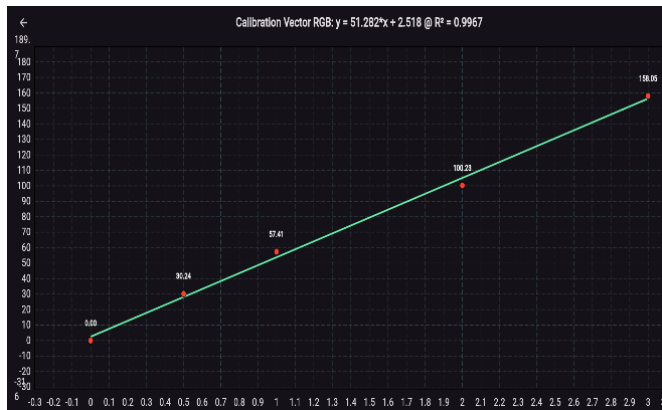


Observou-se um aumento progressivo da resposta cromática com a concentração, com os valores de *VectorRGB* variando de 18,82 para 151,59 entre as soluções de 0,2% e 2,0% (m/v), respectivamente. Esse aumento é consistente com a intensificação da coloração observada visualmente nas soluções de THC após o período padronizado de 10 minutos de reação.

A curva analítica correspondente ao Mix de CBD/THC foi construída utilizando soluções nas concentrações de 0,5%, 1,0%, 2,0% e 3,0% (m/v), além do branco, empregando o parâmetro *VectorRGB* como resposta analítica. Assim como observado para o THC, a faixa de concentração foi limitada em função da elevada intensidade cromática apresentada pelas soluções de maior concentração. Essa característica está relacionada à presença de THC proveniente do extrato utilizado na preparação do Mix, que contribuiu para o aumento da intensidade da resposta visual. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) de 0,9967, indica elevada correlação entre os valores de concentração e a resposta cromática do sistema.

A resposta *VectorRGB* apresentou aumento progressivo ao longo da faixa estudada, passando de 30,24 para 158,05 entre as soluções de 0,5% e 3,0% (m/v), respectivamente. Esse comportamento acompanha a intensificação visual da coloração observada nas soluções do Mix e demonstra que, mesmo em uma matriz contendo simultaneamente CBD e THC provenientes de extrato, foi possível obter uma resposta cromática com comportamento linear adequado dentro da faixa de trabalho selecionada.

Figura 15. Curva analítica do Mix CBD/THC obtida pelo parâmetro *VectorRGB* utilizando o PhotoMetrix®, na faixa de concentração de 0,5–3,0% (m/v). Extraída do aplicativo PhotoMetrix®.



A avaliação conjunta das curvas analíticas obtidas para CBD, THC e Mix (CBD/THC) demonstrou comportamento linear consistente para os três sistemas quando empregada a resposta *VectorRGB*. Os modelos de regressão e os respectivos coeficientes de determinação estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de determinação (R^2) obtidos para os sistemas contendo CBD, THC e Mix CBD/THC utilizando o parâmetro *VectorRGB*.

Sistema	Concentração (m/v)	R^2
CBD	1 – 8%	0,9968
THC	0,2 – 2%	0,9983
Mix	0,5 – 3%	0,9967

De maneira geral, os resultados demonstram que o uso do *VectorRGB* como parâmetro de resposta permitiu obter curvas analíticas com elevada correlação linear para os três sistemas estudados. A obtenção de R^2 de 0,9968, 0,9983 e 0,9967 para CBD, THC e Mix, respectivamente, demonstra a consistência da resposta cromática dentro das faixas selecionadas. Ao mesmo tempo, a necessidade de restringir as concentrações máximas para THC e Mix evidencia uma característica importante do sistema de detecção por imagem: a faixa de trabalho deve ser estabelecida de acordo com a capacidade de resposta do método, evitando regiões de saturação que reduzam a capacidade de diferenciação entre as concentrações.

Assim, os resultados obtidos nesta etapa fornecem uma base favorável para a aplicação das curvas na estimativa de concentrações em amostras desconhecidas, etapa subsequente do estudo. Contudo, a elevada correlação observada não é, isoladamente, suficiente para estabelecer a validade do método, sendo necessária a avaliação de outros parâmetros de desempenho analítico, como precisão, exatidão, limites de detecção e quantificação, seletividade e recuperação, conforme aplicável ao método proposto.

Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da utilização de colorimetria digital por *smartphone*, associada ao aplicativo PhotoMetrix®, para o monitoramento da resposta cromática de sistemas contendo CBD, THC e uma mistura de ambos. A utilização de uma câmara de captura fotográfica com geometria fixa e iluminação controlada permitiu padronizar as condições de aquisição das imagens, reduzindo a influência de variações externas de luminosidade, sombras e reflexos e proporcionando maior uniformidade entre os registros.

A padronização do tempo de reação também se mostrou fundamental para a obtenção de respostas comparáveis. A definição de um intervalo de 10 minutos após a adição do reagente de Duquenois-Levine modificado

permitiu minimizar as variações decorrentes do desenvolvimento da coloração ao longo do tempo e estabelecer uma condição fixa para o processamento das imagens. Os ensaios demonstraram ainda que o sistema apresentou respostas visuais distintas para CBD, THC e Mix.

O CBD apresentou predominantemente coloração amarelo-alaranjada, enquanto o THC desenvolveu inicialmente tonalidades azuladas, evoluindo para tonalidades esverdeadas após o período de reação. O Mix apresentou comportamento intermediário, com evolução da coloração azulada para tons verde-amarelados. Essas diferenças demonstram o potencial da reação como fonte de sinal para a aplicação da colorimetria digital.

A utilização do parâmetro *VectorRGB* possibilitou a construção de curvas analíticas com elevada correlação linear nas faixas de concentração estudadas. Foram obtidos coeficientes de determinação (R^2) de 0,9968 para CBD, 0,9983 para THC e 0,9967 para o Mix CBD/THC, indicando comportamento consistente da resposta cromática em relação à concentração nominal dos sistemas avaliados. Entretanto, a elevada intensidade de coloração observada nas maiores concentrações de THC e Mix evidenciou a necessidade de estabelecer faixas de trabalho compatíveis com a capacidade de detecção do sistema RGB, evitando regiões de saturação da resposta.

De maneira geral, os resultados obtidos nesta etapa inicial sustentam o potencial da abordagem proposta como uma estratégia complementar para análises colorimétricas de derivados de cannabis, especialmente em situações nas quais métodos instrumentais convencionais apresentam maior custo, complexidade ou menor disponibilidade. Contudo, os resultados obtidos até o momento representam uma etapa inicial do desenvolvimento do método, sendo necessárias avaliações adicionais de desempenho analítico e sua comparação com técnicas cromatográficas de referência.

Como próxima etapa da pesquisa, destaca-se o desenvolvimento de uma estratégia capaz de diferenciar quantitativamente sistemas nos quais a proporção de THC seja superior à de CBD daqueles em que predomine o CBD. Essa diferenciação é particularmente relevante para a análise de amostras provenientes de extratos e formulações contendo múltiplos fitocanabinoides, nas quais a resposta cromática pode resultar da contribuição simultânea dos diferentes componentes. Para isso, pretende-se investigar a utilização conjunta dos diferentes parâmetros de cor fornecidos pelo PhotoMetrix®, bem como ferramentas de calibração e

tratamento quimiométrico, buscando explorar as diferenças de resposta cromática entre os canabinoides e possibilitar sua discriminação e quantificação simultânea.

Assim, espera-se que o aprimoramento do sistema permita avançar de uma análise baseada na resposta cromática global para uma abordagem capaz de fornecer informações mais específicas sobre a composição de amostras de cannabis, contribuindo para o desenvolvimento de uma ferramenta analítica mais simples, acessível e aplicável ao controle de qualidade de produtos contendo fitocanabinoides

Contribuições por Autor

A escrita deste trabalho, a realização experimental e a inclusão de algumas observações e adaptações para trabalhos futuros são de Gabriel Castro e Silva e Luana Maira Curvello Wutke.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo incentivo e espaço fornecidos. Ao Laboratório de Instrumentação, Automação e Miniaturização Analítica (LIAMA) pelo suporte técnico e estrutural, e à Associação Brasileira do Pito do Pango (Abrapango) pela parceria e disponibilização das amostras utilizadas neste estudo. À minha orientadora, pela oportunidade de pesquisa e ao grupo PET Química/IQ/UnB/MEC pela oportunidade de publicar meu trabalho.

Notas e referências

- 1 R. Mechoulam and L. Hanuš, Cannabidiol: an overview of some chemical and pharmacological aspects. Part I: chemical aspects, *Chemistry and Physics of Lipids*, 2002, **121**, 35–43.
- 2 AW Zuardi, História da cannabis como medicamento: uma revisão, *Rev. Bras. Psiquiatria.*, 2006, **28**, 153–157.
- 3 M. Araújo, MB Almeida e LLN Araújo, Mecanismo de ação dos canabinoides: visão geral, *BRJP*, DOI:10.5935/2595-0118.20230028.
- 4 O. Devinsky, JH Cross, L. Laux, E. Marsh, I. Miller, R. Nabbout, IE Scheffer, EA Thiele e S. Wright, Ensaio de

canabidiol para convulsões resistentes a medicamentos na síndrome de Dravet, *N Engl J Med*, 2017, **376**, 2011–2020.

- 5 I. Nacional, RESOLUÇÃO DA DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 327, DE 9 DE DEZEMBRO DE 2019 - DOU - Imprensa Nacional, <https://www.in.gov.br/web/dou>, (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 6 I. Nacional, RESOLUÇÃO RDC Nº 660, DE 30 DE Março DE 2022 - DOU - Imprensa Nacional, <https://www.in.gov.br/web/dou>, (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 7 STJ valida cultivo medicinal da cannabis por empresas, <https://www.stj.jus.br/sites/porta/paginas/Comunicacao/Noticias/2024/14112024-STJ-valida-cultivo-medicinal-da-cannabis-por-empresas-e-da-prazo-para-regulamentacao.aspx> (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 8 Precedentes cíveis e penais do STJ sobre a cannabis medicinal, <https://www.stj.jus.br/sites/porta/paginas/comunicacao/noticias/2026/16082026-os-precedentes-civeis-e-penais-do-stj-sobre-o-uso-medicinal-da-cannabis.aspx> (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 9 Resolução da Diretoria Colegiada Anvisa nº 1.014, de 30/01/2026, https://anvisa.gov.br/legis/comunicacao/acao/abrirTextoAto?acao=abrirTextoAto&tipo=RDC&numeroAto=00001014&seqAto=000&valorAno=2026&orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&codTipo=&desItem=&desItemFim=&cod_menu=9434&cod_modulo=310&pesquisa=true, (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 10 Resolução da Diretoria Colegiada Anvisa nº 1.015, de 02/02/2026, https://anvisa.gov.br/legis/comunicacao/acao/abrirTextoAto?acao=abrirTextoAto&tipo=RDC&numeroAto=00001015&seqAto=000&valorAno=2026&orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&nomeTitulo=codigos&desItem=&desItemFim=&cod_modulo=310&cod_menu=8542, (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 11 V. Tavares, UnB Notícias - Pesquisa em Cannabis Medicinal no Instituto de Química da UnB, <https://noticias.unb.br/artigos-main/8347-pesquisa-em-cannabis-medicinal-no-instituto-de-quimica-da-unb-avancos-desafios-e-perspectivas> (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 12 Abrapango, <https://www.abrapango.org/>, (acessado em 16 de agosto de 2026).
- 13 K. Tsujikawa, Y. Okada, H. Segawa, T. Yamamuro, K. Kuwayama, T. Kanamori e Yuko. T. Iwata, Desenvolvimento de um novo reagente de teste de cor específico para Δ^9 -THC, *Forensic Toxicol*, 2025, **43**, 318–332.
- 14 GA Helfer, VS Magnus, FC Böck, A. Teichmann, MF Ferrão e ABD Costa, PhotoMetrix: Uma aplicação para calibração univariada e análise de componentes principais usando colorimetria em dispositivos móveis, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, DOI:10.5935/0103-5053.20160182.
- 15 FC Böck, GA Helfer, AB Da Costa, MB Dessuy e MF Ferrão, PhotoMetrix e análise colorimétrica de imagens usando smartphones, *Journal of Chemometrics*, 2020, **34**.

Síntese e dinâmica molecular de tinta ferrogálica

DOI: 10.5281/zenodo.22311141

Anthony Monteiro Lima^{a*}

Iron-gall ink was widely used, particularly in manuscripts, between the 4th and 20th centuries. The cleavage reaction caused by an excess of Fe^{2+} ions in the ink, which degrades the substrate of the work, necessitates research into and the development of less acidic ink alternatives for restoration purposes. This study aimed to investigate the structure of iron-gall ink both empirically and through metadynamics simulations, with the goal of preventing further deterioration of the works undergoing restoration by closely examining the ink's production.

A tinta ferrogálica foi vastamente empregada, principalmente em manuscritos, entre os séculos IV e XX. A reação de clivagem gerada pelo excesso de Fe^{2+} na tinta, degrada o suporte da obra em que é utilizada, gerando uma necessidade de estudo e atuação sobre a possibilidade de alternativas menos ácidas para restauração de obras. Este trabalho teve como objetivo investigar a estrutura da tinta ferrogálica, tanto empiricamente quanto através de simulações de metadinâmica, no intuito de evitar maiores desgastes das obras a serem restauradas, ao se observar detalhadamente a produção da tinta.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB). Laboratório de Dinâmica e Reatividade Molecular - LDRM.

*E-mail: anthonymonteiro2877@gmail.com

Palavras-chave: Ferrogálica, Restauração, Dinâmica molecular, Síntese.

Recebido em 15 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 agosto de 2026,

Publicado em xx de mês de 20xx.

Introdução

Tintas metalogálicas são produzidas a partir de taninos (geralmente provenientes de galhas, o que explica o nome), goma arábica e um sal de metal de transição. Obtém-se, portanto, tinta ferrogálica (conhecida como IGI, do inglês *iron-gall ink*) ao se utilizar um sal de ferro, sendo o mais comum o sulfato ferroso. Esta tinta foi amplamente utilizada entre os séculos IV e XX, em sua maior parte para a escrita, mas também aparecendo em diversas pinturas e desenhos. A reação entre íon ferro e compostos obtidos de galhas (como os taninos) possivelmente é conhecida desde a Roma antiga, em que era utilizada como teste químico para adulteração de *verdigris*, substância usada na época como bálsamo, com sulfatos ferrosos mais baratos. Dependendo da origem, as receitas poderiam sofrer mudanças com a adição de outros compostos, como vinagre e vinho.^{1,2}

A tinta é formada pela fragmentação do ácido tânico em ácido gálico, que complexa o Fe^{2+} do sulfato ferroso tornando-o Fe^{3+} . Um problema muito comum em documentos com tinta ferrogálica é a degradação deles por catálise ácida, pois a presença de Fe^{2+} livre desencadeia reações de clivagem na base de estruturação da obra. Se a base for papel, por

exemplo, ocorrem reações de hidrólise ferro-catalisadas nas cadeias celulósicas. Sabe-se que estes processos de degradação se iniciam pela presença de Fe^{2+} em excesso, e assim perde-se o conteúdo da obra ao gerar halos em torno da escrita, migrar a tinta para o verso da página e páginas vizinhas e fragmentação parcial ou total do suporte da obra.^{3,4}

Tendo isso em vista, faz-se importante um estudo da estequiometria de síntese da tinta, no intuito de restaurar as obras que tiveram conteúdo prejudicado com tinta ferrogálica de caráter ácido inferior às tintas medievais originais, assim preservando a obra ao evitar a degradação do seu suporte. Este trabalho possui, por conseguinte, o objetivo de investigar os métodos de produção de tinta ferrogálica, tanto empiricamente quanto por meio de dinâmica molecular, para se observar em detalhes o processo de síntese de IGI e determinar a menos agressiva, portanto, mais adequada para restauração de obras.

Metodologia

Para a síntese da tinta ferrogálica, foram utilizados 5 mL de etanol 95%, 2 g de goma arábica 5,5 g de ácido tânico e 1 g de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. A síntese foi realizada por meio de medição, pesagem e mistura simples com bastão de

vidro dos reagentes, aerando a solução por alguns minutos até que fosse do tom marrom avermelhado do ácido tânico para um mais escuro, próximo à preto. A solução descansou por 12 dias, sendo observada ao decorrer deste período. Obteve-se 50 mL de tinta ferrogálica neste método.^{3,5}

Para a dinâmica molecular, foram aplicadas simulações de metadinâmica⁶ via ensemble NVT com termostato de Nosè-Hoover⁷⁻⁹, para controle da temperatura em 298,16 K. Considerou-se uma janela de 15 ps dividida em 30 mil passos de 0,5 fs cada. O método utilizado foi o xTB^{10,11}, na intenção de verificar a interação do Fe²⁺ com o ácido gálico e outros compostos, utilizando o pacote Orca 6¹² para realização de todos os cálculos.

Resultados e discussão

Em sínteses na literatura, geralmente se utiliza sulfato ferroso aquoso como insumo para a produção de tinta ferrogálica^{3,5}, porém, o sulfato ferroso amoniacal era a única opção disponível. Ele se mostrou tão eficiente quanto o aquoso, tendo em vista que a amônia logo se evaporou durante o processo. Outro fator que acabou sendo modificado durante a pesquisa é que inicialmente a intenção era de se fazer dinâmica molecular *ab initio*. Houveram diversas tentativas, mas o Orca não conseguia concluir os cálculos. Passou-se, portanto, a realizar a simulação de metadinâmica então por um método semiempírico, o xTB. Mesmo assim, os resultados se mostraram bastante satisfatórios.

A dinâmica molecular chegou em uma estrutura bem distinta do que é encontrado na literatura. A estrutura mais comumente encontrada é a de Ponce e colaboradores, proposta em 2016.¹³ Mais recentemente, porém, os autores Lerf e Wagner comprovaram que complexos de Fe³⁺-galato, formados por ligação no grupo carboxilato, não poderiam ocorrer no pH encontrado na síntese da tinta, entre 2 e 3.¹⁴ Foram feitos diversos cálculos na tentativa de estruturação de um complexo Fe³⁺-galato. Contudo, todos os cálculos geraram estruturas inviáveis. Sendo assim, o resultado encontrado na dinâmica molecular é uma estrutura de um complexo de Fe²⁺. O achado dos autores Lerf e Wagner¹⁴ corrobora com o resultado encontrado pela dinâmica, juntamente com o fato do produto encontrado obter a energia livre de Gibbs mais baixa na simulação da reação entre Fe[H₂O₆]²⁺ e ácido gálico. É possível observar este resultado na Superfície de Energia Livre (SEL) obtida para esta reação, que mostra a região de energia livre mais baixa justamente quando as distâncias entre os átomos 1-2 e 4-9 são as que o resultado alcançado para a estrutura possui.

Figura 1. Estrutura da tinta ferrogálica proposta por Ponce e colaboradores. Extraída da referência 13.

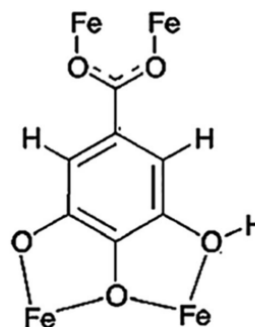


Figura 2. Estrutura da tinta ferrogálica (complexo Fe(II)-IGI) obtida por dinâmica molecular através da simulação de reação entre Fe[H₂O₆]²⁺ e ácido gálico.

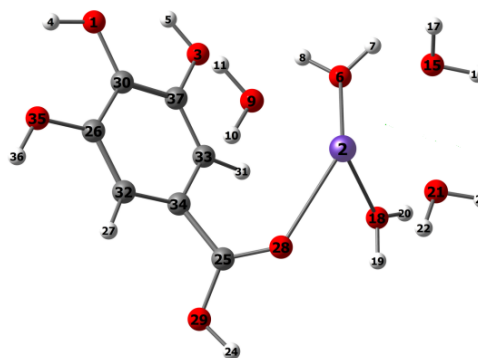
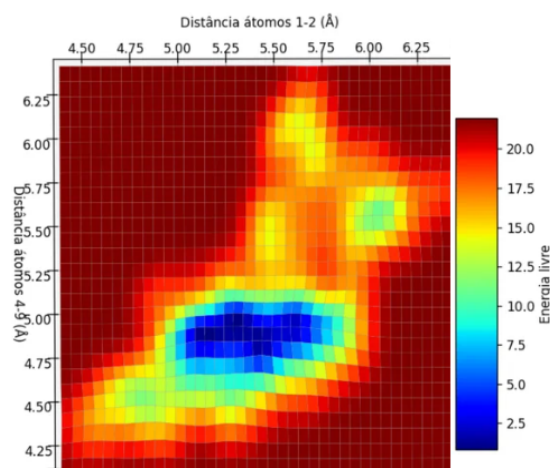


Figura 3. Superfície de Energia Livre (SEL) da reação entre Fe[H₂O₆]²⁺ e ácido gálico, em que se observa menor energia livre de Gibbs quando a molécula atinge a configuração mostrada na Figura 2.



Outro fator interessante a se pontuar a energia de ativação da reação entre $\text{Fe}[\text{H}_2\text{O}_6]^{2+}$ e ácido gálico, a qual é dada por 2,702 kJ/mol, e a do produto encontrado é de aproximadamente 2,5 kJ/mol, indicando alta proximidade energética. O complexo é relativamente lábil e levanta a possibilidade de que a oxidação de Fe^{2+} a Fe^{3+} não ocorra durante a complexação, como sugerido nos trabalhos citados^{3, 5, 13}, e sim em um momento posterior.

A coloração da tinta sem a oxidação durante a complexação levanta duas possibilidades: a água como ligante de campo fraco e spin alto, o que possibilitaria a transferência de carga e geraria a cor preta no complexo; ou a formação de radicais livres, que também justificaria a cor. Colocam-se essas possibilidades em pauta também ao analisar a síntese realizada da tinta, pois o aspecto colorimétrico foi pouco alterado durante os 12 dias de observação da tinta, mostrando que a oxigenação e, portanto, oxidação do composto pouco influenciou na cor da tinta. Estes resultados podem ser observados nas imagens abaixo:

Figuras 4 e 5. Produtos da síntese da IGI, sendo ambos testes realizados 24h após a síntese, no dia 06/06/2026.

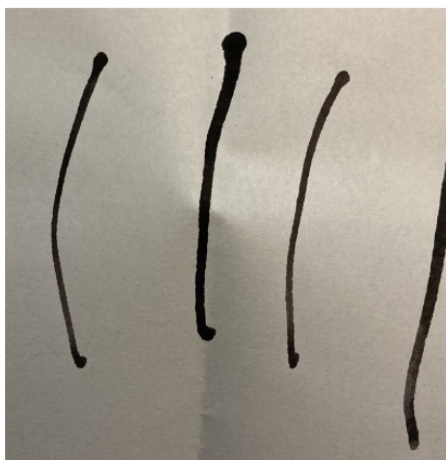
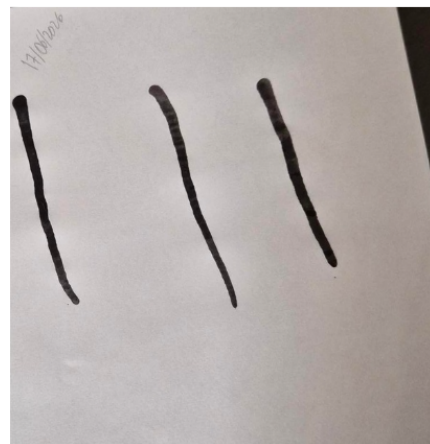


Figura 6. Produto da síntese da IGI, sendo este teste realizado 12 dias após a síntese, no dia 17/06/2026.



Conclusões

Diante de tudo apresentado, é possível concluir que há muito a ser descoberto sobre a tinta ferrogálica e seus mecanismos, e é do interesse de diversas áreas dentro da química e da museologia fazê-lo. Para seguir com o objetivo de obter uma síntese de ferrogálica eficiente para a restauração de obras que a utilizam, é necessário maior aprofundamento nas possibilidades de estrutura molecular da tinta. Além disso, o funcionamento de sua coloração também deve ser estudado na intenção de resolver problemas gerados pela estequiometria não-balanceada na síntese da tinta e manter a coloração gerada pelas receitas originais, tendo em vista a manutenção menos invasiva possível de documentos históricos. Os próximos passos consistem em averiguar a estrutura obtida e verificar sua veracidade, além de obter os meios de produzi-la com características ácidas menores.

Contribuições por Autor

O artigo, a experimentação e a revisão de referências são de Anthony Monteiro.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Davi Aleksandro Cardoso Ferreira, pela orientação e apoio durante todo o trabalho. Ao Laboratório de Dinâmica e Reatividade Molecular pela disponibilização de estrutura e ferramentas de pesquisa. Ao Grupo

PET-Química/IQ/UnB/MEC, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio. Ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química da Universidade de Brasília (IQ/UnB) pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

1. M. Aceto and E. Calà, Analytical evidences of the use of iron-gall ink as a pigment on miniature paintings, *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2017, **187**, 1–8.
2. V. Corregidor, R. Viegas, L. M. Ferreira and L. C. Alves, Study of iron gall inks, ingredients and paper composition using non-destructive techniques, *Heritage*, 2019, **2**, 2691–2703.
3. R. J. Díaz Hidalgo, R. Córdoba, P. Nabais, V. Silva, M. J. Melo, F. Pina, N. Teixeira e V. Freitas, New insights into iron-gall inks through the use of historically accurate reconstructions, *Herit. Sci.*, 2018, **6**, 63.
4. J. R. de Oliveira Campos e R. E. de Souza, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, 2021.
5. S. Caterino, N. Pajer and C. Crestini, Iron-galls inks: preparation, structure and characterisation, *Microchem. J.*, 2023, **185**, 108258.
6. A. Laio and M. Parrinello, Escaping free-energy minima, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2002, **99**, 12562–12566.
7. D. J. Evans and B. L. Holian, The Nose–Hoover thermostat, *J. Chem. Phys.*, 1985, **83**, 4069–4074.
8. W. G. Hoover, Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions, *Phys. Rev. A Gen. Phys.*, 1985, **31**, 1695–1697.
9. S. Nosé, A unified formulation of the constant temperature molecular dynamics methods, *J. Chem. Phys.*, 1984, **81**, 511–519.
10. C. Bannwarth, S. Ehlert and S. Grimme, GFN2-xTB—an accurate and broadly parametrized self-consistent tight-binding quantum chemical method with multipole electrostatics and density-dependent dispersion contributions, *J. Chem. Theory Comput.*, 2019, **15**, 1652–1671.
11. C. Bannwarth, E. Caldeweyher, S. Ehlert, A. Hansen, P. Pracht, J. Seibert, S. Spicher and S. Grimme, Extended tight-binding quantum chemistry methods, *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci.*, 2021, **11**, 1493.
12. F. Neese, Software update: The ORCA program system—version 6.0, *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci.*, 2025, **15**, 70019.
13. A. Ponce, L. B. Brosto, S. K. Gibbons, P. Zavalij, C. Viragh, J. Hooper, K. J. Gaskell and B. Eichhorn, Elucidation of the Fe(III) Gallate Structure in Historical Irongall Inks, *Anal. Chem.*, 2016, **88**, 5152–5158.
14. A. Wagner, Model compounds of iron-gall inks—a Mössbauer study, *Hyperfine Interact.*, 2026, **237**, 36.

Degradação da vitamina C em sucos de frutas: uma análise crítica dos avanços científicos

DOI: 10.5281/zenodo.22310822

Rahídes Farias Lima^{a*}

Vitamin C is one of the least stable nutrients in fruit juices, and its retention is widely used as an indicator of overall product quality. This critical review takes as its starting point the 2006 survey by Teixeira and Monteiro and compares its conclusions with the literature published between 2018 and 2026, organising the discussion around four axes: temperature and storage, processing, oxygen and packaging, and remaining gaps. The central conclusions of the source article remain supported: storage conditions are still the main determinant of losses, and oxygen still amplifies the effects of processing. Progress has been concentrated in non-linear kinetic modelling, in the consolidation of non-thermal technologies and in active packaging. However, the same methodological limitations identified in 2006 persist, most notably the lack of experimental standardisation needed to enable direct comparisons between studies.

A vitamina C é um dos nutrientes mais instáveis dos sucos de frutas e sua retenção é amplamente empregada como indicador da qualidade global do produto. Esta resenha crítica toma como ponto de partida a revisão publicada em 2006 por Teixeira e Monteiro e confronta suas conclusões com a literatura produzida entre 2018 e 2026, organizando a discussão em quatro eixos: temperatura e armazenamento, processamento, oxigênio e embalagem, e lacunas remanescentes. As conclusões centrais do artigo-base permanecem sustentadas: as condições de estocagem seguem sendo o principal determinante das perdas e o oxigênio continua amplificando os efeitos do processamento. Os avanços concentram-se na modelagem cinética não linear, na consolidação das tecnologias não térmicas e nas embalagens ativas. Persistem, contudo, as mesmas limitações metodológicas apontadas em 2006, sobretudo a ausência de padronização experimental que permita comparação direta entre estudos.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: rahides@gmail.com

Palavras-chave: Vitamina C; degradação; suco de fruta; processamento não térmico; embalagem ativa.

Recebido em 16 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 de agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

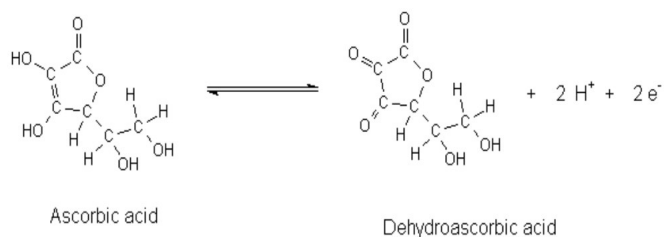
Introdução

A vitamina C, ou ácido L-ascórbico, é um dos micronutrientes mais lábeis presentes nos alimentos e, precisamente por isso, sua concentração vem sendo empregada como marcador da qualidade nutricional e sensorial dos sucos de frutas. Como o organismo humano não sintetiza essa vitamina, sua obtenção depende integralmente da dieta, e os sucos ocupam posição de destaque entre as fontes disponíveis ao consumidor. A mesma reatividade química que confere à molécula seu papel antioxidante, contudo, torna-a vulnerável à oxidação durante o processamento e ao longo da vida de prateleira.

O Brasil figura entre os maiores produtores mundiais de suco de fruta, com destaque para o suco de laranja, e a produção de polpas e sucos processados depende da sazonalidade e da perecibilidade das frutas *in natura*.¹ Nesse contexto, compreender os fatores que governam a perda de ácido ascórbico tem implicações tecnológicas e nutricionais diretas, pois a degradação da vitamina acarreta não apenas a redução do valor nutricional, mas também pode contribuir para o escurecimento não enzimático e para alterações no sabor. Na forma reduzida, o ácido L-ascórbico oxida-se de modo

reversível a ácido L-dehidroascórbico, também biologicamente ativo, como mostrado na Figura 1. É essa mesma facilidade de oxidação que o converte em marcador sensível das condições de processamento e de estocagem.¹

Figura 1. Estrutura química da vitamina C: equilíbrio redox entre o ácido ascórbico e o ácido dehidroascórbico. Extraído da referência 1.



Foi com esse propósito que Teixeira e Monteiro publicaram, em 2006, na revista *Alimentos e Nutrição*, uma revisão sobre os principais fatores que contribuem para a degradação da vitamina C em suco de fruta, com ênfase no suco de laranja.¹ As autoras organizaram a literatura então disponível em torno de seis fatores: tipo de processamento, condições de estocagem, tipo de embalagem, presença de

oxigênio, luz e enzimas. Com os fatores selecionados foi possível concluir que as condições de estocagem respondem pelas maiores perdas, que as condições de processamento, isoladamente, não produzem perdas drásticas e que os relatos sobre o efeito da luz permaneciam contraditórios. O trabalho consolidou, em língua portuguesa, um conjunto disperso de estudos e segue sendo referência frequente na literatura brasileira sobre estabilidade de vitamina C.

Passadas quase duas décadas, o campo incorporou novas tecnologias de conservação, novos materiais de embalagem e abordagens matemáticas mais sofisticadas para descrever a cinética de degradação. Esta resenha crítica tem por objetivo confrontar as conclusões de Teixeira e Monteiro com a produção científica recente, orientando-se pela seguinte questão norteadora: as conclusões apresentadas por essas autoras sobre os principais fatores responsáveis pela degradação da vitamina C em sucos de frutas continuam sendo sustentadas pela literatura científica atual.¹ A discussão organiza-se em quatro eixos, sendo eles, temperatura e armazenamento, processamento, oxigênio e embalagem, e avanços e lacunas, que buscam distinguir, em cada um, o que permanece válido, o que foi ampliado e o que precisou ser revisto.

Metodologia

Este trabalho consiste em uma resenha crítica de caráter bibliográfico, tendo como artigo-base a revisão de Teixeira e Monteiro (2006). Para a atualização do tema, foram consultados artigos científicos e revisões disponíveis em bases e portais acadêmicos, com ênfase em PubMed, SciELO e páginas oficiais de periódicos, priorizando publicações entre 2020 e 2026 relacionadas à estabilidade da vitamina C em sucos de frutas.

Foram utilizados como descritores, em português e inglês, combinações equivalentes a “vitamina C”, “ácido ascórbico”, “sucos de frutas”, “armazenamento”, “processamento não térmico”, “alta pressão”, “campo elétrico pulsado”, “plasma frio”, “oxigênio” e “embalagem ativa”. Foram priorizados estudos revisados por pares que apresentassem resultados diretamente comparáveis aos eixos do artigo-base. A análise foi organizada em quatro dimensões: temperatura e armazenamento; processamento; oxigênio e embalagem; e avanços e lacunas.

As publicações foram confrontadas com o artigo-base segundo três categorias definidas previamente. Considerou-se sustentada a conclusão de 2006 reproduzida pela literatura recente sem alteração de sentido nem da hierarquia entre

fatores, ainda que acompanhada de evidência empírica mais detalhada. Considerou-se ampliada a conclusão que permanece válida em seu enunciado, mas à qual a literatura posterior acrescentou dimensão ausente do artigo-base, sendo o parâmetro cinético, descrição de mecanismo, modelo matemático ou tecnologia então inexistente. Tais fatores estenderam seu alcance sem invertê-lo; nos eixos não tratados em 2006, a categoria indica acréscimo de dimensão nova ao debate, e não revisão de enunciado. Considerou-se revista a conclusão contrariada, restringida ou condicionada por evidência posterior, de modo a exigir reformulação, ainda que parcial, da afirmação original. A classificação atribuída a cada eixo é apresentada na Tabela 1.

Resultados e discussão

Temperatura e condições de armazenamento

Teixeira e Monteiro afirmaram que, entre todos os fatores analisados, as condições de estocagem respondem pelas maiores perdas de vitamina C nos sucos de fruta, e que as perdas atribuíveis apenas ao processamento situam-se, de modo geral, entre 4 % e 20 %.¹ Essa hierarquia foi construída pela comparação qualitativa de estudos com delineamentos distintos, sem tratamento cinético próprio.

A literatura recente sustenta a conclusão e a torna quantitativa. Nakilcioğlu-Taş e Ötleş acompanharam sucos cítricos frescos por apenas quatro horas, a 4 °C e a 25 °C, e registraram perda mensurável já nesse intervalo, com meias-vidas que diferiram por ordem de grandeza entre as matrizes, maiores no suco de laranja e menores no de toranja.² Registra-se que meia-vida e vida útil são grandezas distintas: a primeira é parâmetro de cinética química e designa o tempo necessário para que a concentração de ácido ascórbico caia a 50 % do valor inicial; a segunda é critério tecnológico e depende do limite de retenção arbitrado, adiante fixado em 80 %. Valores de vida útil não são, por isso, diretamente comparáveis a meias-vidas sem conversão pelo modelo cinético correspondente. A degradação, portanto, não é fenômeno de meses, e a matriz pesa tanto quanto a temperatura. Akyildiz e colaboradores forneceram os parâmetros cinéticos que faltavam ao artigo de 2006: em suco de laranja tratado termicamente entre 70 °C e 90 °C, determinaram meias-vidas, valores D, energia de ativação e valor z para o ácido ascórbico e associaram a queda da vitamina ao acúmulo de hidroximetilfurfural, tanto mais precoce quanto mais alta a temperatura de estocagem.³ Confirma-se, agora com base experimental própria, o vínculo entre degradação do ácido ascórbico e escurecimento não enzimático que Teixeira e Monteiro haviam descrito de forma qualitativa.¹

Um avanço de natureza metodológica merece destaque. Fernandez-Rosillo e colaboradores, estudando sucos de camu-camu e de naranjilla sob armazenamento acelerado, compararam modelos de ordem zero, de primeira ordem e o modelo não linear de Weibull, e verificaram que este último ofereceu o melhor ajuste, com perda inicial rápida seguida de estabilização.⁴ A vida útil estimada para 80 % de retenção caiu de 524 dias a 5 °C para 32 dias a 30 °C no camu-camu, com comportamento semelhante na naranjilla. A conclusão de 2006 não foi, assim, contrariada, mas refinada: o que era hierarquia qualitativa converteu-se em relação dose-resposta descrita por parâmetros cinéticos. Teixeira e Monteiro não discutem modelagem cinética nem afirmam que a degradação siga cinética de primeira ordem;¹ a leitura de que esse modelo operava como pressuposto nos estudos por elas revisados é inferência desta resenha, formulada a partir do fato de que os trabalhos de estabilidade da época descreviam a perda por decaimento exponencial simples. O que a evidência recente contraria não é, portanto, um enunciado do artigo-base, mas o pressuposto de linearidade então corrente, que deixou de ser tratado como descrição universal.⁴

Processamento dos sucos

Teixeira e Monteiro descreveram a pasteurização como o processo de conservação mais empregado e destacaram uma restrição tecnológica importante: como a pectinaesterase é mais termorresistente que os microrganismos deteriorantes, o binômio tempo-temperatura necessário para inativar a enzima é mais severo que o exigido pela segurança microbiológica.¹ Registraram ainda que processos alternativos, como em alta pressão, pulso elétrico, micro-ondas e aquecimento ôhmico, já vinham sendo investigados, com resultados favoráveis à alta pressão.

A literatura posterior confirma amplamente a vantagem das tecnologias não térmicas quanto à retenção. Em revisão recente, Shaikh e Shaik relatam que o processamento térmico costuma reduzir de 50 % a 70 % o teor natural de vitamina C, ao passo que campo elétrico pulsado, alta pressão, luz pulsada, ultrassom, ultravioleta e plasma frio frequentemente resultam em retenções superiores a 90 %.¹⁰ Em estudo experimental, Ambreen e colaboradores observaram que o processamento por alta pressão não alterou significativamente o teor de ácido ascórbico do suco de laranja, ao contrário do tratamento térmico tomado como referência.⁵

Esses números, porém, não devem ser lidos isoladamente. Timmermans e colaboradores avaliaram campo elétrico pulsado de intensidade moderada em suco de laranja e encontraram apenas pequenas diferenças de cor e de teor de vitamina C em relação ao tratamento térmico;⁶ mais

significativo, a pectinaesterase só ficou abaixo do valor crítico de atividade quando a temperatura máxima do processo atingiu 78 °C ou mais. Islam e colaboradores chegaram a impasse análogo com plasma frio aplicado ao mesmo produto: a cor foi praticamente preservada, mas o teor de ácido ascórbico caiu durante o tratamento e a atividade residual da enzima permaneceu acima de 60 %.⁷ Em ambos os casos, a variável operante para resolver o problema enzimático apontado em 2006 continuou sendo a temperatura.

Há ainda um efeito diferido pouco considerado nas comparações imediatas. Basak e colaboradores, revisando os mecanismos de degradação sob ultravioleta e luz pulsada, concluem que, embora a fotodegradação e a oxidação aeróbia atuem durante o tratamento, é a via anaeróbia que predomina na etapa posterior de armazenamento, de modo que aferir a retenção apenas logo após o processamento pode superestimar a vantagem das tecnologias emergentes.⁹ A vantagem real existe, portanto, mas é condicionada: essas tecnologias preservam mais vitamina C que a pasteurização convencional, embora boa parte das comparações não estabeleça equivalência de letalidade microbiológica e de inativação enzimática nem acompanhe o produto por toda a vida de prateleira.

Oxigênio e embalagem

Teixeira e Monteiro atribuíram ao oxigênio papel central na oxidação do ácido ascórbico, distinguindo três origens, sendo eles, o gás dissolvido no produto, o presente no espaço livre e o que permeia o material de embalagem. A partir desse pressuposto reuniram evidências de que o vidro assegurava retenção superior à dos polímeros e da embalagem cartonada. Registraram também que embalagens com absorvedor de oxigênio elevaram a retenção de ácido ascórbico de 51,3 % para 73,2 % após um ano a 4 °C, ponderando, entretanto, que a temperatura de estocagem produzia efeito ainda maior que o do absorvedor.¹

É neste eixo que se encontra a mudança mais expressiva das últimas duas décadas: o deslocamento da barreira passiva para a embalagem ativa. Coray e Yildirim aplicaram um rótulo absorvedor de oxigênio à base de ácido gálico a suco de laranja acondicionado em vidro hermeticamente fechado, a 4 °C e a 21 °C. Sem o absorvedor, a vitamina C degradou-se por completo em 30 dias a 21 °C e em 45 dias a 4 °C; com o absorvedor, manteve-se praticamente integral por 105 dias em ambas as temperaturas, com escurecimento igualmente contido.⁸

Esse resultado obriga a qualificar a hierarquia proposta em 2006. Teixeira e Monteiro posicionaram a temperatura de estocagem acima da embalagem;¹ os dados de

Coray e Yildirim mostram que, removido o oxigênio, o efeito da temperatura praticamente desaparece no intervalo estudado.⁸ A aparente contradição se dissolve quando se separam as duas vias de degradação descritas pelas próprias autoras: a via aeróbia é limitada pela disponibilidade de oxigênio; a anaeróbia, pela temperatura. Coerentemente, Fernandez-Rosillo e colaboradores, que também empregaram vidro hermético com espaço livre mínimo, continuaram observando forte dependência térmica.⁴ As duas evidências não competem: descrevem regimes distintos. Quanto aos materiais de barreira, as conclusões de 2006 não foram contestadas; o que mudou foi o foco da pesquisa, que migrou da comparação entre polímeros para sistemas capazes de remover ativamente o oxigênio residual, inclusive com agentes de origem natural.⁸

Avanços e lacunas após 2006

Permanecem sustentadas quatro asserções centrais do artigo-base: as condições de estocagem como principal determinante das perdas; o oxigênio como fator que amplifica os efeitos do processamento; a degradação do ácido ascórbico como origem de compostos associados ao escurecimento não enzimático; e o próprio teor de vitamina C como indicador da qualidade global do suco.^{3,8,11} A Tabela 1 sintetiza, eixo a eixo, o cotejo entre o artigo de 2006 e a literatura recente.

Tabela 1. Síntese comparativa entre as conclusões de Teixeira e Monteiro (2006) e as evidências da literatura recente. Tabela autoral.

Aspecto	Teixeira e Monteiro (2006)	Literatura recente	Situação
Estocagem	Principal fator de perda	Confirmado; perdas já nas primeiras horas ²	Sustentada
Temperatura	Refrigeração até 8 °C retém cerca de 90 %	Vida útil (80 %) cai de 524 d a 5 °C para 32 d a 30 °C ⁴	Ampliada
Modelo cinético	Não abordado; primeira ordem implícita	Weibull com ajuste superior ^{4,7}	Ampliada
Processamento térmico	Perdas de 4 % a 20 %; enzima mais resistente ao calor	Perdas de 50 % a 70 %; ¹⁰ enzima exige 78 °C ou mais ⁶	Revista
Tecnologias não térmicas	Alternativas em fase exploratória	Retenção acima de 90 %; ¹⁰ enzimas não resolvidas ^{6,7}	Ampliada
Oxigênio e embalagem	Oxigênio acelera a degradação	Absorvedor de ácido gálico: vitamina íntegra por 105 dias ⁸	Ampliada

Três frentes foram ampliadas. A primeira é a modelagem cinética: modelos não lineares, sobretudo o de Weibull, mostraram-se superiores à cinética de primeira ordem tanto na estocagem⁴ quanto durante o tratamento por plasma

frio.⁷ A segunda é o detalhamento mecanístico das rotas aeróbia e anaeróbia, hoje descritas em nível de intermediários radiculares.⁹ A terceira é a consolidação das tecnologias não térmicas, que em 2006 figuravam como processos alternativos em fase exploratória e hoje dispõem de dados de retenção sistematizados.¹⁰

Duas asserções exigem revisão. A primeira é a separação nítida entre processamento e estocagem como fatores independentes: os dados de Timmermans et al.⁶ mostram que a temperatura máxima atingida durante processos ditos não térmicos continua determinando a estabilidade enzimática e, por consequência, a qualidade ao longo do armazenamento. A segunda diz respeito à luz: Teixeira e Monteiro¹ consideraram os resultados contraditórios e pediram estudos que isolassem esse fator; o pedido foi parcialmente atendido, com delineamentos que manipulam luz e oxigênio de forma controlada² e com a descrição do mecanismo fotoquímico,⁹ ainda que a quantificação do efeito isolado da luz em sucos comerciais permaneça escassa.

Cabe reconhecer as limitações do próprio artigo de 2006. Trata-se de revisão narrativa, sem critérios explícitos de busca e seleção, que não produziu dados primários nem análise cinética. As autoras foram, contudo, transparentes quanto a duas fragilidades da literatura que revisavam: a maior parte dos trabalhos não informava o teor de vitamina C antes do processamento, e a heterogeneidade das condições experimentais dificultava a comparação entre estudos.¹

Essas fragilidades não foram superadas. Giannakourou e Taoukis,¹¹ em revisão crítica dedicada justamente à modelagem cinética da estabilidade da vitamina C, sustentam que persiste a necessidade de estudos sistemáticos que investiguem e descrevam matematicamente, de forma separada, a perda da vitamina em cada etapa de processamento e durante a distribuição e a estocagem subsequentes, reiterando, quinze anos depois, o mesmo diagnóstico. Somam-se lacunas próprias da literatura atual: a escassez de estudos que acompanhem as tecnologias emergentes por toda a vida de prateleira, a ausência frequente de equivalência de processo nas comparações e a pouca atenção a custo, escalabilidade e consumo energético.

Conclusões

A questão norteadora admite resposta afirmativa com ressalvas. As conclusões centrais de Teixeira e Monteiro continuam sustentadas pela literatura científica atual: as condições de estocagem seguem sendo o principal determinante das perdas de vitamina C em sucos de frutas; o oxigênio permanece como o fator que amplifica os efeitos do

processamento e da embalagem; e a degradação do ácido ascórbico continua associada ao escurecimento não enzimático e à redução da vida de prateleira.

Os avanços das duas últimas décadas foram menos de reorientação e mais de aprofundamento. A descrição da degradação tornou-se quantitativa, com parâmetros cinéticos que permitem predição de vida útil, e a suposição de cinética de primeira ordem cedeu lugar a modelos não lineares mais aderentes aos dados. As tecnologias não térmicas deixaram a condição de alternativas exploratórias e passaram a dispor de evidência consistente de retenção superior à da pasteurização convencional. A embalagem, por sua vez, migrou da barreira passiva para sistemas ativos capazes de remover o oxigênio residual, com resultados que, em condições controladas, praticamente suprimem a via aeróbia de degradação.

Duas ressalvas impedem uma leitura triunfalista. A primeira é que a vantagem das tecnologias emergentes tem sido aferida, com frequência, logo após o processamento e sem equivalência demonstrada de inativação microbiana e enzimática; quando essa equivalência é exigida, a temperatura reaparece como variável decisiva. A segunda é que a mesma dificuldade de comparação entre estudos apontada em 2006 continua sendo diagnosticada na literatura recente.

O desafio remanescente é, portanto, menos a descoberta de novas tecnologias e mais a integração das etapas e a padronização experimental: protocolos que declarem o teor inicial da vitamina, estabeleçam equivalência de processo antes de comparar tecnologias e acompanhem o produto por toda a vida de prateleira.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de observações são de Rahídes Farias Lima.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela oportunidade

concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 M. Teixeira e M. Monteiro, *Alimentos e Nutrição*, 2006, **17**, 219–227
- 2 E. Nakilcioğlu-Taş e S. Ötleş, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2020, **92**, e20190328
- 3 A. Akyildiz, T. S. Mertoglu e E. Agcam, *J. Food Compos. Anal.*, 2021, **102**, 103996
- 4 F. Fernandez-Rosillo, D. Mori-Mestanza, A. S. Cabrejos-Barrios, M. Medina-Mendoza, E. M. Cabrejos-Barrios, N. León-Roque, E. Hernández-Martínez, R. Rivera-Botonares, E. M. Castro-Alayo, H. Minchán-Velayarce e C. R. Balcázar-Zumaeta, *Foods*, 2026, **15**, 1722
- 5 S. Ambreen, M. U. Arshad, A. Imran, M. Afzaal e F. K. Madilo, *International Journal of Food Properties*, 2023, **26**, 3214–3225
- 6 R. A. H. Timmermans, W. S. U. Roland, K. van Kekem, A. M. Matser e M. A. J. S. van Boekel, *Foods*, 2022, **11**, 3360
- 7 S. Islam, P. Kumar, R. Cheroor, M. Jaiswal, A. Begum, P. P. Srivastav e B. Srivastava, *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2024, **18**, 9603–9617
- 8 N. M. Coray e S. Yildirim, *Packaging Technology and Science*, 2024, **37**, 917–923
- 9 S. Basak, L. Shaik e S. Chakraborty, *Food Chemistry Advances*, 2023, **2**, 100333
- 10 N. Shaikh e L. Shaik, *Plant Foods for Human Nutrition*, 2026, **81**, 12
- 11 M. C. Giannakourou e P. S. Taoukis, *Foods*, 2021, **10**, 263

Diferentes métodos para a detecção de microvestígios de disparo: uma revisão

DOI: 10.5281/zenodo.22311281

Ana Clara Bolson Pires de Almeida^{a*}

Forensic chemistry plays a fundamental role in ballistics by identifying gunshot residue (GSR) microtraces, which are essential for crime scene reconstruction in the absence of firearms or projectiles. This work consists of a qualitative literature review that analyzes and compares preliminary methods and confirmatory analyses. The Griess Test stands out as a preliminary colorimetric method sensitive to nitrites in the organic fraction of GSR, offering speed and low cost, although it is susceptible to false positives from environmental contamination. Conversely, Mass Spectrometry (MS) serves as a highly selective and sensitive confirmatory analysis, identifying organic additives in modern heavy-metal-free ammunition, though it presents limitations such as high cost and sample degradation. It is concluded that the strategic integration of both methods optimizes forensic routine, highlighting the ongoing need for new analytical approaches.

A química forense desempenha um papel fundamental na balística ao identificar microvestígios de resíduos de disparo de armas de fogo (GSR), essenciais na reconstituição de crimes na ausência de armas ou projéteis. Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica qualitativa que analisa e compara técnicas de triagem e análises comprobatórias. O Teste de Griess destaca-se como método preliminar colorimétrico sensível aos nitritos da fração orgânica do GSR, oferecendo rapidez e baixo custo, embora seja suscetível a falsos positivos por contaminações ambientais. Em contrapartida, a Espectrometria de Massa (MS) atua como análise confirmatória de alta seletividade e sensibilidade, identificando aditivos orgânicos em munições modernas sem metais pesados, contudo apresenta limitações como o alto custo e a degradação da amostra. Conclui-se que a integração estratégica de ambos os métodos otimiza a rotina pericial, evidenciando a necessidade contínua de novas abordagens analíticas.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: anaclara242004@gmail.com

Palavras-chave: Microvestígios; técnicas de triagem; análises comprobatórias; balística.

Recebido em 16 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

A Criminalística começa a ser reconhecida e estruturada no final do século XIX na Alemanha, a partir dos trabalhos do professor e promotor de justiça Hans Gross. Seus estudos e livros publicados contribuíram para a consolidação das denominadas Ciências Forenses, dentre as quais se destaca a Balística¹. Esse ramo da criminalística tem por objetivo o estudo das armas de fogo, suas munições e efeitos de seus disparos.²

Entretanto, a grande maioria das análises realizadas pelos Laboratórios de Balística dependem da apreensão da arma utilizada, de seus projéteis e de seus cartuchos, além do estado de cada um desses componentes. Sendo assim, nos locais de crime em que tais elementos não estão presentes ou nos casos em que são impossibilitadas as suas análises, fazem-se necessárias diferentes estratégias e perspectivas de pesquisa para a realização dos laudos periciais.²

É nesse contexto de adversidades que diferentes laboratórios de institutos policiais podem contribuir nas investigações, na tentativa de ainda extrair, dos projéteis e de seus vestígios, informações úteis na reconstituição do local de crime e as demais circunstâncias do delito. Assim, outras áreas de pesquisa ganham grande relevância, a exemplo da química na vertente de microvestígios. Essa vertente trabalha com os vestígios químicos deixados pelas armas de fogo na ocasião do disparo.

Na deflagração de um disparo, são expelidos diversos resíduos sólidos e gasosos juntamente do projétil. Os resíduos sólidos derivam da interação do projétil com a mistura iniciadora e a pólvora, enquanto a fase gasosa é constituída por mistura de monóxido e dióxido de carbono, vapor d'água, óxidos de nitrogênio, entre outros. Embora parte desses resíduos permanecem na estrutura da própria arma, uma fração é projetada para o ambiente, espalhando os microvestígios no atirador e pelo local de crime. Nesse

contexto, a química forense desempenha um papel fundamental da identificação e caracterização dessas partículas e gases, na tentativa de relacioná-los ao possível atirador, à arma ou às circunstâncias do ocorrido.^{3, 4, 5}

Essas partículas apresentam características morfológicas e composicionais singulares, sendo esta última principalmente de chumbo (Pb), bário (Ba) e antimônio (Sb).^{3, 4, 5} Diante disso, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas e empregadas dentro da criminalística com o objetivo de identificar tais resíduos de disparo de arma de fogo (GSR).^{5, 6} Dentre as possíveis análises de GSR, existem duas principais categorias: triagem preliminar e a análise comprobatória. Na primeira, o objetivo é o teste inicial rápido e sensível para detectar a presença de uma presumida substância; já na segunda, as análises são mais complexas e ocorre a confirmação analítica, eliminando falsos positivos ou assegurando a exatidão do resultado na presença da substância.⁸

Nesse contexto, o presente artigo tem por objetivo trazer algumas das técnicas desenvolvidas no ramo da química forense, voltadas à identificação de GSR, discutindo suas aplicações, funcionamento e limitações na rotina pericial.

Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa, baseada na análise de artigos científicos, livros, revistas e documentos técnicos relacionados à área de química forense. A pesquisa foi realizada por meio de plataformas digitais, como bases de dados acadêmicos e científicos, incluindo Google Acadêmico, SciELO, PubMed e Periódicos CAPES, utilizando palavras-chave como “forense”, “vestígios de disparo” e “balística”, bem como suas combinações em português, inglês e espanhol.

Como critérios de inclusão, foram considerados estudos publicados no período de 2000 a 2026, que fossem desenvolvidos a partir de técnicas de análise com o objetivo de detectar GSR. Além disso, materiais de revisão bibliográfica, livros científicos ou textos acadêmicos também foram incluídos.

Resultados e discussão

A literatura científica contempla uma ampla variedade de métodos para a detecção, quantificação e caracterização de microvestígios sob diferentes arranjos experimentais. Todavia, para o escopo do presente trabalho,

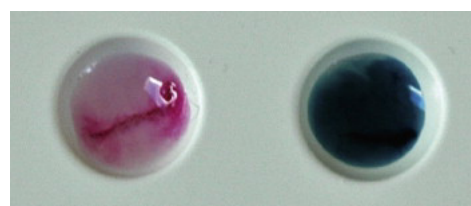
foram selecionadas duas abordagens para discussão: o teste do Reagente de Griess, como triagem preliminar, e a Espectrometria de Massas, como técnica comprobatória. Pretende-se, assim, discutir suas fundamentações teóricas, mecanismos de funcionamento, aplicações práticas e limitações no âmbito da rotina pericial.

Teste de Griess

O Teste de Griess é uma metodologia colorimétrica direcionada predominantemente à detecção da fração orgânica do GSR. Vale destacar que os GSR apresentam uma composição complexa, a qual poderia ser dividida em duas fases distintas: uma orgânica e outra inorgânica, ambas provenientes da interação da pólvora com a mistura inicializadora de disparo. O Teste de Griess se propõe a detectar a parte orgânica, por esta conter vestígios de nitritos, nitratos e outros componentes nitrogenados. Esse teste apresenta altíssima sensibilidade especificamente aos íons nitrito (NO_2^-).^{5, 8}

O mecanismo químico do Teste do Reagente de Griess baseia-se na diazotização e acoplamento azóico, reação clássica na Química Orgânica Analítica, sendo memorável por sua alta seletividade e sensibilidade ao íon nitrito em meio ácido. Na etapa inicial, os íons nitrito reagem com a sulfanilamida em meio ácido formando o sal diazônio, intermediário altamente reativo. Na sequência, o sal é acoplado a uma segunda amina, resultando em um corante de cor rosada intensa. Como a cor formada é de grande intensidade, isso permite ao teste detectar concentrações muito baixas de nitrito (NO_2^-), dando alta sensibilidade ao teste.⁸

Figura 1. Visual do resultado positivo para íons nitrito com a coloração rosada. Extraído da referência 16.



Historicamente, os testes colorimétricos são empregados em perícias de campo, como forma de análise preliminar, viabilizando uma detecção rápida de suspeitos e trajetória de disparo no próprio local de crime. Ademais, por se tratar de um teste de baixo custo, sua aplicação torna viável tanto análises em laboratórios com limitações instrumentais quanto perícias de campo.⁸

O Teste de Griess permanece relevante no ambiente acadêmico, com arranjos experimentais direcionados à avaliação da capacidade de seus resultados. A exemplo disso, Paredes e Méndes⁹ conduziram um estudo recente para determinar o grau de afetação/interferência que o teste de Griess sofre na detecção de nitritos no interior do cano de uma espingarda. Para tanto, os autores selecionaram quatro contaminantes comuns, sendo eles óleo para motor 4 tempos, combustível diesel, gasolina e água de chuva. O intuito, portanto, seria verificar se esses contaminantes interfeririam de maneira a gerar falsos positivos ou negativos no teste.⁹

Os achados experimentais mostraram que os contaminantes derivados do petróleo não interferem nos resultados do teste. Em contrapartida, a água de chuva induziu falsos positivos, caracterizada pela formação de uma leve coloração rosada. De acordo com os autores, tal fenômeno decorre da absorção de compostos nitrogenados presentes na atmosfera, visto que o NO₂ gasoso, amplamente presente no ar, dissolve-se facilmente em soluções aquosas. Assim, o dióxido de nitrogênio forma íons nitrito (NO²⁻) e íons nitrato (NO³⁻) na água, podendo contaminar o resultado do teste.¹⁸

Estudos como o de Paredes e Méndes assumem um papel fundamental para a conscientização dos peritos acerca dos possíveis erros de medição ao utilizar o Teste de Griess como triagem. Essa relevância se relaciona com as limitações desse teste, visto que ele é bastante suscetível a falsos resultados, fato corroborado pelo estudo citado. Tal fragilidade decorre da não-exclusividade dos resíduos de disparo que o teste analisa (íons nitrito NO²⁻). Ou seja, o teste, por sua alta sensibilidade, detecta quaisquer íons nitrito presentes, logo, se forem provenientes de contaminação, ainda será dado resultado positivo. Eles estão presentes na natureza e em produtos manufaturados, sendo assim, podem provocar resultados falso-positivos por contaminação.

Dessa forma, o resultado positivo do Griess é considerado não-discriminatório e inespecífico. Ou seja, ele é insuficiente para respaldar a autoria de um disparo ou sua vinculação a uma arma de fogo em âmbito judicial.⁸ Não obstante, o ensaio conserva sua utilidade prática em campo para economizarem recursos, visto que a obtenção de resultados negativos viabiliza o descarte preliminar de amostras não promissoras e não prosseguem para posteriores análises. Dessa forma, ele evita análises desnecessárias quando resulta negativo, apesar de ser não-discriminatório para resultados positivos.

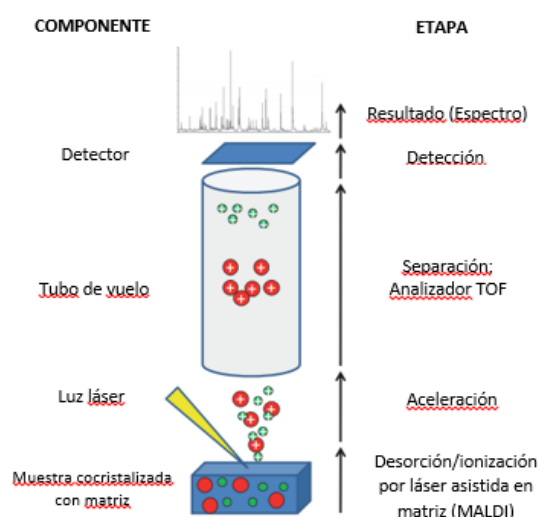
Desse modo, apesar de alguns autores argumentam que os testes colorimétricos já caíram em desuso no âmbito das análises periciais modernas,^{10, 11} ainda podemos encontrar na literatura recente pesquisadores que os utilizam.^{9, 12}

Espectrometria de Massa

Esse é um método analítico reconhecido por sua elevada sensibilidade e seletividade, empregada na detecção e quantificação de componentes e/ou compostos, elucidando, então, diversos tipos de estruturas. Além disso, ele pode ser usado combinado com uma base de dados, a fim de automaticamente comparar e classificar os analitos de interesse, baseados em seus perfis espectrais. Por sua versatilidade e abrangência, esse método desempenha papel central na química analítica, encontrando diferentes aplicações sobretudo nas áreas orgânica e inorgânica.^{13, 14}

O princípio fundamental da espectrometria de massas (MS) é a ionização de compostos presentes numa amostra. Um espectrômetro de massas é constituído, de maneira simplificada, por três componentes essenciais: o sistema de fonte de íons, o analisador de massas e o detector. Na fonte de íons, as moléculas gasosas são convertidas em espécies carregadas e, após esse processo, ocorre a separação dos componentes por meio de campos elétricos e/ou magnéticos de acordo com a sua razão carga/massa (m/z). Além disso, a mudança de cada um de seus componentes permite alcançar diferentes sensibilidades e resoluções conforme as exigências da aplicação pericial.^{13, 14}

Figura 2. Imagem ilustrativa dos componentes de um espectrômetro de massas. Extraído da referência 17.



A sua especificidade e o elevado poder de resolução atendem às exigências da química forense na análise de resíduos de disparo. Graças à sua alta especificidade, ela se torna uma ferramenta indispensável para as análises comprobatórias. Na triagem, além dos efeitos de contaminantes, compostos muito similares podem se confundir. Esse fator de similaridade é mitigado pela MS, uma vez que elimina os falsos positivos dos testes de triagem por sua alta especificidade.^{13, 15}

Além disso, a MS tem se destacado no âmbito forense pela identificação de resíduos orgânicos de disparo, tais como estabilizantes (ex. difenilamina, etilcentalina), plastificantes (ex. dibutilftalato) e explosivos (ex. nitroglicerina). O mapeamento desses microvestígios orgânicos ganhou relevância nos últimos anos, pelo crescente uso de munições “limpas” (*lead-free*), desenvolvidas para mitigar a exposição dos atiradores aos metais pesados. Nesse cenário, as abordagens puramente inorgânicas, baseadas na presença desses metais, tornam-se insuficientes ou pouco conclusivas para a caracterização pericial.^{13, 15}

Outro aspecto de suma relevância sobre a MS na elaboração de laudos periciais é a sua combinação com métodos de cromatografia, como a cromatografia em fase gasosa (CG-MS) ou a cromatografia líquida (LM-MS). Essa associação proporciona limites de detecção extremamente baixos, atingindo a ordem de picogramas, e alta seletividade, permitindo a identificação de aditivos voláteis e semivoláteis específicos da pólvora.¹³

Entretanto, a despeito de suas diversas vantagens e do amplo espectro de aplicações na química forense, a espectroscopia de massa apresenta limitações operacionais significativas, destacando-se seu alto custo. Somam-se a isso a complexidade inerente ao tratamento e à interpretação de dados, o que exige o suporte de bibliotecas de dados consolidadas. Outra problemática envolve a degradação das amostras, que muitas vezes torna a MS uma alternativa inviável. Sobretudo quando a quantidade de vestígio é reduzida ou quando o elemento necessita ser preservado para passar por outras perícias complementares.^{13, 14, 15}

Conclusões

Em suma, a química forense, aplicada na área de microvestígios, dispõe de uma série de métodos e instrumentos com enorme potencial na balística forense. Essas ferramentas possibilitam análises relevantes para elucidação de delitos e extração de informações quando os

componentes balísticos não se encontram em estado adequado de análise.

As perícias dividem-se, estruturalmente, em testes de triagem e análises comprobatórias. No primeiro caso, o objetivo é a agilidade, baixo custo e sensibilidade permitindo a triagem preliminar das amostras. Resultados negativos cessam o fluxo de análise, enquanto os positivos encaminham as amostras para a fase seguinte. As análises comprobatórias, por sua vez, visam quantificar e confirmar a presença das substâncias suspeitas e assegurar a robustez necessária à prova pericial.

O presente artigo tomou para análise como método de triagem o Teste de Reagentes de Griess, o qual se mostra efetivo e prático para a realização de perícias locais. Essa metodologia tem por objetivo a identificação dos compostos orgânicos presentes em GSR, sendo sensível aos íons nitritos presentes. Todavia, a técnica é muito suscetível à falsos positivos, devido a contaminações do ambiente. Por essa razão, esse método é não-discriminatório.

Complementarmente, como método de análise comprobatória, tomou-se de referência a Espectroscopia de Massa, destacando-se para a identificação de resíduos orgânicos de disparo. Isso se dá por sua alta especificidade e seus limites de detecção extremamente baixos. Entretanto, apesar de sua excelência analítica, o alto custo e a destrutividade do método, tornam sua utilização completamente inviável quando a amostra necessita ser preservada ou há quantidades pequenas dela.

Por conclusão, ressalta-se a imperativa necessidade de explorar novos métodos e equipamentos para a área de microvestígios, visando ampliar as alternativas analíticas disponíveis e conferir maior precisão, agilidade e segurança jurídica às perícias criminais.

Contribuições por Autor

O resumo das informações encontradas nos artigos de referência, bem como a inclusão de observações, é de Ana Clara Bolson Pires de Almeida.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao meu pai e ao meu irmão, presentes sempre na minha jornada. Agradeço também ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio concedido. Além desses, meus agradecimentos ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília.

Notas e referências

1. A. Blume, Histórico da Criminalística, <https://fr.scribd.com/PCCP/RSC>, (accessed 24 May 2024)
2. E. T. V. Bezerra and J. M. de O. Godoy, *Quím. Nova*, 2024, **47**, e-20230087.
3. S. Basu, Formation of gunshot residues, *J. Forensic Sci.*, 1982, **27**, 72–91.
4. H. H. Meng and B. Caddy, Gunshot residue analysis—A review, *J. Forensic Sci.*, 1997, **42**, 553–570.
5. E. L. T. dos Reis, J. E. de S. Sarkis, C. Rodrigues, O. N. Neto and S. Viebig, *Quim. Nova*, 2004, **27**, 409–413.
6. R. L. Singer, D. Davis and M. M. Houck, A survey of gunshot residue analysis methods, *J. Forensic Sci.*, 1996, **41**, 195–198.
7. D. DeGaetano and J. A. Siegel, Survey of gunshot residue analysis in forensic science laboratories, *J. Forensic Sci.*, 1990, **35**, 1087–1093.
8. R. C. Ferreira and E. Ferreira, BALÍSTICA FORENSE DE CAMPO: O PAPEL DOS TESTES COLORIMÉTRICOS DE BANCADA E SUAS LIMITAÇÕES NA ANÁLISE DE RESÍDUOS DE DISPARO (GSR), *Rev. Renovare*, 2026, **1**, 108-120.
9. J. G. Forero Paredes, G. M. Ramírez Hernández, G. C. Rodríguez Méndez, E. Hernández Díaz, J. C. Murillo Leal, J. A. Solano Beltrán and I. del C. Guerra Moreno, Influencia de los contaminantes dentro del cañón de un arma de fuego tipo escopeta en los resultados de la prueba de GRIESS (a y b) para la detección de residuos de disparo, *Rev. Criminalidad*, 2021, **63**, 61–76
10. M. J. Silva, J. Cortez, C. Pasquini, R. S. Honorato, A. P. S. Paim and M. F. Pimentel, Gunshot residues: screening analysis by laser-induced breakdown spectroscopy, *J. Braz. Chem. Soc.*, 2009, **20**, 1887–1894.
11. A. Duarte, PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
12. G. B. L. de Freitas, E. Carraro, J. S. Bonini, V. S. Giorno and D. J. de Almeida, Aplicação Forense do Iodeto de Potássio: Um Novo Método Colorimétrico para Identificação de Resíduos de Disparos de Armas de Fogo, *Braz. J. Forensic Sci. Med. Law Bioethics*, 2017, **7**, 101–112.
13. R. V. Taudte, A. Beavis, L. Blanes, N. Cole, P. Doble and C. Roux, Detection of gunshot residues using mass spectrometry, *Biomed Res. Int.*, 2014, **2014**, 965403
14. E. L. T. dos Reis, Ph.D. thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005
15. R. A. Costa, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2021.
16. G. B. Kauffman, Encyclopedia of analytical science, second edition, edited by Paul Worsfold, Alan Townshend, and Colin Poole, *Chem. Educ.*, 2005, **10**, 487–489.
17. *Wikimedia Commons*, Espectrometria de masas MALDITOF.png, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Espectrometr%C3%ADa_de_masas_MALDI-TOF.png, (accessed August 2026).
18. C. G. Rocha e A. A. Cardoso, Gases de nitrogênio reativo como precursores do aerossol atmosférico: reações de formação, processos de crescimento e implicações ambientais, *Quim. Nova*, 2021, **44**, 460–472.

Difratometria e Microscopia: Uma abordagem crítica para o ensino de caracterização de materiais

DOI: 10.5281/zenodo.22313335

Iago Cezario de Souza^{a*}

This critical review analyzes the importance of accessible experimental strategies for teaching diffractometry and material characterization techniques, overcoming conceptual barriers traditionally imposed by the complexity of X-ray diffraction. The analysis highlights how the use of low-cost laser sources and everyday objects such as optical media and microscopic gratings enables not only the phenomenological demonstration of interference and diffraction but also quantitative cross-validation via optical microscopy. It is argued that combining reflective and transmissive patterns fosters an intuitive understanding of reciprocal space and structural symmetry. The review concludes that pedagogical approaches based on accessible metrology and empirical validation strengthen scientific reasoning and conceptual mastery in chemistry and physics.

Esta resenha crítica analisa a importância de estratégias experimentais acessíveis para o ensino de técnicas de difratometria e caracterização de materiais, transpondo barreiras conceituais tradicionalmente impostas pela complexidade da difração de raios X. A análise evidencia como a utilização de fontes laser de baixo custo e objetos do cotidiano, como mídias ópticas e grades microscópicas, permite não apenas a demonstração fenomenológica da interferência e da difração, mas também a validação cruzada quantitativa por meio de microscopia óptica. Argumenta-se que a associação entre padrões reflexivos e transmissivos estimula a compreensão intuitiva do espaço recíproco e da simetria estrutural. Conclui-se que abordagens pedagógicas baseadas em metodologia acessível e validação empírica fortalecem o raciocínio científico e apropriação conceitual na química e na física.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: iagocezario@gmail.com

Palavras-chave: Difratometria a laser; metrologia educacional; espaço recíproco; validação cruzada.

Recebido em 17 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 de agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

A difratometria consolida-se como um dos pilares metodológicos mais cruciais para a elucidação estrutural de materiais sólidos na química e na física moderna. A capacidade de decodificar o arranjo atômico, a cristalinidade e a simetria de compostos que vão desde moléculas orgânicas de baixa massa molar até macromoléculas biológicas complexas fundamenta o avanço científico contemporâneo.¹ Contudo, a dependência histórica de radiação eletromagnética de alta energia, como os raios X, impõe barreiras instrumentais e conceituais significativas nos ambientes educacionais. A invisibilidade dos fenômenos atômicos subjacentes e a abstração matemática exigida para a interpretação dos padrões de difração frequentemente resultam em lacunas de aprendizagem e em uma visão compartimentada da instrumentação analítica.²

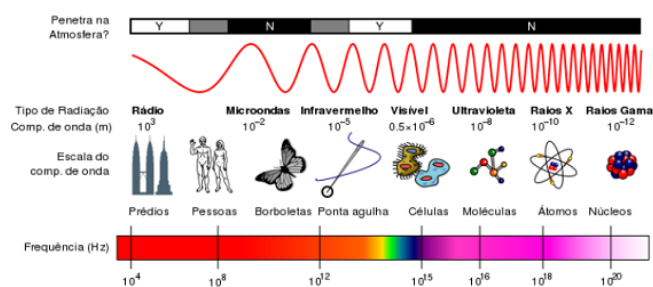
No cenário educacional, a exploração de propriedades ópticas da luz por meio de dispositivos laser acessíveis surge como uma alternativa pedagógica de elevado potencial

investigativo.³ A familiaridade dos estudantes com ponteiros laser e mídias de armazenamento óptico, como CDs (*Compact Disc*) e DVDs (*Digital Versatile Disc*), desperta uma curiosidade natural que pode ser canalizada para a investigação científica rigorosa. Ao observar a difração da luz visível em trilhas microscópicas periódicas, o discente depara-se com o mesmo princípio físico que rege a cristalografia de raios X, estabelecendo uma ponte intuitiva entre o visível e o invisível.³ Esta transposição didática valoriza a experimentação de baixo custo sem abdicar do rigor metrológico necessário para a formação científica.

Uma breve revisão sobre o espectro eletromagnético permite compreender a posição e a importância dos raios X entre as diferentes formas de radiação eletromagnética. O espectro é organizado de acordo com propriedades como frequência, energia e comprimento de onda, abrangendo desde as ondas de rádio, caracterizadas por maiores comprimentos de onda, até os raios gama, que apresentam comprimentos de onda extremamente reduzidos e elevada energia. Nesse contexto, os raios X situam-se entre a radiação ultravioleta e os raios gama,

apresentando comprimentos de onda aproximados entre 0,01 e 10 nm. Essa faixa é especialmente importante para técnicas de difração, pois seus comprimentos de onda são comparáveis às distâncias existentes entre os átomos em estruturas cristalinas. Dessa forma, a interação dos raios X com a matéria possibilita a formação de padrões de difração, fornecendo informações relevantes sobre a estrutura e a organização dos materiais.

Figura 1: Representação das diferentes regiões do espectro eletromagnético. Extraído da referência 2.



Nesse contexto, o trabalho de L. F. Valadares e N. F. Valadares sobressai-se ao propor uma abordagem que transcende a mera demonstração qualitativa de fenômenos ópticos.⁴ Os autores integram a difratometria a laser com a microscopia de luz em uma sistemática de validação cruzada, permitindo a quantificação rigorosa de espaçamentos microscópicos em grades de difração e mídias comerciais. A relevância dessa proposta reside na introdução tangível de conceitos avançados, como o espaço recíproco e a simetria espacial, utilizando materiais acessíveis e promovendo o desenvolvimento de competências metrológicas essenciais para a investigação científica.⁵

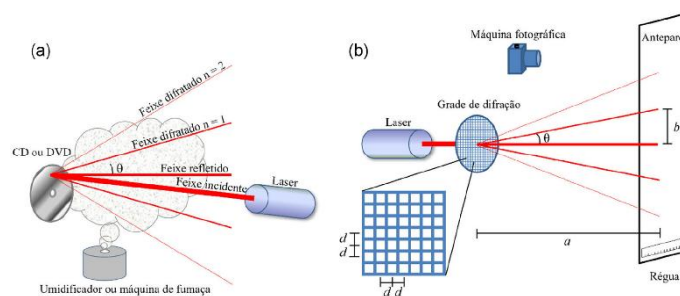
Esta resenha crítica propõe aprofundar e expandir as reflexões trazidas por L. F. Valadares e N. F. Valadares, examinando as implicações epistemológicas e pedagógicas da experimentação óptica no ensino superior. Serão analisadas as premissas metodológicas do estudo original, os resultados obtidos na validação cruzada e as perspectivas inovadoras para a superação de obstáculos no ensino de cristalografia. O objetivo central é demonstrar que a democratização de ferramentas visuais e quantitativas constitui um vetor indispensável para a formação de profissionais capazes de articular teoria e prática analítica com autonomia e criticidade.

Metodologia

A pesquisa conduzida por L. F. Valadares e N. F. Valadares fundamenta-se em um método experimental quantitativo e comparativo, estruturado na articulação entre a óptica física e a microscopia óptica convencional.⁴ Os autores estruturaram o estudo em etapas sistemáticas que englobam a montagem de um arranjo óptico simples para a captação de padrões de difração por reflexão (utilizando discos compactos e DVDs) e por transmissão (utilizando grades de microscopia eletrônica com diferentes simetrias: quadrada, retangular e hexagonal).⁶ O uso de lasers de diferentes comprimentos de onda, sendo um vermelho ($\lambda = 650$ nm) e outro verde ($\lambda = 532$ nm), permitiu avaliar a dependência angular do fenômeno difrativo em função da escala de radiação incidente.⁷

O método de pesquisa instrumental adotado no trabalho original exigiu a captação fotográfica rigorosa dos padrões de difração projetados em anteparos planos, com o registro meticuloso das distâncias geométricas entre o anteparo, a amostra e os máximos de interferência. Em paralelo, as mesmas amostras foram submetidas à análise por microscopia de luz, cujas imagens digitais foram processadas para a mensuração direta dos espaçamentos periódicos reais.⁸ A convergência metodológica manifesta-se na comparação direta entre os valores de espaçamento obtidos por difratometria a laser calculados por meio de equações de interferência construtiva e geometria de feixes e os valores mensurados diretamente via microscopia, estabelecendo um protocolo robusto de validação cruzada.

Figura 2: Aparato experimental: (a) difração por reflexão em CD/DVD e (b) difração por transmissão em grades. Extraído da referência 4.



Para a elaboração desta resenha crítica, a metodologia empregada adotou uma abordagem multifacetada que excedeu a análise documental. Além da leitura crítica e interpretativa da obra de L. F. Valadares e N. F. Valadares, o processo metodológico estruturou-se em três eixos complementares: (i) revisão bibliográfica integrativa, confrontando os dados do artigo original com clássicos da cristalografia e da óptica física para avaliar a consistência dos fundamentos teóricos; (ii)

modelagem conceitual e simulação dos arranjos experimentais, permitindo rastrear a robustez lógica das equações de interferência empregadas na validação cruzada; e (iii) análise crítica e comparativa, na qual os achados do estudo foram contrapostos a discussões contemporâneas sobre epistemologia do laboratório didático e superação do ensino de instrumentação analítica.⁹

Em uma segunda etapa, realizou-se a contextualização epistemológica e pedagógica, confrontando os achados do estudo com a literatura contemporânea sobre o ensino de cristalografia, instrumentação analítica e o papel da experimentação de baixo custo.¹⁰ Essa análise comparativa buscou ir além da apuração dos resultados, questionando as limitações e os desdobramentos da inserção de ferramentas ópticas na superação de barreiras conceituais no laboratório didático.¹¹

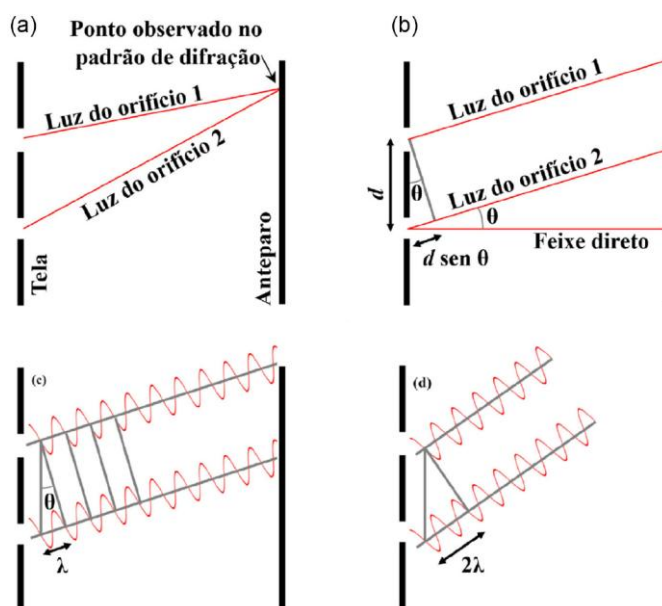
Além disso, foi possível simular a montagem dos experimentos e a aplicação das equações de interferência, avaliando passo a passo a coerência da validação cruzada proposta. A reflexão prática sobre o cotidiano dos laboratórios escolares transformou a análise em um exercício de pensamento ativo. Dessa forma, não apenas avaliar o trabalho original, mas também propor novas ideias sobre como tornar o ensino em química mais acessível, instigante e distante daquele modelo tradicional robusto.¹²

É necessário ressaltar que a base analítica para a quantificação dos espaçamentos microscópios usa como base o rigor geométrico da difração, mostrado logo em seguida pela equação 1.

A equação 1 define a condição de interferência construtiva para a geometria de difração por reflexão observada no CD/DVD. Enquanto λ e n representam o comprimento de onda e a ordem de difração respectivamente, d indica o espaçamento da grade e θ o ângulo de desvio. A imagem revela que a luz percorre trajetórias distintas; o brilho no anteparo só ocorre quando essa diferença de caminho equivale a um múltiplo de λ .

$$n \times \lambda = d \times \sin\theta \quad (1)$$

Figura 3: Esquema simplificado ilustrando a condição de interferência construtiva descrita na equação 1. Extraído da referência 4.



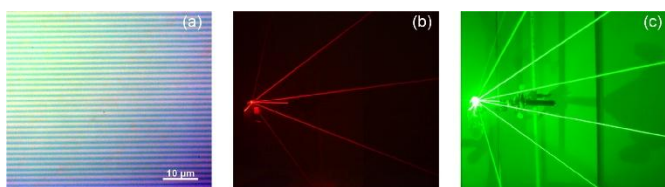
Assim, o processo metodológico culminou na síntese interpretativa e na formulação de perspectivas autorais, nas quais as ideias centrais do trabalho original foram integradas a reflexões sobre a disseminação do conhecimento científico, a metodologia educacional e a necessidade de superar o tecnicismo pedagógico.¹² Este percurso metodológico assegura que a resenha não se limite a uma descrição passiva, mas constitua um ensaio crítico original, ancorado em rigor analítico e inovação conceitual.¹³

Resultados e discussão

A análise dos resultados obtidos evidencia a eficácia da difratometria a laser como ferramenta metodológica e pedagógica. A concordância quantitativa entre os espaçamentos das trilhas de CDs e DVDs e as mensurações obtidas por microscopia óptica comprova que a luz visível, quando adequadamente instrumentalizada, é capaz de fornecer medidas precisas na escala micrométrica.⁴ Este resultado desafia a percepção de que a precisão analítica é atributo exclusivo de instrumentação de alto custo, demonstrando que o rigor científico reside na consistência do método de validação cruzada e não estritamente na sofisticação do equipamento.⁵

Um aspecto de elevada originalidade na discussão promovida pelos autores refere-se à exploração da simetria em grades de difração por transmissão. Ao analisar padrões gerados por malhas com geometrias quadrada, retangular e hexagonal, o estudo tangibiliza o conceito abstrato de espaço recíproco.¹⁴ Observa-se que a distribuição geométrica dos pontos de difração no anteparo espelha de forma inversa a simetria do objeto difratante: espaçamentos menores no objeto geram padrões mais espalhados no anteparo. Essa demonstração visual imediata reconecta a física ondulatória à cristalografia, permitindo que o estudo compreenda a lógica geométrica que rege a determinação de estruturas cristalinas por raios X.¹⁴

Figura 4: Difração em CD. (a) Microscopia das trilhas regulares; (b-c) feixes de laser vermelho e verde refletidos, com trajetórias visualizadas via aerossol para medição angular. Extraído da referência 4.

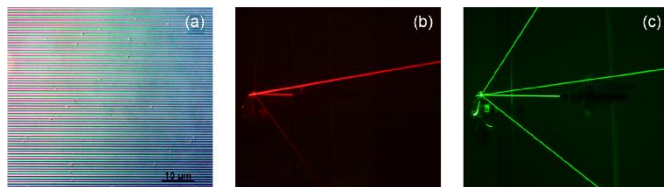


A análise experimental do CD, observada na figura 3, evidencia a funcionalidade da mídia como uma grade de difração por reflexão eficiente. A microscopia confirma a periodicidade rigorosa das trilhas, que atuam como centros espalhadores essenciais para a formação dos máximos de interferência. Ao incidir os feixes, a visualização via aerossol permite distinguir claramente as ordens de difração, revelando que o laser vermelho sofre um desvio angular superior ao verde. Esse comportamento valida a dependência direta do fenômeno em relação ao comprimento de onda da luz e estabelece o CD como um padrão métrico acessível e eficaz para o ensino prático da difratometria.

Para além da validação instrumental, a abordagem proposta suscita reflexões profundas sobre a epistemologia do laboratório de ensino. Historicamente, as aulas práticas de química e física estruturam-se sob uma lógica de "receita de bolo", onde o estudante apenas reproduz procedimentos para confirmar teorias previamente expostas em aula teórica.¹⁵ A estratégia de validação cruzada entre difratometria e microscopia introduz o aluno na cultura da metrologia científica real, onde discrepâncias entre métodos exigem análise crítica, cálculo de incertezas e revisão de premissas experimentais. O erro experimental deixa de ser um fator de

punição e passa a ser um objeto legítimo de investigação epistemológica.

Figura 5: Análise difratométrica de DVD. (a) Trilhas microscópicas regulares; (b-c) reflexão de lasers vermelho e verde com visualização por aerossol para determinação de ângulos difrativos. Extraído da referência 4.



Os resultados observados na análise da mídia de DVD, vistos na figura 4, demonstram a sensibilidade do método à densidade estrutural da amostra. Devido ao espaçamento mais reduzido entre as trilhas em comparação ao CD, o DVD gera ângulos de difração significativamente maiores, evidenciando a relação inversa entre as dimensões físicas do objeto e a escala do padrão projetado. A comparação entre os lasers também revela a dependência do fenômeno em relação ao comprimento de onda: o feixe vermelho, por possuir maior comprimento de onda, sofre um desvio angular mais acentuado que o verde, validando empiricamente a precisão da Lei de Bragg na caracterização de redes de alta densidade

Sob uma perspectiva crítica autoral, é fundamental destacar que a democratização do acesso a tecnologias analíticas por meio de experimentos de baixo custo cumpre um papel político e social na educação científica.¹² Em um contexto de escassez crônica de recursos em instituições públicas de ensino, a conversão de objetos descartados como mídias ópticas obsoletas em instrumentos de alta precisão pedagógica subverte a lógica do consumo tecnológico passivo. Os discentes deixam de ser meros consumidores de tecnologia educacional e passam a atuar como agentes capazes de decodificar e ressignificar artefatos cotidianos através do método científico.¹²

Ademais, a visualização da difração estabelece bases sólidas para a compreensão de tópicos avançados em ciência dos materiais e nanotecnologia.¹³ A relação inversa entre o tamanho da estrutura e a extensão do padrão de difração é o princípio que rege desde a caracterização de nanopartículas até a análise de defeitos em materiais poliméricos. Ao dominar esses conceitos no ensino básico ou superior introdutório, o estudante desenvolve um repertório conceitual robusto, facilitando a transição para disciplinas analíticas complexas,

como a espectrometria de massas, a ressonância magnética nuclear e a própria difração de raios X avançada.¹⁴

Em suma, a articulação entre teoria ondulatória, instrumentação acessível e validação cruzada configura uma ruptura com o ensino dogmático das técnicas instrumentais. A discussão sublinha que a superação da abstração conceitual na cristalografia não demanda investimentos vultosos, mas sim engenhosidade didática e rigor metodológico, consolidando a experimentação óptica como um eixo estruturante para a alfabetização científica e tecnológica.¹⁵

Conclusões

A análise do trabalho de L. F. Valadares e N. F. Valadares demonstra que a experimentação óptica com recursos de baixo custo constitui uma estratégia pedagógica e metodológica de alto impacto para o ensino de ciências exatas. A validação cruzada entre a difratometria a laser e a microscopia óptica não apenas comprova a viabilidade de mensurações precisas na escala micrométrica, mas também introduz os estudantes nos princípios fundamentais da metrologia científica e da análise de incertezas.

Além disso, a exploração de diferentes simetrias estruturais por meio de grades de transmissão capacita os discentes a visualizarem de forma tangível conceitos abstratos como o espaço recíproco, preenchendo uma lacuna histórica na transição entre a física ondulatória e a cristalografia de raios X. Em última análise, a abordagem defendida reafirma que a superação de barreiras conceituais no ensino de instrumentação analítica exige criatividade pedagógica, valorização da experimentação crítica e o resgate da curiosidade natural inerente ao fazer científico, promovendo uma formação mais emancipatória e integrada.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de observações são de Iago Cezario de Souza.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela oportunidade

concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e Referências

1. B. D. Cullity e S. R. Stock, *Elements of X-Ray Diffraction*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001, pp. 1-45.
2. D. C. Harris, *Análise Química Quantitativa*, LTC, Rio de Janeiro, 2017, pp. 110-135.
3. K. C. de Souza e J. A. P. da Costa, Experimentos de baixo custo para o ensino de óptica geométrica e ondulatória, *Quim. Nova*, 2015, **38**, 1230-1235.
4. L. F. Valadares e N. F. Valadares, Visualizando a difratometria, *Quim. Nova*, 2026, **49**, e-20260005.
5. J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, University Science Books, Sausalito, 1997, pp. 50-88.
6. M. H. Habibe et al., Caracterização estrutural de materiais por difração de raios X em sala de aula, *Rev. Bras. Ensino Fís.*, 2018, **40**, e3501.
7. E. Hecht, *Optics*, Pearson, Boston, 2016, pp. 450-480.
8. D. B. Murphy e M. W. Davidson, *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*, Wiley-Blackwell, Hoboken, 2012, pp. 75-102.
9. L. Bardin, *Análise de Conteúdo*, Edições 70, São Paulo, 2011, pp. 33-60.
10. M. H. S. F. Gil e R. C. L. da Silva, A experimentação no ensino de química: reflexões epistemológicas, *Quim. Nova*, 2017, **40**, 1115-1122.
11. A. Giordan, O papel da experimentação no ensino de ciências, *Quim. Nova Esc.*, 1999, **10**, 43-49.
12. P. Freire, *Pedagogia da Autonomia: Saberes Necessários à Prática Educativa*, Paz e Terra, São Paulo, 1996, pp. 25-50.

13. M. C. S. Minayo, O Desafio do Conhecimento: Pesquisa Qualitativa em Saúde, Hucitec, São Paulo, 2014, pp. 101-140.
14. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Wiley, Hoboken, 2005, pp. 25-60.
15. A. P. Silva e J. P. Ramos, O mito da receita de bolo nas práticas de laboratório, *Quim. Nova*, 2021, **44**, 620-628.

Obtenção de Nanomateriais de Carbono por Arco Elétrico

DOI: 10.5281/zenodo.22310981

Pedro Diniz de Oliveira Veloso^{a*}

Improper plastic disposal generates microplastic pollution, impacting respiratory health and ecosystems. This study critically reviews the recycling of solid plastic waste into carbon nanomaterials, such as graphene, through pyrolysis followed by electric arc discharge. The technical and environmental efficacy of the process is analyzed, demonstrating the conversion of environmental liabilities into high-value products with excellent electrical conductivity. It is concluded that this innovative approach integrates sustainability and materials engineering, mitigating airborne pollution and generating promising technological applications.

O descarte inadequado de plásticos gera poluição por microplásticos, cujos impactos afetam a saúde respiratória e os ecossistemas. Este estudo revisa criticamente a reciclagem de resíduos plásticos sólidos na produção de nanomateriais de carbono, como o grafeno, por meio de pirólise seguida de descarga de arco elétrico. Analisa-se a eficácia técnica e ambiental do processo, que converte um passivo ambiental em produtos de alto valor agregado com elevada condutividade elétrica. Conclui-se que essa abordagem inovadora integra sustentabilidade e engenharia de materiais, atenuando a poluição atmosférica e gerando aplicações tecnológicas promissoras.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: pedrodveloso@gmail.com

Palavras-chave: resíduos plásticos; nanomateriais de carbono; grafeno; microplásticos; sustentabilidade.

Recebido em 16 de Agosto de 2026,

Aceito em 30 de Agosto de 2026,

Publicado em 04 de Setembro de 2026.

Introdução

O acúmulo desordenado de resíduos plásticos representa um dos maiores e mais urgentes desafios ambientais da atualidade. Devido a sua versatilidade, durabilidade e baixo custo de produção, o consumo global de plásticos cresceu exponencialmente nas últimas décadas, resultando em um volume massivo de materiais que frequentemente são descartados de forma inadequada em aterros sanitários ou diretamente no meio ambiente. A degradação lenta desses polímeros agrava severamente a poluição terrestre e aquática, impulsionando a busca científica por tecnologias de reciclagem que não apenas mitiguem o impacto ambiental, mas que também agreguem alto valor econômico aos produtos recuperados.

Nesse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar uma abordagem inovadora, sustentável e economicamente viável para a reciclagem de resíduos plásticos sólidos. O foco central da discussão consiste em explorar métodos eficientes para converter esse passivo ambiental em nanomateriais de carbono, com destaque para a obtenção de estruturas formadoras de grafeno.

A tecnologia aqui avaliada baseia-se na integração de dois processos físico-químicos: primeiramente, a carbonização dos resíduos plásticos por meio de pirólise a 900 °C em um ambiente de nitrogênio e vapor de água, o que gera um material carbonoso poroso. Em seguida, analisa-se a utilização desse material ativado como eletrodo em um sistema de descarga de arco elétrico para a síntese final dos nanomateriais.

Ao contrário dos métodos tradicionais de síntese de grafeno e nanomateriais de carbono — que frequentemente envolvem altos custos operacionais, procedimentos complexos e a utilização de reagentes químicos perigosos —, a via tecnológica discutida se destaca por utilizar resíduos amplamente disponíveis como matéria-prima. Dessa forma, busca-se evidenciar como essa técnica pode solucionar um duplo desafio: atuar como uma alternativa de remediação ecologicamente eficaz para a poluição plástica e, simultaneamente, viabilizar a produção de materiais aplicáveis em setores de engenharia e tecnologia.

Metodologia

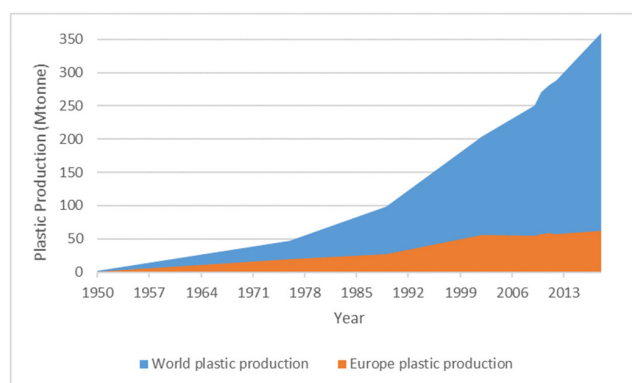
Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e crítico, baseada na análise de artigos científicos recentes voltados à reciclagem de polímeros e aos impactos ambientais dos microplásticos. O estudo fundamenta-se principalmente na pesquisa de Kazankapova et al. (2024), complementada por literaturas secundárias referentes à ocorrência e aos efeitos toxicológicos de polímeros no ar atmosférico. A pesquisa foi conduzida por meio de buscas em bases de dados científicas e plataformas digitais de prestígio, como ScienceDirect e Google Scholar, utilizando o acesso via portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Foram empregadas palavras-chave pertinentes ao tema, selecionando-se trabalhos que permitissem uma correlação direta entre o problema da poluição e as soluções via engenharia de materiais.

Resultados e discussão

O Problema dos Resíduos Plásticos e os Impactos na Saúde

O problema central abordado pelos estudos analisados reside no ciclo de vida e no descarte inadequado de polímeros sintéticos, cuja produção em escala global cresceu de forma desenfreada nas últimas décadas, comportamento que pode ser observado em um gráfico em área na Figura 1.¹

Figura 1. Gráfico em área detalhando o crescimento exponencial da produção global de plásticos de 1950 a 2018. Extraído da referência 1.



Esses polímeros não sofrem biodegradação, fragmentando-se em micro e nanoplásticos.^{1,2} A literatura adverte que os microplásticos estão onipresentes no meio ambiente, contaminando o ar atmosférico de ambientes abertos e, com ainda maior intensidade, de ambientes

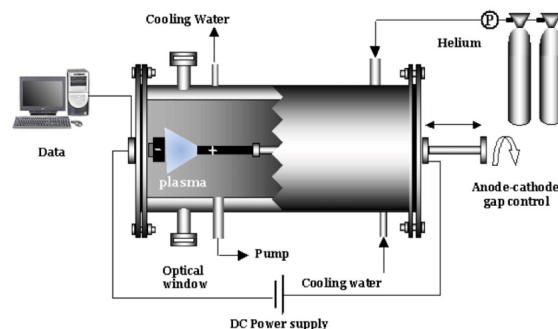
fechados, tornando-se disponíveis para a inalação humana direta.¹ As pesquisas demonstram que as partículas microscópicas podem alcançar os alvéolos pulmonares, causar estresse oxidativo, induzir citotoxicidade e promover a translocação de contaminantes para a corrente sanguínea.¹

Diante desse panorama ambiental e toxicológico alarmante, surge a necessidade urgente de repensar a gestão de resíduos.² Pesquisadores contemporâneos têm direcionado o foco para a reciclagem ecológica por meio da produção de nanomateriais de carbono. Essa perspectiva muda o paradigma de um simples descarte para uma economia circular, em que o resíduo plástico atua como um precursor valioso para a tecnologia de materiais.²

Produção de Materiais de Carbono e Coprodutos

Para concretizar essa transformação, o estudo conduzido por Kazankapova et al. (2024),² que serve como referência explícita para todos os dados e procedimentos discutidos nesta seção, utilizou uma abordagem integrada em duas etapas. Inicialmente, os resíduos foram triturados e submetidos à carbonização e ativação em um forno rotativo de alta temperatura (900 °C) sob atmosfera de nitrogênio e vapor de água, gerando um material carbonoso de estrutura porosa.² Em seguida, esse carvão ativado foi empregado como eletrodo (ânodo) em um sistema de descarga de arco elétrico, cujo esquema representativo pode ser observado na Figura 2.

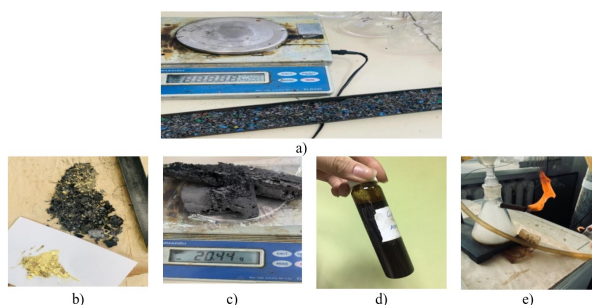
Figura 2. Esquema da instalação e do reator de síntese de nanomateriais por descarga de arco elétrico em atmosfera de hélio. Extraído da referência 2.



Neste reator, a aplicação de uma elevada corrente elétrica (100 A) provocou a evaporação térmica do material em um ambiente inerte de hélio, promovendo a dissipação intensa do carbono e a reorganização estrutural dos nanomateriais em fase plasma.²

Os resultados atestaram a alta eficácia desta via sintética, maximizando a sua viabilidade econômica através da geração de coprodutos valiosos.² Durante o tratamento térmico inicial, observou-se a formação simultânea de gases inflamáveis e matéria orgânica sólida, ilustrados na Figura 3.²

Figura 3. Fotografias dos produtos formados: material de carbono poroso, produto líquido, gás inflamável em combustão e produto orgânico sólido. Extraído da referência 2.



A análise desses coprodutos revelou que a porção gasosa é rica em hidrogênio e metano, que podem ser reutilizados para gerar energia para o próprio aquecimento do forno, aumentando a eficiência do processo.² Por sua vez, a matéria orgânica sólida de coloração branco-amarelada foi identificada por difração de raios-X como sendo composta pelos ácidos tereftálico e sebáico.² A obtenção dessas substâncias é extremamente interessante para a indústria química, uma vez que são compostos-chave na fabricação de poliésteres e resinas.²

Caracterização Estrutural e Elétrica

Para atestar a conversão efetiva do carvão em nanomateriais com conformação grafítica após o uso do arco elétrico, os autores empregaram a espectroscopia Raman, técnica fundamental para avaliar a qualidade e a organização de estruturas de carbono.²

Figura 4. Espectro Raman do resíduo plástico carbonizado e ativado após o método de arco elétrico. Extraído da referência 2.

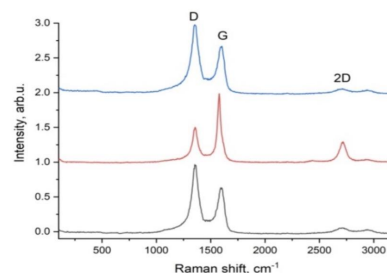
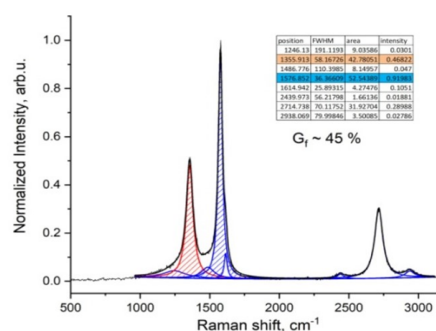


Figura 5. Deconvolução do espectro Raman destacando as áreas e intensidades dos picos D, G e 2D. Extraído da referência 2.



Como demonstrado no espectro geral da Figura 4 e em sua deconvolução analisada na Figura 5, a presença marcante da banda G (em aproximadamente 1576 cm⁻¹) indicou com clareza a formação de uma estrutura grafítica, enquanto a banda 2D (próxima a 2715 cm⁻¹) indicou a presença de grafeno.² Embora a razão de intensidades das bandas (I2D/IG) sugira a presença de folhas de grafeno de poucas camadas ou de camada única, a elevada relação ID/IG e o grau de grafitização global de 45% demonstram que o material obtido ainda apresenta uma quantidade considerável de defeitos estruturais e porções amorfas.² Contudo, esse valor representa uma melhoria estrutural substancial em relação ao carvão precursor, cujo grau era de apenas 29% antes da etapa do arco elétrico.²

Por fim, as avaliações demonstraram que as propriedades do nanomaterial sintetizado são excelentes.² A resistência elétrica do material foi reduzida em cerca de 3,6 vezes após o processamento no arco, adquirindo uma condutividade que se aproxima fortemente à do grafite

comercial.² Esse dado evidencia uma importante vantagem energética do método.² Enquanto a síntese industrial tradicional de grafite demanda o aquecimento global de fornos a temperaturas superiores a 2000 °C, a abordagem proposta utiliza um aquecimento em massa de apenas 900 °C para a etapa inicial de pirólise do precursor plástico.² A energia extremamente alta e necessária para a grafitização subsequente é fornecida de forma puramente localizada e ultrarrápida pelo plasma do arco elétrico, tornando o processo global muito mais viável e economicamente rentável.²

Conclusões

A problemática da poluição por resíduos plásticos, intensificada por fragmentos inaláveis como os micro e nanoplásticos, exige uma transição emergencial de métodos convencionais de descarte para soluções inovadoras de reaproveitamento. Diante disso, a análise dos estudos evidenciou que a engenharia de materiais desempenha um papel fundamental na mitigação desse passivo ambiental.

Verificou-se que a conversão de plásticos em nanomateriais de carbono, por meio da integração entre pirólise e descarga de arco elétrico, apresenta-se como uma técnica de extrema eficácia e de elevado valor agregado. A possibilidade de gerar compostos grafitados, aliada à produção paralela de gases inflamáveis e ácidos orgânicos úteis, demonstra que a sustentabilidade pode estar diretamente alinhada à rentabilidade industrial e ao avanço tecnológico. Além disso, a capacidade de alcançar níveis de condutividade elétrica próximos aos do grafite combinando uma etapa de pirólise a temperaturas mais brandas (900 °C) com a ação localizada do arco elétrico reforça o potencial de eficiência energética da técnica em relação aos métodos industriais convencionais que demandam aquecimento contínuo superior a 2000 °C.

A relevância deste estudo é acentuada pela urgência ditada pelo atual cenário global. O aumento na produção e no consumo de itens descartáveis intensifica a emissão de microplásticos, cujos impactos toxicológicos — sobretudo os relacionados ao trato respiratório e à exposição sistêmica — ainda necessitam de profunda investigação clínica. Sendo assim, tecnologias que consigam não apenas reter, mas transformar o lixo plástico em insumos nobres, possuem uma demanda altíssima, configurando um campo vasto e ainda incipiente na literatura científica aplicada em larga escala.

Por fim, conclui-se que a simbiose entre as ciências químicas, a sustentabilidade e a engenharia de materiais

representam o futuro do desenvolvimento tecnológico. O aprimoramento dessas técnicas de reciclagem promete não só reduzir drasticamente o acúmulo e os riscos associados aos resíduos plásticos, mas também democratizar e baratear a produção de nanomateriais de carbono, beneficiando setores que vão desde a energia até a saúde pública.

Contribuições por Autor

A resenha sobre os artigos em referência e a inclusão de observações pertinentes à sustentabilidade e físico-química são de Pedro Diniz Veloso de Oliveira.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao Grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 A. Torres-Agullo, A. Karanasiou, T. Moreno and S. Lacorte, *The Science of the Total Environment*, 2021, **800**, 149555.
- 2 M. K. Kazankapova, B. T. Yermagambet, Z. T. Dauletzhanova, A. Akshekina, A. B. Malgazhdarova, Z. M. Kassenova and A. K. Kolpek, *Brazilian Journal of Biology*, 2024, **84**, e289382.
- 3 A. Abdulhameed, N. Z. A. Wahab, M. N. Mohtar, M. N. Hamidon, S. Shafie and I. A. Halin, *Journal of Electronic Materials*, 2021, **50**, 3207–3221.
- 4 L. Dai, O. Karakas, Y. Cheng, K. Cobb, P. Chen and R. Ruan, *Chemical Engineering Journal*, 2023, **453**, 139725.
- 5 N. Kaewtrakulchai, A. Putta, W. Pasee, K. Fuangnawakij, G. Panomsuwan and A. Eiad-Ua, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, **540**, 012006.
- 6 J. Lim, S. Bee, L. T. Sin, C. T. Ratnam and Z. A. A. Hamid, *Polymers*, 2021, **13**, 3547.

Potencial energético da biomassa lignocelulósica e otimização da produção de etanol de segunda geração

DOI: 10.5281/zenodo.22312128

Maria Eduarda de Melo Garcia^{a*}

Agricultural waste, such as sugarcane bagasse, has great potential for energy recovery and for the production of second-generation bioethanol. These residues consist mainly of cellulose, hemicellulose, and lignin—components that give the biomass its strength and hinder the release of sugars. Therefore, before ethanol production can begin, preparation and pretreatment steps are necessary to modify the biomass's structure and facilitate access to its fermentable components. Among the techniques discussed, the use of microwaves and ultrasound stands out, as they can help increase the accessibility of cellulose and improve process efficiency. After pretreatment, enzymatic hydrolysis takes place, breaking down the cellulose and releasing sugars, followed by fermentation, in which microorganisms convert these sugars into ethanol. Finally, the ethanol is separated and concentrated through distillation. Thus, the utilization of this waste enables the production of a renewable biofuel, in addition to contributing to waste reduction and a more sustainable use of agricultural biomass.

Resíduos agrícolas, como o bagaço de cana-de-açúcar, apresentam grande potencial para o aproveitamento energético e para a produção de bioetanol de segunda geração. Esses resíduos são formados principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes que conferem resistência à biomassa e dificultam a liberação dos açúcares. Por isso, antes da produção de etanol, é necessário realizar etapas de preparação e pré-tratamento, que modificam a estrutura da biomassa e facilitam o acesso às suas partes fermentescíveis. Entre as técnicas abordadas, destacam-se o uso de micro-ondas e ultrassom, que podem contribuir para aumentar a acessibilidade da celulose e melhorar a eficiência do processo. Após o pré-tratamento, ocorre a hidrólise enzimática, responsável pela quebra da celulose e liberação de açúcares, seguida da fermentação, na qual microrganismos transformam esses açúcares em etanol. Por fim, o etanol é separado e concentrado por meio da destilação. Dessa forma, o aproveitamento desses resíduos possibilita a produção de um biocombustível renovável, além de contribuir para a redução do desperdício e para um uso mais sustentável da biomassa agrícola.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: dudamelog2007@gmail.com

Palavras-chave: Bioetanol; Pré-tratamento físico-químico; Energia; Bagaço de cana-de-açúcar.

Recebido em 16 de agosto de 2026,
Aprovado em 30 agosto de 2026,
Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

Nos últimos anos, a busca por fontes de energia mais sustentáveis e renováveis tem ganhado destaque diante da necessidade de reduzir os impactos ambientais associados às fontes de energia convencionais. Nesse contexto, a biomassa apresenta-se como uma alternativa promissora, por utilizar matéria orgânica que pode ser convertida em energia e outros produtos de interesse. Contudo, para garantir um rendimento eficiente e uma produção satisfatória a partir desses resíduos, é necessário estudar e aplicar pré-tratamentos que favoreçam a fermentação, otimizando, assim, a produção de etanol.

Resíduos agroindustriais, como bagaço de malte, casca de banana e palha de milho, são exemplos de biomassas lignocelulósicas que podem ser aproveitadas para a produção de etanol de segunda geração (E2G). Além de possibilitar a geração de biocombustíveis a partir de fontes renováveis, o aproveitamento desses resíduos contribui para a redução do

seu descarte no meio ambiente e para o uso mais eficiente dos recursos disponíveis.

Para que a produção de etanol de segunda geração seja viável, a biomassa lignocelulósica deve ser submetida a uma etapa de pré-tratamento, responsável por desestruturar sua complexa matriz e romper a barreira formada principalmente por lignina, celulose e hemicelulose. Essa etapa aumenta a acessibilidade dos componentes estruturais da biomassa e favorece a posterior liberação dos açúcares fermentescíveis. Para isso, diferentes métodos de pré-tratamento podem ser empregados, incluindo processos físicos, químicos e físico-químicos, seguidos de etapas como hidrólise e fermentação, que possibilitam a conversão dos carboidratos em etanol.

A pesquisa sobre o aproveitamento energético da biomassa lignocelulósica mostra-se relevante por aliar a produção de fontes renováveis de energia à valorização de

resíduos agroindustriais, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados ao seu descarte.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de diferentes biomassas lignocelulósicas para a produção de etanol de segunda geração, com ênfase na aplicação e otimização de etapas de pré-tratamento capazes de aumentar a disponibilidade dos açúcares fermentescíveis. Dessa forma, busca-se identificar condições que favoreçam o aproveitamento da biomassa e aumentem a eficiência da produção de etanol, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas energéticas mais sustentáveis.

Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, baseada na análise de artigos científicos, livros e documentos técnicos relacionados à área de bioenergia e biocombustíveis. A pesquisa foi realizada por meio de plataformas digitais, como bases de dados acadêmicas e científicas, incluindo Google Acadêmico, CAPES e periódicos especializados, utilizando palavras-chave como “Biomassa”, “Bioetanol” e “Bagaço de cana-de açúcar”, “Pré-tratamento Físico-Químico” bem como suas combinações.

Como critérios de inclusão, foram considerados estudos publicados no período de 2012 a 2024, redigidos em português e inglês, que abordassem a produção de energia através da biomassa e os pré-tratamentos dos resíduos para sua fermentação.

Resultados e discussão

A utilização de resíduos agrícolas como matéria-prima para a produção de biocombustíveis tem ganhado destaque como uma alternativa para o aproveitamento de materiais que, muitas vezes, são descartados ou subutilizados. Esses materiais, denominados biomassa residual, podem apresentar elevado potencial energético e servir como matéria-prima para a produção de combustíveis, como o bioetanol de segunda geração (2G). Diferentemente do etanol convencional, produzido principalmente a partir de matérias-primas ricas em açúcares ou amido, o etanol 2G é obtido a partir de materiais lignocelulósicos, como bagaço e palha de cana-de-açúcar, palha de milho e resíduos florestais.

Antes de compreender o potencial energético da biomassa, é fundamental destacar a importância do aproveitamento e da otimização desses resíduos, uma vez que grande parte deles ainda é descartada ou subutilizada. Nesse sentido, a utilização da biomassa residual como matéria-prima para a produção de bioetanol 2G possibilita agregar valor a materiais que seriam desperdiçados, além de contribuir para a redução de impactos ambientais associados ao seu descarte. Assim, o aproveitamento eficiente desses resíduos representa uma alternativa promissora para ampliar a produção de biocombustíveis e explorar de forma mais sustentável fontes renováveis de energia.

Para compreender o potencial dessas biomassas, é necessário inicialmente conhecer sua composição química e seu conteúdo energético. A biomassa lignocelulósica é constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, além de pequenas quantidades de extrativos, cinzas e outros componentes. A celulose é um polímero formado por unidades de glicose, enquanto a hemicelulose é constituída por diferentes açúcares, como xilose, arabinose, manose e glicose. Já a lignina é um polímero aromático de estrutura complexa que confere resistência e proteção à parede celular vegetal.

Outra propriedade importante para avaliar uma biomassa é o poder calorífico, que corresponde à quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão de uma determinada quantidade de material. Essa propriedade permite avaliar o potencial da biomassa para aplicações energéticas, como a geração de calor e eletricidade. Entretanto, quando o objetivo é produzir bioetanol, não basta analisar apenas o poder calorífico: é fundamental conhecer a quantidade e a disponibilidade dos carboidratos presentes na biomassa, uma vez que são eles que podem ser convertidos em açúcares fermentescíveis e, posteriormente, em etanol.

Figura 1. Composição química de diferentes biomassas lignocelulósicas. Extraído da Referência 2.

Resíduo	Composição Química (%)							Referência
	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos	Cinzas	Pectina	Proteína	
Palha de Milho	36,7	34,2	14,0	11,6	2,3	—	—	Santos, 2014
Sabugo de Milho	35,4	26,9	18,0	18,3	2,4	—	—	Santos, 2014
Casca de Arroz	34,0	13,0	29,0	3,0	17,0	—	2,0	Hickert, 2010
Casca de Soja	35,8	23,1	9,1	5,0	4,0	4,2	15,4	Rojas, 2012
Palha de Trigo	35,1	19,8	18,9	14,2	9,3	—	—	Kaparaku & Felby, 2010; Horst, 2013
Casca de Coco	41,0	21,5	30,6	3,7	6,5	—	—	Esteves, 2014
Palha de Cana-de-açúcar	44,3	31,1	19,0	16,7	4,9	—	—	Wolf, 2011

Apesar de apresentar grande potencial, a biomassa lignocelulósica possui uma estrutura naturalmente resistente à degradação. A celulose encontra-se organizada em regiões parcialmente cristalinas e está associada à hemicelulose e à lignina, formando uma estrutura complexa que dificulta o acesso das enzimas às cadeias de celulose. Dessa forma, não é possível simplesmente adicionar a biomassa a um meio de fermentação e esperar que todo o seu conteúdo de carboidratos seja convertido em etanol. É necessário realizar uma etapa de preparação e pré-tratamento para tornar os componentes estruturais mais acessíveis.

De maneira geral, a produção de bioetanol 2G pode ser dividida em etapas principais: preparação da biomassa, pré-tratamento, hidrólise, fermentação e separação do etanol, geralmente por destilação. Cada uma dessas etapas possui uma função específica e contribui para aumentar a eficiência do processo.

Antes do pré-tratamento propriamente dito, a biomassa pode passar por etapas de preparação. No caso do bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, a lavagem pode ser utilizada para remover açúcares solúveis e outros materiais superficiais que já estavam presentes no resíduo. Essa etapa é importante para que os açúcares posteriormente encontrados possam ser relacionados ao tratamento realizado. Em seguida, a secagem permite reduzir a umidade e trabalhar com uma quantidade conhecida de matéria seca. A moagem reduz o tamanho das partículas, aumentando a área superficial disponível para as etapas seguintes. Por fim, a padronização busca garantir que as amostras apresentem características físicas semelhantes, permitindo uma comparação mais adequada entre os tratamentos.

Após essa preparação, realiza-se o pré-tratamento, cujo objetivo não é necessariamente transformar diretamente a celulose em glicose, mas sim alterar a estrutura da biomassa e aumentar a acessibilidade dos carboidratos às enzimas, uma vez que sua matriz é complexa. Dependendo da metodologia empregada, o pré-tratamento pode promover a ruptura ou alteração da estrutura da lignina, a remoção parcial da hemicelulose, a redução da cristalinidade da celulose e o aumento da área superficial do material. Dessa maneira, a celulose torna-se mais exposta e disponível para a etapa de hidrólise acarretando na melhor otimização destes materiais.

Entre as diferentes tecnologias de pré-tratamento existentes, destacam-se métodos físicos, químicos e físico-químicos. Neste estudo, podem ser considerados, por exemplo, os tratamentos utilizando ultrassom e micro-ondas, que apresentam potencial para modificar a estrutura da biomassa e favorecer a posterior liberação de açúcares.

O ultrassom atua na matriz lignocelulósica por meio de ondas sonoras de alta frequência, que provocam o fenômeno de cavitação acústica no meio líquido. A formação e o colapso dessas microbolhas geram forças mecânicas capazes de romper e desorganizar a estrutura da biomassa, favorecendo a remoção ou desestruturação parcial da lignina e a solubilização da hemicelulose. Como consequência, ocorre o rompimento das interações entre lignina, hemicelulose e celulose, aumentando a porosidade e a área superficial do material. Essa desestruturação torna a celulose mais exposta e acessível, facilitando a ação das enzimas durante a etapa de hidrólise e, conseqüentemente, favorecendo a liberação de açúcares fermentescíveis para a produção de bioetanol de segunda geração.

Já o tratamento por micro-ondas utiliza radiação eletromagnética que interage principalmente com moléculas polares e espécies iônicas presentes na biomassa e no meio de tratamento. Essa interação provoca o aquecimento rápido do material, promovendo alterações na estrutura da matriz lignocelulósica. O aumento da temperatura pode favorecer a ruptura das interações entre lignina, hemicelulose e celulose, contribuindo para a desestruturação da lignina e a solubilização da hemicelulose. Como consequência, a celulose fica mais exposta e acessível, facilitando sua posterior hidrólise e a liberação de açúcares fermentescíveis. Além disso, o aquecimento rápido proporcionado pelas micro-ondas pode reduzir o tempo de pré-tratamento e aumentar a eficiência do processo. Entretanto, é necessário controlar parâmetros como temperatura, tempo de exposição e concentração do meio, pois condições muito severas podem favorecer a degradação dos açúcares e a formação de compostos inibidores, como furfural e HMF.

De acordo com os dados experimentais do artigo referência 1 sobre o pré-tratamento físico-químico do bagaço da cana-de-açúcar, observou-se que no tratamento por micro-ondas, as amostras foram expostas por 10, 20 e 30 minutos, utilizando água destilada ou soluções de ácido sulfúrico nas concentrações de 0,1 M e 1 M. Os melhores resultados foram obtidos com água e H₂SO₄ 0,1 M. Com água, as concentrações de açúcares redutores variaram de 31,2 a

58,0 g de glicose L⁻¹, enquanto os açúcares redutores totais ficaram entre 70,6 e 77,5 g de glicose L⁻¹. Após a fermentação, os destilados apresentaram teores alcoólicos entre 5,5 e 7,5 °GL.

A associação entre micro-ondas e H₂SO₄ 0,1 M também foi eficiente, produzindo entre 50,6 e 54,3 g de glicose L⁻¹ de açúcares redutores e entre 74,8 e 78,8 g de glicose L⁻¹ de açúcares redutores totais. O maior teor alcoólico registrado na tabela foi de 8,6 °GL, obtido após 20 minutos de tratamento. Em contraste, a solução de H₂SO₄ 1 M não apresentou concentrações detectáveis de açúcares e resultou em teor alcoólico inferior a 0,5 °GL, indicando que o aumento da acidez não favoreceu o processo nas condições avaliadas.

Esses resultados demonstram uma relação positiva entre a quantidade de açúcares liberados durante o pré-tratamento e o teor alcoólico obtido após a fermentação. O uso de água com micro-ondas merece destaque por dispensar ácido sulfúrico e, ainda assim, proporcionar concentrações elevadas de açúcares e produção satisfatória de etanol. Isso representa uma possível vantagem ambiental, operacional e econômica, devido à redução do consumo de reagentes químicos e das etapas posteriores de neutralização e tratamento de resíduos.

Já o pré-tratamento por ultrassom apresentou baixa eficiência em todas as condições avaliadas. Os açúcares redutores permaneceram entre 2,0 e 4,9 g de glicose L⁻¹, enquanto os açúcares redutores totais variaram de 3,5 a 4,9 g de glicose L⁻¹. Mesmo com o uso de ácido sulfúrico, não ocorreu aumento relevante na liberação de carboidratos. Como essas concentrações foram insuficientes para viabilizar a fermentação alcoólica, não foi possível produzir etanol nem determinar o teor alcoólico dessas amostras.

A baixa eficiência do ultrassom não significa, necessariamente, que a técnica seja inadequada para a biomassa lignocelulósica. O resultado indica que as condições empregadas — banho ultrassônico de 50 W, temperatura de 27 °C e tempos entre 10 e 30 minutos — provavelmente não forneceram energia suficiente para promover uma desestruturação expressiva do material. A eficiência dessa técnica depende de fatores como potência, intensidade da cavitação, tempo de exposição, temperatura, concentração do solvente, granulometria e proporção entre biomassa e líquido. Portanto, seria necessário otimizar esses parâmetros ou combinar o ultrassom com outros métodos de pré-tratamento.

Em nenhum dos tratamentos foi detectado hidroximetilfurfural (HMF). Esse resultado é positivo, pois o HMF é um produto da degradação dos açúcares e pode atuar como inibidor da fermentação. Assim, embora o ultrassom não tenha promovido liberação suficiente de açúcares, ambos os métodos apresentaram baixa formação de compostos indesejáveis nas condições estudadas.

De forma geral, os resultados indicam que o micro-ondas, principalmente quando associado à água ou ao H₂SO₄ 0,1 M, foi o método mais promissor para o pré-tratamento do bagaço de cana e para a produção posterior de etanol de segunda geração. O ultrassom, por sua vez, necessita de maior otimização antes de ser considerado tecnicamente viável.

Assim, após o pré-tratamento, ocorre a hidrólise enzimática. Nessa etapa, enzimas, principalmente celulasas, atuam sobre as cadeias de celulose, promovendo sua quebra e liberando açúcares menores, principalmente glicose. A hemicelulose também pode ser hidrolisada, liberando outros açúcares, como xilose e arabinose. Portanto, é importante diferenciar as etapas: o pré-tratamento prepara e modifica a estrutura da biomassa, enquanto a hidrólise é responsável pela conversão dos polímeros de carboidratos em açúcares menores e fermentescíveis.

Os açúcares liberados na hidrólise são então utilizados na etapa de fermentação alcoólica. Nesse processo, microrganismos, como leveduras do gênero *Saccharomyces*, metabolizam principalmente a glicose e produzem etanol e dióxido de carbono. Uma das reações simplificadas que representa esse processo é:



Entretanto, em uma biomassa lignocelulósica, a presença de diferentes tipos de açúcares torna o processo mais complexo, pois nem todos os microrganismos utilizados na fermentação convencional conseguem aproveitar eficientemente os açúcares provenientes da hemicelulose, como a xilose. Por isso, a escolha do microrganismo e das condições de fermentação também é um fator importante para aumentar o rendimento do processo.

Por fim, após a fermentação, o meio apresenta etanol diluído juntamente com água e outros componentes. Assim, é

necessária uma etapa de separação e purificação, sendo a destilação uma das técnicas mais utilizadas. Dessa forma, o processo completo pode ser compreendido como uma sequência em que cada etapa possui uma finalidade específica: a preparação torna a biomassa adequada ao processamento; o pré-tratamento rompe ou modifica sua estrutura resistente; a hidrólise libera os açúcares; a fermentação converte esses açúcares em etanol; e, finalmente, a destilação permite sua recuperação e concentração.

Portanto, o aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de bioetanol de segunda geração representa uma alternativa interessante para agregar valor a materiais que seriam descartados, reduzir a dependência de matérias-primas convencionais e contribuir para o aproveitamento mais eficiente dos recursos disponíveis. A eficiência do processo, entretanto, depende diretamente das características da biomassa e das condições utilizadas em cada etapa, especialmente do pré-tratamento, que deve aumentar a disponibilidade dos carboidratos sem provocar perdas excessivas de açúcares ou a formação de compostos que possam inibir a hidrólise e a fermentação.

Conclusões

A produção de bioetanol de segunda geração a partir de resíduos agrícolas apresenta-se como uma alternativa promissora para o aproveitamento de biomassas que, muitas vezes, são descartadas ou subutilizadas. A presença de celulose e hemicelulose nesses materiais demonstra seu potencial como fonte de açúcares fermentescíveis, enquanto o conhecimento de propriedades como o poder calorífico permite avaliar seu potencial energético.

Entretanto, a estrutura resistente da biomassa lignocelulósica representa um dos principais desafios para a obtenção do etanol. Nesse sentido, o pré-tratamento é uma etapa fundamental, pois modifica a estrutura do material e aumenta a acessibilidade da celulose e da hemicelulose às enzimas. Técnicas como o ultrassom e o micro-ondas apresentam potencial para melhorar essa etapa, podendo reduzir o tempo de processamento e favorecer a liberação de açúcares.

Assim, comparando os dois tratamentos abordados diante das condições expostas no experimento, os resultados demonstraram que o pré-tratamento por micro-ondas, especialmente associado à água ou ao H_2SO_4 0,1 M, foi mais

eficiente na liberação de açúcares fermentescíveis e, consequentemente, na produção de etanol de segunda geração, alcançando teor alcoólico de até 8,6 °GL. Em contrapartida, o ultrassom apresentou baixa liberação de açúcares nas condições avaliadas, inviabilizando a fermentação alcoólica. A ausência de HMF em ambos os tratamentos indica baixa formação de compostos inibidores, embora o uso do ultrassom ainda necessite de otimização de seus parâmetros operacionais.

Posteriormente, a hidrólise enzimática possibilita a conversão dos carboidratos estruturais em açúcares fermentescíveis, que podem ser utilizados por microrganismos para a produção de etanol. Assim, a eficiência de todo o processo depende da integração adequada entre as etapas de preparação, pré-tratamento, hidrólise, fermentação e separação.

Dessa forma, o aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de bioetanol 2G contribui não apenas para a geração de uma fonte renovável de energia, mas também para a redução do desperdício e para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis. O estudo e o aprimoramento das condições de pré-tratamento são, portanto, essenciais para aumentar o aproveitamento da biomassa e tornar a produção de bioetanol de segunda geração cada vez mais eficiente e viável.

Contribuições por Autor

A elaboração da resenha dos artigos de referência e a inclusão das observações são de autoria de Maria Eduarda de Melo Garcia.

Conflito de interesse

Não há conflitos de interesse.

Agradecimentos

Ao Grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 T. Liana, M. R. Soares, L. Q. C. Silva, M. A. F. Souza, H. F. P. Costa, S. M and A. R. A. Arana,

Maximizando o etanol de segunda geração a partir de biomassa, *Revista Em Agronegócio E Meio Ambiente*, 2024, 17, e 12577.

- 2 M. S. R. S Rocha, R. M. R. G Almeida and A. J. G. Cruz, Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras, *Engevista*, 2017, 19 e 217-235.
- 3 M. M. S. Cabral, N. K. S. Abud, M. R. S. R. Rocha, R. M. R. G. Almeida and M. A. Gomes, Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos, *Engevista*, 2017, 19 e 99-108.
- 4 K. Bes, J. S. Lemões, C. F. L. Silva and S. D. A. Silva, Extração e caracterização da lignina proveniente do pré-tratamento de biomassa para produção de etanol de 2º geração, *SciELO*, 2019, 24 e 55-56.
- 5 F. A. Santos, J. H. Queiroz, J. L. Colodette, M. Manfredi, M. E. L. R. Queiroz, C. S. Caldas and F. E. F. Soares, *SciELO*, Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico, 2013, 37, 56-62.

Síntese verde de Carbon Dots obtidos de resíduos vegetais: Uma revisão das propriedades fotofísicas

DOI: 10.5281/zenodo.22310985

João Luiz Dias Grilo Carvalho Formiga^{a*}

The growing interest in sustainable nanomaterials has encouraged the use of plant biomass as a renewable carbon source for Carbon Dots (CDs). This review discusses the green synthesis of CDs from plant residues, highlighting the main production methods, biomass sources, photophysical properties, and reported applications. The reviewed studies indicate that fruit peels, coffee grounds, and sugarcane bagasse are promising precursors for obtaining fluorescent Carbon Dots. These findings reinforce the potential of green synthesis for producing functional nanomaterials applied in sensing, bioimaging, photocatalysis, and environmental monitoring.

O crescente interesse por nanomateriais sustentáveis tem impulsionado o uso de biomassas vegetais como fontes renováveis de carbono para a obtenção de Carbon Dots (CDs). Esta revisão aborda a síntese verde desses nanomateriais a partir de resíduos vegetais, destacando os principais métodos de produção, as biomassas utilizadas, as propriedades fotofísicas e as aplicações descritas na literatura. Os estudos analisados indicam que cascas de frutas, borra de café e bagaço de cana-de-açúcar são precursores promissores para a obtenção de Carbon Dots fluorescentes. Esses resultados reforçam o potencial da síntese verde para o desenvolvimento de nanomateriais aplicados em sensores, bioimagem, fotocatalise e monitoramento ambiental.

Palavras-chave: Carbon Dots; biomassa; síntese verde; fluorescência.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: jldgc.formiga@gmail.com

Recebido em 10 de agosto de 2026,

Aceito em 30 de agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

O aumento da geração de resíduos provenientes das atividades agrícolas e agroindustriais tem estimulado o desenvolvimento de alternativas capazes de promover o reaproveitamento desses materiais de forma sustentável. Nesse contexto, a Economia Circular propõe a utilização mais eficiente dos recursos naturais por meio da reutilização de matérias-primas, da redução do desperdício e da valorização de resíduos anteriormente considerados sem valor econômico.¹

Essa abordagem tem contribuído para o desenvolvimento de novos processos voltados à obtenção de materiais de maior valor agregado, fortalecendo práticas alinhadas ao desenvolvimento sustentável. Paralelamente, a Química Verde tem impulsionado a busca por processos químicos mais eficientes e ambientalmente responsáveis, incentivando a utilização de matérias-primas renováveis, a redução do consumo energético e a minimização da geração de substâncias perigosas.²

Entre os materiais produzidos por rotas sustentáveis destacam-se os nanomateriais de carbono, especialmente os Carbon Dots (CDs), que vêm recebendo crescente atenção devido às suas propriedades ópticas e ao seu amplo potencial de aplicação. Os Carbon Dots constituem nanopartículas

carbonáceas fluorescentes, geralmente com dimensões inferiores a 10 nm, caracterizadas por boa solubilidade em água, estabilidade química, baixa toxicidade e facilidade de funcionalização superficial.^{3,4}

Essas características possibilitam aplicações em diferentes áreas do conhecimento, incluindo sensores químicos e biológicos, bioimagem, monitoramento ambiental, fotocatalise, nanomedicina e dispositivos optoeletrônicos.^{5,6}

Nos últimos anos, diversos estudos passaram a utilizar resíduos vegetais como fonte de carbono para obtenção desses nanomateriais. Cascas de frutas, bagaço de cana-de-açúcar, borra de café, folhas, sementes e outros resíduos lignocelulósicos apresentam elevada concentração de compostos orgânicos capazes de participar dos processos de desidratação, condensação e carbonização envolvidos na formação dos Carbon Dots.^{4,7}

Além de reduzir os custos de produção, essa estratégia contribui para a valorização de resíduos agroindustriais e está relacionada aos princípios da Química Verde e da Economia Circular. A diversidade química das biomassas também favorece a obtenção de nanopartículas contendo diferentes grupos funcionais superficiais, que influenciam diretamente seu comportamento óptico.

Entre as diferentes rotas de obtenção, a síntese hidrotermal destaca-se pela simplicidade operacional, pelo baixo custo e pela utilização de água como principal meio reacional. Outros métodos, como síntese assistida por micro-ondas, pirólise, carbonização direta e tratamentos eletroquímicos, também são descritos na literatura.^{4,5}

A escolha do precursor e das condições de síntese influencia diretamente parâmetros como tamanho das nanopartículas, organização do núcleo carbonáceo, composição superficial, rendimento quântico e intensidade de fluorescência. Pequenas alterações nas condições reacionais podem resultar em mudanças significativas no comportamento fotoluminescente dos materiais.⁸

Embora o número de estudos envolvendo Carbon Dots derivados de biomassa tenha aumentado, as informações ainda se encontram distribuídas entre diferentes resíduos vegetais, métodos de síntese e aplicações. Essa diversidade dificulta uma visão integrada sobre a influência do precursor e do método de produção nas propriedades fotofísicas dos materiais.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo revisar a literatura sobre a síntese verde de Carbon Dots obtidos a partir de resíduos vegetais, discutindo os principais métodos de produção, as biomassas utilizadas e a influência desses fatores sobre suas propriedades fotofísicas e aplicações.

Metodologia

O presente trabalho consiste em uma revisão narrativa da literatura sobre a síntese verde de Carbon Dots obtidos a partir de resíduos de origem vegetal e suas propriedades fotofísicas. A pesquisa bibliográfica foi realizada mediante consulta a artigos científicos, livros e documentos técnicos disponíveis em bases como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar e SciELO.

Foram empregados os descritores Carbon Dots, Green Synthesis, Biomass, Plant Waste, Agricultural Residues, Fluorescence e Photophysical Properties, bem como seus correspondentes em português. Foram priorizadas publicações relacionadas à obtenção de Carbon Dots por rotas sustentáveis que utilizassem resíduos vegetais como precursores carbonáceos.

Os trabalhos selecionados foram analisados quanto aos tipos de biomassa utilizados, aos métodos de síntese empregados, às propriedades ópticas e fotofísicas descritas e às

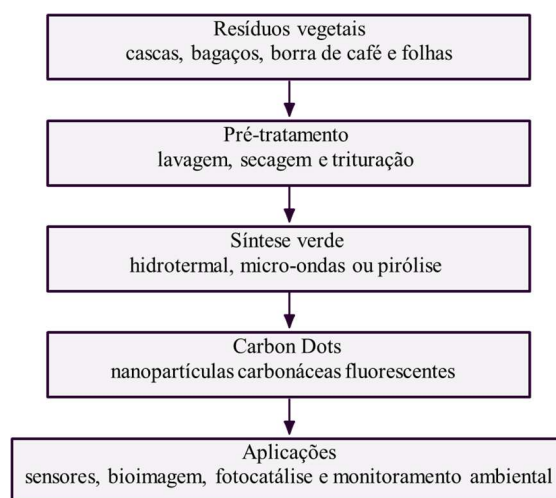
principais aplicações relatadas. Posteriormente, as informações foram organizadas de forma descritiva e comparativa.

Resultados e discussão

A obtenção de Carbon Dots por rotas sustentáveis representa uma das principais tendências da nanotecnologia aplicada à Química Verde. Diferentemente de algumas sínteses convencionais, que podem empregar precursores sintéticos ou reagentes de maior impacto ambiental, a síntese verde utiliza matérias-primas renováveis e abundantes, favorecendo o aproveitamento de resíduos agrícolas e agroindustriais.^{2,7}

Os resíduos vegetais apresentam composição rica em celulose, hemicelulose, lignina, amido, pectinas, açúcares e compostos fenólicos. Durante a síntese, esses constituintes sofrem reações de desidratação, condensação, aromatização e carbonização, resultando na formação de núcleos carbonáceos recobertos por grupos funcionais superficiais.^{4,5}

Figura 1. Esquema simplificado da síntese verde de Carbon Dots a partir de resíduos vegetais e de suas principais aplicações. Feito pelo autor com base nas referências 4,5,6 e 7.



A Tabela 1 reúne exemplos representativos de resíduos vegetais, constituintes predominantes e métodos de síntese descritos na literatura. As aplicações apresentadas devem ser entendidas apenas como exemplos relatados para determinadas condições experimentais, e não como associações exclusivas entre um precursor e uma aplicação. Em princípio, Carbon Dots obtidos de diferentes biomassas podem ser direcionados a sensores, bioimagem, fotocatalise ou monitoramento ambiental, dependendo principalmente de suas propriedades fotofísicas, da funcionalização superficial e das condições de síntese.

Tabela 1. Exemplos de resíduos vegetais empregados como precursores para obtenção de Carbon Dots e aplicações relatadas em diferentes estudos. As aplicações não representam relações exclusivas com cada precursor. Feito pelo autor com base nas referências 4,5,6 e 7.

Resíduo	Constituintes	Método	Aplicações relatadas
Casca de banana	Celulose, amido e lignina	Hidrotermal	Sensores e bioimagem
Casca de laranja	Pectina, açúcares e celulose	Hidrotermal	Sensores e bioimagem
Borra de café	Compostos aromáticos e polissacarídeos	Hidrotermal	Sensores químicos e bioimagem
Bagaço de cana	Celulose, hemicelulose e lignina	Hidrotermal	Sensores e fotocatalise
Folhas vegetais	Celulose e compostos fenólicos	Micro-ondas ou hidrotermal	Sensores e monitoramento ambiental

A rota hidrotermal é uma das mais empregadas para a conversão da biomassa em Carbon Dots. Nesse processo, o resíduo vegetal é disperso em água e aquecido em recipiente fechado, sob pressão autogerada. As condições de temperatura e tempo favorecem a degradação dos constituintes da biomassa e a reorganização das espécies carbonáceas.^{4,6}

A síntese assistida por micro-ondas também apresenta destaque, pois permite aquecimento rápido e redução do tempo de reação. A pirólise e a carbonização direta podem produzir estruturas com maior grau de carbonização, embora possam exigir temperaturas mais elevadas e controle rigoroso das condições experimentais.^{5,7}

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, as etapas gerais envolvidas na obtenção sustentável de Carbon Dots a partir de resíduos vegetais, desde a seleção da biomassa até suas principais aplicações.

A composição química do resíduo influencia as características finais dos materiais obtidos. Precursores ricos em açúcares e pectinas podem favorecer processos de desidratação e formação de estruturas fluorescentes, enquanto biomassas com maior teor de lignina podem originar domínios carbonáceos mais aromáticos. Entretanto, essa relação não é absoluta, pois as propriedades finais também dependem das

condições de reação, da purificação e do tratamento superficial.⁸

As propriedades fotofísicas constituem uma das principais razões para o interesse nos Carbon Dots. Em geral, esses nanomateriais apresentam absorção na região do ultravioleta e emissão na região do visível. As bandas de absorção são frequentemente associadas às transições $\pi \rightarrow \pi^*$ das ligações C=C e $n \rightarrow \pi^*$ relacionadas a grupos carbonila e outros grupos superficiais contendo oxigênio.^{4,6}

Um parâmetro importante para comparar o desempenho fotofísico dos Carbon Dots é o rendimento quântico de fluorescência (*quantum yield*, QY), definido como a razão entre o número de fótons emitidos e o número de fótons absorvidos. O QY indica, portanto, a eficiência do processo de emissão. A literatura mostra grande variação desse parâmetro entre CDs produzidos a partir de diferentes precursores e condições experimentais, o que dificulta a comparação direta entre materiais. Essa variação está associada ao método de síntese, ao grau de carbonização, à distribuição de tamanhos, aos defeitos e à composição química da superfície.^{4,5,8} Assim, mais do que associar um valor de QY a um tipo específico de biomassa, é necessário considerar conjuntamente as condições de preparação e caracterização empregadas em cada estudo.

A fluorescência também pode apresentar dependência em relação ao comprimento de onda de excitação. Entretanto, a origem dessa emissão ainda é discutida e diferentes mecanismos são propostos na literatura. Uma hipótese relaciona a emissão ao tamanho dos domínios carbonáceos e a efeitos de confinamento quântico, nos quais alterações nas dimensões das regiões conjugadas modificam os níveis de energia. Outra interpretação atribui papel predominante aos estados de superfície, formados por defeitos e por grupos funcionais com diferentes ambientes eletrônicos. Nessa situação, diferentes comprimentos de onda de excitação podem favorecer estados emissivos distintos.³⁻⁵

Essas hipóteses não são necessariamente excludentes. Em Carbon Dots obtidos de biomassa, a heterogeneidade do precursor pode gerar simultaneamente domínios carbonáceos de diferentes tamanhos e uma grande variedade de grupos funcionais superficiais. Por isso, a fotoluminescência pode resultar da contribuição combinada do núcleo carbonáceo, de defeitos estruturais e de estados de superfície. Essa multiplicidade ajuda a explicar por que materiais sintetizados a partir de um mesmo tipo de resíduo podem apresentar respostas ópticas diferentes quando as condições de síntese são modificadas.^{5,8}

Os grupos hidroxila, carbonila, carboxila e amina contribuem para a dispersibilidade em água e para a formação de estados superficiais capazes de participar dos processos de emissão luminosa. Dessa forma, a funcionalização da superfície e a presença de heteroátomos podem modificar o rendimento quântico, a estabilidade e a cor da fluorescência.^{3,7}

As características ópticas dos Carbon Dots ampliam suas possibilidades de aplicação. Em sensores fluorescentes, a interação com íons metálicos ou moléculas orgânicas pode provocar redução ou aumento da emissão, permitindo a detecção de diferentes analitos. Na bioimagem, a fluorescência e a dispersibilidade em água favorecem o uso como marcadores celulares.^{5,6}

A toxicidade, entretanto, precisa ser analisada com cautela. Embora diversos trabalhos descrevam CDs como materiais de boa biocompatibilidade ou de baixa citotoxicidade em condições específicas, os resultados não devem ser generalizados para todos os Carbon Dots derivados de biomassa. A resposta biológica pode variar com o tamanho das partículas, a composição do núcleo, os grupos funcionais presentes na superfície, a concentração empregada, o tempo de exposição e o tipo de célula ou organismo avaliado. Dessa forma, a possibilidade de aplicações biológicas exige estudos toxicológicos específicos para cada material, especialmente antes de aplicações *in vivo*.⁵⁻⁷

Na área ambiental, esses materiais podem participar de sistemas para detecção de contaminantes e processos fotocatalíticos. Também são investigados em células solares, diodos emissores de luz e materiais de conversão de energia. Contudo, muitas dessas aplicações ainda permanecem restritas à escala laboratorial.^{6,7}

Entre os desafios descritos na literatura, destaca-se a ausência de padronização das sínteses. A composição natural dos resíduos pode variar conforme espécie, origem, maturação e armazenamento. Além disso, diferenças de temperatura, tempo, pH e purificação dificultam a comparação direta entre os materiais produzidos.⁸

A ampliação da produção também exige estudos sobre rendimento, reprodutibilidade, estabilidade, toxicidade e destino ambiental dos Carbon Dots. Em particular, ainda são necessários protocolos mais comparáveis para determinação do rendimento quântico e avaliações toxicológicas que considerem dose, tempo de exposição e composição superficial. Assim, embora os resíduos vegetais apresentem grande potencial como fontes renováveis de carbono, o

desenvolvimento de protocolos padronizados permanece necessário para a aplicação desses materiais em maior escala.⁷

Conclusões

A revisão da literatura evidenciou que a síntese verde de Carbon Dots utilizando resíduos de origem vegetal representa uma estratégia sustentável para obtenção de nanomateriais fluorescentes. O aproveitamento de cascas de frutas, bagaço de cana-de-açúcar, borra de café, folhas e outros resíduos permite converter materiais de baixo valor econômico em produtos com propriedades ópticas e químicas de interesse científico e tecnológico.

A composição química do precursor vegetal e o método de síntese exercem influência sobre as características estruturais e fotofísicas dos Carbon Dots, refletindo na absorção, fluorescência e no rendimento quântico. Entre as rotas descritas, a síntese hidrotermal apresenta destaque pela simplicidade operacional, pelo baixo custo e pela utilização de água como meio reacional.

As principais aplicações identificadas envolvem sensores fluorescentes, bioimagem, monitoramento ambiental, foto-catálise e dispositivos optoeletrônicos. Apesar desse potencial, a literatura também evidencia limitações importantes. A ausência de padronização dos métodos de síntese dificulta a comparação entre estudos e afeta a reprodutibilidade dos resultados. Também permanecem necessários estudos mais consistentes sobre a estabilidade dos materiais ao longo do tempo, seu comportamento em diferentes condições de armazenamento e uso, bem como avaliações de toxicidade que permitam estabelecer com maior segurança sua aplicação em sistemas biológicos e ambientais.

Outro desafio está relacionado à ampliação da produção. Grande parte dos trabalhos ainda é conduzida em escala laboratorial, e a passagem para escalas maiores exige controle das características da biomassa, do rendimento do processo e das propriedades fotofísicas do produto final. Assim, a consolidação tecnológica dos Carbon Dots derivados de resíduos vegetais depende do avanço simultâneo em padronização, reprodutibilidade, estabilidade, segurança e escalonamento.

Em síntese, os Carbon Dots derivados de resíduos vegetais apresentam potencial para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e de alto valor agregado, aproximando a nanotecnologia dos princípios da Química Verde e da Economia Circular. Entretanto, a superação das limitações

identificadas na literatura será fundamental para ampliar a confiabilidade e a aplicação prática desses nanomateriais.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de João Luiz Dias Grilo Carvalho Formiga.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Agradeço também ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e Referências

- 1 Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy*, Ellen MacArthur Foundation, Cowes, 2013.
- 2 P. T. Anastas e J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, New York, 1998.
- 3 S. N. Baker e G. A. Baker, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2010, **49**, 6726–6744
- 4 Y. Wang e A. Hu, *J. Mater. Chem. C*, 2014, **2**, 6921–6939.
- 5 S. Y. Lim, W. Shen e Z. Gao, *Chem. Soc. Rev.*, 2015, **44**, 362–381
- 6 L. Cui, X. Ren, M. Sun, H. Liu e L. Xia, *Nanomaterials*, 2021, **11**, 3419
- 7 P. Kumar et al., *Mater. Today Chem.*, 2022, **24**, 100876.
- 8 T. Garcia-Millan et al., *Nanoscale*, 2022, **14**.

Soluções analíticas aplicadas à desinfecção de efluentes de ETEs por radiação ultravioleta

DOI: 10.5281/zenodo.22311138

Julia Ribeiro Dias^{a*}

The microbiological quality of treated effluents is an important aspect of the efficiency of wastewater treatment plants, particularly regarding the reduction of microorganisms in the final effluent. In this context, ultraviolet radiation stands out as a disinfection alternative capable of promoting microbial inactivation without the addition of chemical agents. Its efficiency is related to the characteristics of the effluent and the application conditions, being influenced by parameters such as suspended solids, turbidity, absorbance, dose, and exposure time. The results analyzed demonstrated significant reductions in total coliforms and *Escherichia coli* after the application of ultraviolet radiation. The analysis also highlighted the importance of physicochemical and microbiological monitoring for defining appropriate operating conditions. Therefore, the integration of effluent characterization, ultraviolet radiation application, and analytical monitoring can contribute to improving disinfection efficiency and the quality of the treated effluent.

A qualidade microbiológica dos efluentes tratados é um importante aspecto para a eficiência das estações de tratamento de esgoto (ETEs), especialmente quanto à redução de microrganismos no efluente final. Nesse contexto, a radiação ultravioleta (UV) destaca-se como uma alternativa de desinfecção capaz de promover a inativação microbiológica sem a adição de agentes químicos. Sua eficiência está relacionada às características do efluente e às condições de aplicação, sendo influenciada por parâmetros como sólidos suspensos, turbidez, absorbância, dose e tempo de exposição. Os resultados analisados demonstraram reduções significativas de coliformes totais e *Escherichia coli* após a aplicação da radiação ultravioleta. A análise também evidenciou a importância do monitoramento físico-químico e microbiológico para a definição de condições operacionais adequadas. Dessa forma, a integração entre caracterização do efluente, aplicação da radiação ultravioleta e monitoramento analítico pode contribuir para o aprimoramento da eficiência da desinfecção e da qualidade do efluente tratado.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: juliariberdias@gmail.com

Palavras-chave: Radiação ultravioleta; tratamento de efluentes; desinfecção; estações de tratamento de esgoto.

Recebido em 16 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 de agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

A crescente geração de águas residuárias e a necessidade de preservação dos recursos hídricos tornam o tratamento adequado dos efluentes uma etapa fundamental para a proteção ambiental e da saúde pública. As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) são responsáveis pela remoção de diferentes contaminantes presentes nos esgotos antes de seu lançamento no ambiente. Entretanto, mesmo após as etapas convencionais de tratamento, o efluente final pode apresentar microrganismos capazes de comprometer sua qualidade microbiológica, tornando necessária, em determinadas situações, a aplicação de processos complementares de desinfecção.^{4,5}

Nesse contexto, a radiação ultravioleta (UV) destaca-se como uma alternativa de tratamento terciário para a desinfecção de efluentes. Seu mecanismo de ação ocorre por meio de alterações fotoquímicas no material genético dos microrganismos, provocando danos ao DNA e ao RNA e, consequentemente, impedindo sua reprodução e promovendo sua inativação. Além disso, diferentemente de processos

químicos como a cloração, a utilização da radiação UV não exige a adição de produtos químicos ao efluente nem produz um residual de desinfetante no meio.^{1,2,6,7}

Entretanto, a eficiência da radiação ultravioleta não depende exclusivamente da dose aplicada. As características do efluente também podem interferir na penetração da radiação e, consequentemente, na inativação dos microrganismos. A presença de sólidos suspensos, por exemplo, pode reduzir a quantidade de radiação efetivamente disponível no meio líquido. Estudos realizados com efluentes submetidos à radiação UV demonstram que o aumento da concentração de sólidos suspensos pode provocar uma redução significativa da dose média recebida pelo efluente.^{1,2,3}

Dessa forma, o monitoramento por meio de análises físico-químicas e microbiológicas torna-se fundamental para avaliar as condições do efluente e determinar a eficiência do processo de desinfecção. Parâmetros como sólidos suspensos, turbidez, absorbância e indicadores microbiológicos podem auxiliar na compreensão da relação entre as características do efluente e o desempenho da radiação UV.^{1,2,3}

O artigo de referência avaliou a aplicação da radiação ultravioleta na desinfecção do efluente final de uma estação de tratamento, investigando sua capacidade de inativação de microrganismos e relacionando a eficiência do processo às características do efluente analisado.¹

Diante disso, esta resenha crítica tem como objetivo analisar o uso da radiação ultravioleta na desinfecção de efluentes de ETEs, destacando a importância das soluções analíticas para o monitoramento e a avaliação da eficiência do processo, utilizando trabalhos complementares para ampliar a discussão sobre os fatores que influenciam a desinfecção por UV.

Metodologia

No presente trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de analisar a utilização da radiação ultravioleta na desinfecção de efluentes provenientes de estações de tratamento de esgoto (ETEs). A pesquisa foi direcionada a estudos relacionados à aplicação da radiação UV no tratamento e na desinfecção de efluentes.

Para a realização das buscas, foram utilizadas as palavras-chave “radiação UV”, “tratamento de efluentes”, e “desinfecção por ultravioleta”. As pesquisas foram realizadas nas plataformas Google Acadêmico, Portal de Periódicos CAPES e SciELO, sendo selecionados artigos científicos e trabalhos acadêmicos relevantes para a fundamentação e discussão do tema.

O artigo referência avaliou a eficiência da radiação ultravioleta na desinfecção de efluentes tratados, relacionando a aplicação da radiação à qualidade microbiológica do efluente. O estudo foi analisado considerando as características do efluente, os parâmetros utilizados para sua caracterização e os resultados obtidos após a aplicação da radiação UV, incluindo análises de coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez, sólidos suspensos, sólidos totais, pH e absorvância em 254 nm.

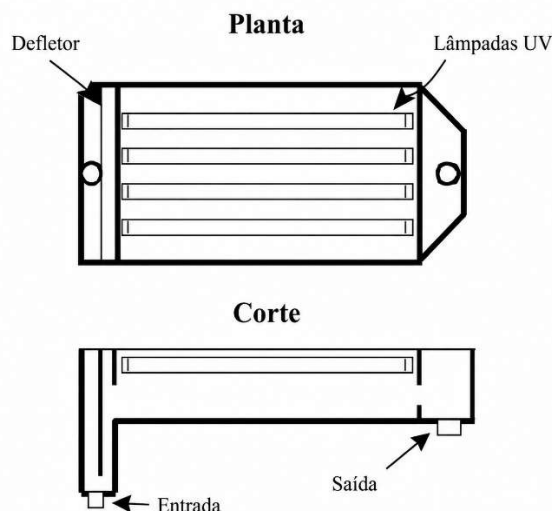
Resultados e discussão

Configuração do sistema e caracterização do efluente

O estudo de Millek *et al.* foi realizado em uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel, com vazão média de aproximadamente 5.000 m³. d⁻¹. O sistema de tratamento era composto por etapas de tratamento preliminar, primário e secundário, sendo a radiação ultravioleta avaliada como uma etapa complementar para a desinfecção do efluente final. As amostras utilizadas nos ensaios foram coletadas após

o tratamento convencional e submetidas a diferentes condições de exposição à radiação UV.¹

Figura 1. Representação esquemática de reator UV. Adaptado da referência 2.



A configuração de um sistema de desinfecção por radiação ultravioleta é um fator importante para compreender a eficiência do processo, uma vez que características como a geometria do reator, a altura da lâmina líquida e o tempo de exposição podem influenciar a dose de radiação efetivamente recebida pelo efluente. No estudo de Millek *et al.*, especificamente, foram avaliadas lâminas líquidas de 4 e 8 cm e tempos de exposição de 30 s, 60 s e 90 s, permitindo a comparação entre diferentes condições de operação.¹

A eficiência de um processo de desinfecção por radiação ultravioleta está diretamente relacionada às características do efluente que será submetido ao tratamento. Por esse motivo, antes da aplicação da radiação, é necessário conhecer parâmetros capazes de indicar a qualidade físico-química e microbiológica do efluente. No estudo, foram analisados coliformes totais, *Escherichia coli*, absorvância em 254 nm, sólidos totais, sólidos suspensos totais, turbidez e pH. O efluente apresentou, em média, $8,05 \times 10^3$ UFC/100 mL de coliformes totais e $4,40 \times 10^2$ UFC/100 mL de *E. coli*, enquanto a concentração média de sólidos suspensos totais foi de apenas 1,65 mg/L e a turbidez de 5,12 uT. Esses resultados indicaram que o efluente apresentava características favoráveis à aplicação da radiação UV.¹

A escolha desses parâmetros evidencia a importância das análises físico-químicas e microbiológicas para o controle do processo. Enquanto os indicadores microbiológicos permitem avaliar diretamente a eficiência da desinfecção,

parâmetros como turbidez, sólidos suspensos e absorvância auxiliam na compreensão da quantidade de radiação capaz de atravessar o efluente. Dessa forma, a caracterização deve ser realizada antes da aplicação da UV, permitindo identificar condições que possam limitar a eficiência da desinfecção. Essa relação é particularmente importante porque partículas presentes no efluente podem absorver ou dispersar a radiação e ainda proteger fisicamente os microrganismos da exposição.^{1,2,6}

Um dos parâmetros de destaque nesse contexto é a absorvância em 254 nm, comprimento de onda associado à ação germicida da radiação UV. A absorvância média do efluente foi de 0,604, sendo considerada no cálculo da intensidade média efetiva da radiação. Esse resultado evidencia que a dose aplicada na superfície do líquido não corresponde necessariamente à dose que efetivamente alcança os microrganismos no interior do efluente, uma vez que ocorre atenuação da radiação ao atravessar a massa líquida.¹

Influência da dose de radiação na desinfecção

A dose de radiação ultravioleta é um dos principais fatores relacionados à eficiência da desinfecção e pode ser compreendida como o produto entre a intensidade da radiação e o tempo de exposição. Assim, o aumento do tempo de contato com a radiação, mantendo-se as demais condições, tende a proporcionar uma maior dose acumulada e, conseqüentemente, maior possibilidade de inativação dos microrganismos. No estudo de Millek *et al.* (2021), foram avaliados tempos de exposição de 30 s, 60 s e 90 s, correspondendo a diferentes doses médias efetivas de UV para as duas alturas de lâmina líquida estudadas.^{1,3,7}

Os resultados demonstraram uma relação clara entre o aumento da dose e a redução da concentração dos microrganismos indicadores. Para uma lâmina líquida de 4 cm, a exposição de 90 s, correspondente a uma dose média efetiva de 92,7 mJ/cm², promoveu uma inativação média de 2,94 log para coliformes totais e 2,41 log para *E. coli*. Para a lâmina de 8 cm, a dose média efetiva de 45,9 mJ/cm², também aplicada durante 90 s, resultou em inativação de 2,08 log para coliformes totais e 2,36 log para *E. coli*. Portanto, os resultados confirmam que a aplicação de doses adequadas de UV pode produzir reduções microbiológicas expressivas em efluentes tratados.^{1,2}

A comparação com outros estudos reforça essa tendência. Millek *et al.* (2021) observaram que seus resultados foram semelhantes aos encontrados por Souza *et al.* (2012), que alcançou aproximadamente 3 unidades logarítmicas de

inativação de coliformes totais utilizando uma dose de 95,13 mJ/cm² em efluente sanitário tratado biologicamente. Os autores também relacionaram seus resultados aos dados apresentados por Lazarova *et al.* (1999), que relataram reduções de 3 a 5 unidades logarítmicas de coliformes totais para doses entre 30 e 45 mJ/cm² em determinados efluentes provenientes de tratamento secundário. Entretanto, no estudo de 2021, uma dose de 30,9 mJ/cm² resultou em uma redução de apenas 1,09 unidade logarítmica de *E. coli*, valor inferior ao observado por Lazarova *et al.* (1999) para uma faixa de dose semelhante. Essa diferença evidencia que a eficiência da desinfecção por radiação UV não depende exclusivamente da dose aplicada, mas também das características do efluente, do microrganismo avaliado e das condições operacionais do processo.^{1,6,7}

Outro resultado relevante foi obtido com apenas 30 s de exposição. Para a lâmina de 4 cm, a dose média efetiva de 30,9 mJ/cm² proporcionou inativação média de 1,09 log de *E. coli*. Embora esse resultado seja inferior ao observado para tempos maiores, ele demonstra que a desinfecção não depende necessariamente de períodos prolongados de exposição para produzir uma redução significativa da carga microbiológica. Em uma aplicação industrial, essa relação é particularmente importante, pois tempos menores podem representar maior capacidade de tratamento e menor necessidade de volume de reator, desde que os padrões de qualidade requeridos sejam atendidos.¹

Influência da qualidade do efluente

Embora o aumento da dose tenha apresentado influência importante sobre a inativação dos microrganismos, os resultados da literatura mostram que não é adequado considerar a dose de UV como uma variável isolada. A qualidade do efluente exerce papel fundamental na quantidade de radiação efetivamente disponível para os microrganismos. A presença de sólidos suspensos pode provocar o espalhamento e a absorção da radiação, além de possibilitar que partículas atuem como uma barreira física, protegendo os microrganismos. Estudos anteriores demonstram que tanto a concentração quanto o tamanho das partículas podem influenciar a eficiência da desinfecção.^{1,2,6}

Essa questão pode ser observada de maneira bastante clara quando se comparam efluentes com diferentes concentrações de sólidos suspensos. Em estudos realizados por Oliveira (2003), amostras com concentração média de 7,5 mg/L de sólidos suspensos apresentaram uma diferença relativamente pequena entre a dose superficial e a dose média efetivamente recebida. Já em amostras contendo

aproximadamente 215 mg/L de sólidos suspensos, uma dose superficial de 100 mJ/cm² resultou em uma dose média de apenas 30 mJ/cm². Segundo o estudo, essa diferença significa que uma concentração elevada de sólidos pode exigir uma quantidade significativamente maior de energia para alcançar uma eficiência de desinfecção semelhante.²

Quando esse resultado é comparado ao estudo de Millek *et al.* (2021), observa-se uma condição bastante favorável para a utilização da radiação UV. O efluente analisado apresentou concentração média de sólidos suspensos de apenas 1,65 mg/L, valor consideravelmente baixo. Os próprios autores concluíram que as características do efluente eram compatíveis com a aplicação da radiação UV, justamente em razão dos baixos valores de sólidos suspensos presentes após o tratamento secundário. Portanto, os resultados reforçam que uma etapa eficiente de tratamento anterior à desinfecção pode contribuir significativamente para o desempenho do processo de UV.¹

Essa constatação permite compreender a importância da integração entre as diferentes etapas de uma ETE. A desinfecção por UV não deve ser vista como uma tecnologia independente, capaz de compensar qualquer deficiência das etapas anteriores. Pelo contrário, a eficiência do processo depende da qualidade do efluente que chega ao sistema de desinfecção. Quanto menor a presença de partículas capazes de interferir na passagem da radiação, maior tende a ser a parcela da dose aplicada que efetivamente estará disponível para atingir os microrganismos. Nesse sentido, as análises físico-químicas funcionam como ferramentas de controle que permitem verificar se o efluente apresenta condições adequadas para a etapa de desinfecção.^{1,2,5}

Tempo de exposição e otimização do processo

Apesar de o maior tempo de exposição ter proporcionado os melhores resultados absolutos de inativação, o estudo de Millek *et al.* (2021) demonstrou que aumentar indefinidamente o tempo de exposição não representa necessariamente a condição mais adequada de operação. A análise estatística realizada pelos autores indicou que o tempo de exposição apresentou influência significativa sobre a desinfecção, enquanto as duas alturas de lâmina líquida avaliadas, 4 e 8 cm, não apresentaram diferença estatisticamente significativa.¹

A análise estatística pelo teste de Tukey indicou diferença significativa entre os tempos de exposição de 30 s e 90 s, enquanto o tempo de 60 s não apresentou diferença significativa em relação a nenhum dos dois. Isso significa que,

embora 90 s tenham apresentado menores concentrações residuais de coliformes totais e *E. coli*, não foi possível afirmar estatisticamente que esse tempo foi mais eficiente que 60 s. Essa situação é possível em testes de comparações múltiplas, nos quais cada par de tratamentos é analisado separadamente. Assim, considerando que 60 s apresentou resultados estatisticamente comparáveis aos de 90 s, mas com menor tempo de exposição, os autores consideraram essa condição mais adequada em termos de custo-benefício e rapidez do processo. Esse resultado evidencia que a otimização de um processo não consiste necessariamente em buscar a maior remoção possível, mas em identificar uma condição que atenda aos requisitos de qualidade com menor consumo de tempo e recursos.¹

Essa perspectiva também demonstra a importância das ferramentas estatísticas associadas às análises experimentais. Caso fossem considerados apenas os percentuais máximos de remoção, poderia parecer que o maior tempo de exposição seria automaticamente a melhor alternativa. Entretanto, a análise estatística permitiu verificar que o ganho obtido entre 60 s e 90 s não era estatisticamente significativo, tornando o menor tempo uma alternativa operacionalmente mais interessante. Assim, a utilização conjunta de análises microbiológicas, caracterização físico-química e ferramentas estatísticas permite uma avaliação mais completa da eficiência do processo.¹

Eficiência microbiológica e potencial de reúso

Os resultados obtidos por Millek *et al.* (2021) devem ser interpretados considerando as condições específicas do estudo, realizado em escala laboratorial com um efluente industrial que apresentava baixo teor de sólidos suspensos, com concentração média de 1,65 mg/L. Nesse contexto, a radiação UV apresentou elevada eficiência na redução dos microrganismos indicadores avaliados. Mesmo com 30 segundos de exposição e dose média efetiva de 15,3 mJ/cm², foram observadas eficiências de redução de 99,25% para coliformes totais e 100% para *E. coli*. Para condições de maior exposição, a inativação alcançou valores ainda mais expressivos, chegando a 2,94 log para coliformes totais e 2,41 log para *E. coli*.¹

Considerando as condições experimentais avaliadas, esses resultados indicam que a aplicação da radiação UV pode contribuir para a melhoria da qualidade microbiológica do efluente tratado. No estudo de Millek *et al.* (2021), o efluente submetido à radiação apresentou características microbiológicas compatíveis com padrões considerados para reúso agrícola restrito, segundo a referência utilizada pelos

autores. Dessa forma, os resultados sugerem que a desinfecção por UV pode atuar como uma etapa complementar do tratamento, ampliando as possibilidades de aproveitamento do efluente, desde que sejam atendidos os requisitos de qualidade estabelecidos para a finalidade de reuso pretendida.¹

Esse potencial de reuso, entretanto, não deve ser generalizado para diferentes tipos de efluentes ou finalidades sem uma avaliação específica. A qualidade necessária depende do uso pretendido e dos parâmetros estabelecidos pela legislação e pelas normas aplicáveis. Além disso, a eficiência observada no estudo está associada às características do efluente analisado, particularmente ao seu baixo teor de sólidos suspensos, que pode favorecer a ação da radiação UV. Portanto, a aplicação em escala real deve considerar as características específicas de cada ETE, as condições operacionais, a qualidade do efluente a ser tratado e o padrão de qualidade exigido para o reuso pretendido.^{1,2}

Conclusões

A análise realizada demonstra que a radiação ultravioleta apresenta potencial como etapa complementar na desinfecção de efluentes de ETEs, promovendo reduções significativas de microrganismos indicadores, como coliformes totais e *Escherichia coli*. Entretanto, sua eficiência está diretamente relacionada às características do efluente e às condições de aplicação da radiação, especialmente dose e tempo de exposição.¹

Dessa forma, o uso de análises físico-químicas e microbiológicas é fundamental para o monitoramento e a otimização do processo, permitindo avaliar a qualidade do efluente e estabelecer condições adequadas de operação. Assim, a integração entre caracterização do efluente, aplicação da radiação UV e controle das condições operacionais pode contribuir para a melhoria da eficiência do tratamento e da qualidade microbiológica do efluente final.^{1,2}

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Julia Ribeiro Dias.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 Millek, K. M.; Souza, J. B.; Vidal, C. M. S. Radiação ultravioleta como alternativa tecnológica para desinfecção de efluente de indústria de papel. *Acta Ambiental Catarinense*, 2021, **18**, 253–267. DOI: 10.24021/raac.v18i1.5840
- 2 Oliveira, E. C. M. *Desinfecção de efluentes sanitários tratados através da radiação ultravioleta*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003
- 3 Follmer, D. L. S.; Bisognin, R. P.; Souza, E. L.; Vasconcelos, M. C.; Guerra, D.; Silva, D. M. Construção e eficiência de um fotorreator de radiação ultravioleta de baixo custo para desinfecção de água. *R. gest. sust. ambient.*, 2019, **8**, 165–181
- 4 Von Sperling, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014
- 5 Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016
- 6 V. Lazarova, P. Savoye, M. L. Janex, E. R. Blatchley III and M. Pommepuy, *Water Sci. Technol.*, 1999, **40**, 203–213
- 7 J. B. de Souza, C. M. de S. Vidal, G. S. Cavallini, L. Quartaroli e L. R. C. Marcon, *Semina: Ciênc. Exatas Tecnol.*, 2012, **33**, 117–126

Uso de evaporadores de três efeitos no tratamento de águas residuais contaminadas com agroquímicos

DOI: 10.5281/zenodo.22313293

Hellen Ferreira da Silva^{a*}

This work analyzes the treatment of agrochemical-contaminated wastewater using an integrated system consisting of physicochemical treatment, filter press separation, and a three-stage evaporator. The results indicated a 75% reduction in residues sent for incineration and reductions of up to 97.2% in the concentrations of the evaluated contaminants. The process demonstrated potential for waste reduction and water recovery for industrial reuse.

Este trabalho analisa o tratamento de águas residuais contaminadas com agroquímicos por meio de um sistema integrado de tratamento físico-químico, filtro prensa e evaporador em três estágios. Os resultados indicaram redução de 75% nos resíduos destinados à incineração e diminuição de até 97,2% na concentração dos contaminantes avaliados. O processo demonstrou potencial para redução de resíduos e recuperação de água para reuso industrial.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: hellenferreiradf@gmail.com

Palavras-chave: Evaporadores; efluentes; agroquímicos.

Recebido em 16 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 de agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

A busca por processos industriais mais eficientes e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias capazes de reduzir a geração de resíduos e promover o reaproveitamento de recursos. Nesse contexto, o tratamento de águas residuais industriais assume papel importante, especialmente em processos que envolvem substâncias químicas potencialmente contaminantes.¹ O trabalho analisado aborda essa problemática por meio da utilização de um sistema integrado de tratamento físico-químico, filtração e evaporação em três estágios para a remoção e concentração de contaminantes presentes em águas residuais provenientes do setor de agroquímicos. A proposta está focada na redução do volume de resíduos e na recuperação de água para posterior tratamento e reuso industrial.²

A geração de águas residuais é uma consequência inerente a diversas atividades industriais, sendo sua composição diretamente relacionada às matérias-primas utilizadas, às etapas de produção e aos produtos gerados. Em setores que envolvem a fabricação, manipulação ou tratamento de produtos químicos, esses efluentes podem apresentar elevada complexidade, contendo substâncias dissolvidas, sólidos suspensos e outros compostos que dificultam seu gerenciamento.¹

Quando associados à produção e ao manejo de agroquímicos, esses resíduos exigem atenção ainda maior. Os efluentes podem conter substâncias potencialmente tóxicas e de difícil degradação, tornando necessário o emprego de tecnologias capazes de reduzir sua concentração e minimizar os riscos associados à sua destinação. Assim, o tratamento adequado desses resíduos é fundamental tanto para o controle ambiental quanto para a melhoria do gerenciamento industrial.^{2,3}

O descarte inadequado de águas contaminadas por resíduos de agroquímicos pode resultar na contaminação de corpos hídricos e provocar impactos ambientais.⁴

Dessa forma, o gerenciamento desses resíduos deve envolver procedimentos capazes de reduzir seus riscos antes da destinação final. Além da necessidade de atender às exigências ambientais, o tratamento adequado pode contribuir para diminuir o volume de resíduos gerados e possibilitar a recuperação de materiais ou recursos presentes no processo.^{2,3,4}

Paralelamente à preocupação com a destinação segura dos resíduos, a necessidade de reduzir o consumo de água tem ampliado o interesse pelo desenvolvimento de processos de recuperação e reuso. Dessa forma, além de reduzir a concentração de contaminantes, determinadas tecnologias de tratamento podem permitir a separação de uma corrente com maior potencial para reaproveitamento.²

Nesse sentido, operações de separação e concentração possuem grande importância no contexto industrial. A possibilidade de recuperar parte da água presente em um efluente contribui para reduzir a utilização de água potável em atividades internas e está relacionada à busca por processos mais eficientes no uso dos recursos disponíveis.^{1,2}

Entre as tecnologias empregadas para essa finalidade, destaca-se a evaporação, uma operação unitária amplamente utilizada para a concentração de soluções. De maneira geral, o processo consiste na vaporização de parte do solvente, promovendo o aumento da concentração dos componentes presentes na corrente líquida remanescente.^{1,5}

Quando aplicada a efluentes predominantemente aquosos, a evaporação pode possibilitar a separação da água presente na mistura. A água é removida na forma de vapor e posteriormente condensada, enquanto os contaminantes tendem a permanecer concentrados na corrente residual.¹ Dessa maneira, o processo pode contribuir simultaneamente para a redução do volume do resíduo e para a recuperação de uma corrente líquida.

A eficiência térmica da evaporação pode ser ampliada por meio da utilização de sistemas de múltiplos efeitos. Nessa configuração, o vapor produzido em uma etapa é aproveitado como fonte de energia para o estágio seguinte, reduzindo a necessidade de fornecimento externo de calor.^{1,5}

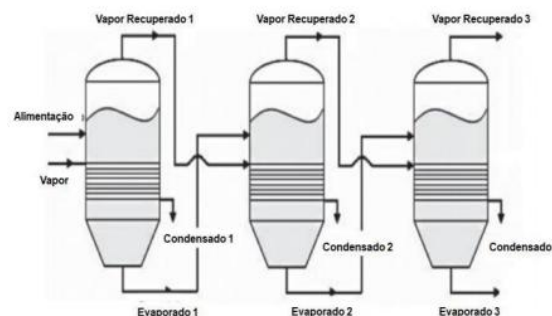
Para isso, os diferentes efeitos operam sob condições progressivamente distintas de pressão e temperatura. Essas diferenças favorecem a transferência de calor e permitem que a evaporação ocorra de maneira sequencial ao longo do sistema.⁵ Essa configuração apresenta vantagens relacionadas ao melhor aproveitamento energético, à redução de custos operacionais e à recuperação de parte da água presente no efluente.²

No caso específico de um evaporador em três efeitos, o processo ocorre em três câmaras ou efeitos. O vapor gerado em um estágio pode contribuir para o aquecimento da etapa seguinte, permitindo o aproveitamento sucessivo da energia térmica disponível.⁵

Figura 1. Evaporador de três efeitos planta Neotech. Extraído da referência 2.



Figura 2. Funcionamento evaporador de três efeitos. Extraído da referência 2.



A aplicação da evaporação em efluentes industriais, porém, não ocorre necessariamente de forma isolada. A presença de sólidos suspensos e a complexidade da composição química dos resíduos podem tornar necessária a utilização de etapas anteriores de tratamento. Essas operações têm a função de adequar as características da alimentação antes de sua entrada no sistema de evaporação.^{1,2}

A tecnologia foi avaliada em uma unidade de tratamento de resíduos industriais agroquímicos localizada em Uberaba, Minas Gerais. A planta opera um sistema de evaporação a vácuo com capacidade de 30 m³ por dia e trata resíduos associados, principalmente, à fabricação dos herbicidas Tebutiuron e Sulfentrazone.²

Diante desse contexto, o trabalho tem como objetivo analisar o uso de um sistema de evaporação em três estágios integrado a etapas de tratamento físico-químico e filtração para o tratamento de águas residuais contaminadas com agroquímicos.

Metodologia

O trabalho consiste em uma análise do processo de tratamento e regeneração de águas residuais contaminadas com agroquímicos em uma unidade industrial localizada em Uberaba-MG. O sistema avaliado integra etapas de tratamento físico-químico, separação sólido-líquido por filtro prensa e concentração do efluente por meio de um evaporador a vácuo em três estágios. A planta possui capacidade de evaporação de aproximadamente 30 m³/dia.²

Inicialmente, os resíduos líquidos, de composição predominantemente aquosa, são encaminhados aos tanques de tratamento. Nessa etapa, são realizadas a homogeneização e a separação inicial das fases, além da aplicação de agentes neutralizantes e polímeros para promover o tratamento físico-químico do efluente. Após a decantação, a corrente segue para a etapa de separação sólido-líquido.²

Atualmente, a separação é realizada com o auxílio de um filtro prensa. Nesse equipamento, a fração sólida é retida nas placas, formando uma torta, enquanto a fração líquida é direcionada para os tanques de acúmulo. Antes do encaminhamento ao evaporador, a água proveniente da filtração passa por uma avaliação visual para verificar sua adequação ao processo subsequente.²

Posteriormente, o efluente líquido é alimentado no sistema de evaporação, composto por três câmaras. A evaporação ocorre de forma gradual e sob condições de pressão e temperatura adequadas ao processo, concentrando os contaminantes na corrente residual. O vapor gerado é condensado e a água regenerada é coletada em um tanque específico.²

Para a avaliação do desempenho do tratamento, foram consideradas amostras coletadas em diferentes etapas do processo, identificadas como água bruta, água filtrada e água destilada. As amostras foram submetidas à análise externa por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), permitindo a determinação das concentrações dos herbicidas Tebutiuron e Sulfentrazone, expressas em ppm. Os resultados obtidos foram utilizados para comparar a redução da concentração dos compostos ao longo das etapas de tratamento.²

Além da análise das concentrações dos contaminantes, foram considerados os resultados operacionais relacionados à implantação do filtro prensa, especialmente a alteração na quantidade e nas características do resíduo destinado à incineração. Também foram avaliadas as mudanças

visuais observadas nas amostras após o processo de tratamento e o potencial de reutilização da água regenerada em atividades internas da unidade industrial.²

Resultados e discussão

Os resultados apresentados no estudo evidenciam que a integração do filtro prensa ao sistema de tratamento, seguida pela evaporação em três estágios, proporcionou melhorias tanto no gerenciamento dos resíduos quanto na redução das concentrações dos contaminantes avaliados. Dessa forma, o desempenho do processo pode ser analisado sob diferentes aspectos, incluindo a redução da quantidade de resíduos destinados à incineração, a concentração dos compostos presentes no efluente e a recuperação de água para utilização interna.²

Um dos principais resultados observados após a implantação do filtro prensa foi a redução aproximada de 75% na quantidade de resíduos encaminhados para incineração. Antes da introdução desse equipamento, os resíduos provenientes do tratamento eram predominantemente gerados na forma de lodo, apresentando elevado teor de umidade e, conseqüentemente, maior volume. Com a utilização do filtro prensa, a fração sólida passou a ser obtida na forma de torta, com menor quantidade de água, facilitando seu manuseio, armazenamento e transporte.²

Figura 3. Resíduo sólido (torta) retirado do filtro prensa. Extraído da referência 2.



Esse resultado demonstra a importância da etapa de separação sólido-líquido no desempenho global do processo. A redução da umidade da fração sólida diminui o volume de material que necessita de destinação final, representando uma melhoria operacional antes mesmo da etapa de evaporação. Assim, a utilização do filtro prensa não atua diretamente na remoção dos compostos dissolvidos avaliados posteriormente por HPLC, mas contribui para a adequação do efluente líquido e para a redução da quantidade de resíduo gerado pelo tratamento.²

Outro aspecto importante do estudo está relacionado às concentrações dos herbicidas Tebutiuron e Sulfentrazone nas diferentes etapas do tratamento. As análises foram realizadas por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), utilizando amostras de água bruta, água filtrada e água destilada. Os resultados permitem acompanhar a redução dos contaminantes ao longo do processo e avaliar, principalmente, o efeito do sistema de evaporação sobre a qualidade da água recuperada.^{2,6}

Para o Herbicida A, foi determinada a concentração de Tebutiuron de 1699 ppm na água bruta. Após a etapa de filtração, a concentração passou para 1603 ppm, enquanto na água destilada foi obtido o valor de 120 ppm. A pequena redução observada entre a água bruta e a água filtrada indica que a filtração apresentou efeito limitado sobre a concentração desse composto, o que é coerente com a função principal do filtro prensa, voltada à separação da fração sólida. Por outro lado, a redução mais expressiva ocorreu após a etapa de evaporação e condensação.²

Considerando os valores da água bruta e da água destilada, a redução de Tebutiuron para o Herbicida A foi de aproximadamente 92,9%.

Esse resultado evidencia que a principal redução da concentração ocorreu após a passagem pelo sistema de evaporação. A diferença entre os resultados das etapas também permite observar que o tratamento adotado apresenta funções complementares: enquanto o filtro prensa atua principalmente na separação sólido-líquido, o sistema de evaporação é responsável pela concentração da corrente residual e pela obtenção da água regenerada.²

Para o Herbicida B, foram avaliados os dois compostos presentes no estudo. A concentração inicial de Tebutiuron foi de 3025 ppm na água bruta, sendo reduzida para 2737 ppm após a filtração e para 219 ppm na água destilada. Para o Sulfentrazone, os valores passaram de 1353 ppm na água bruta para 575 ppm na água filtrada, atingindo 38 ppm na água destilada.²

A partir desses resultados, verifica-se novamente uma redução mais acentuada na etapa posterior à evaporação. Para o Tebutiuron presente no Herbicida B, a redução global entre a água bruta e a água destilada foi de aproximadamente 92,8%.²

Já para o Sulfentrazone, a redução foi ainda mais expressiva, atingindo aproximadamente 97,2%.²

Os resultados indicam, portanto, que o processo foi capaz de promover uma redução significativa nas concentrações dos compostos analisados. Entretanto, é importante observar que as concentrações obtidas na água destilada não foram iguais a zero. Assim, os dados demonstram uma redução expressiva dos contaminantes avaliados, mas não permitem afirmar que a água recuperada esteja completamente isenta dessas substâncias. Essa observação é particularmente importante porque o próprio processo descrito no estudo prevê uma etapa complementar de polimento antes da destinação da água regenerada ao reuso.^{2,6,7}

Os resultados também permitem uma comparação entre o desempenho das etapas do processo. No caso do Tebutiuron presente no Herbicida A, a concentração foi reduzida de 1699 para 1603 ppm após a filtração, correspondendo a uma redução de aproximadamente 5,6% nessa etapa. Para o Tebutiuron do Herbicida B, a redução entre a água bruta e a filtrada foi de aproximadamente 9,5%. Esses valores são inferiores às reduções globais observadas após a evaporação, reforçando que o filtro prensa apresenta uma contribuição distinta daquela observada no sistema de evaporação.^{2,6,7}

Para o Sulfentrazone do Herbicida B, entretanto, foi observada uma redução mais significativa durante a filtração, passando de 1353 para 575 ppm. Esse comportamento demonstra que os compostos avaliados não apresentaram necessariamente a mesma resposta ao conjunto de operações de tratamento. Os dados disponíveis no estudo, contudo, não permitem determinar os mecanismos específicos responsáveis por essa diferença, sendo possível apenas observar que a concentração do Sulfentrazone apresentou redução considerável já na amostra de água filtrada.^{2,6}

Essa diferença reforça a importância de analisar cada corrente e contaminante individualmente. Em processos industriais envolvendo resíduos com composição complexa, o desempenho de uma operação pode variar conforme as características físico-químicas da mistura. Portanto, embora os resultados globais indiquem elevada redução dos compostos avaliados, a eficiência de cada etapa não deve ser considerada necessariamente uniforme para todos os contaminantes presentes no efluente.⁸

Outro resultado relevante está relacionado ao potencial de aproveitamento da água recuperada. Após a condensação e o tratamento complementar, a água regenerada pode ser direcionada para atividades internas, como lavagem de equipamentos e processos auxiliares. Esse aspecto amplia a

importância do sistema, pois o tratamento deixa de estar relacionado apenas à destinação do resíduo e passa a contribuir também para o reaproveitamento de recursos hídricos.⁹

Sob essa perspectiva, o processo apresenta benefícios ambientais e operacionais. A redução do volume de resíduos destinados à incineração, associada à recuperação de água, contribui para diminuir a quantidade de recursos necessários ao funcionamento da unidade. Entretanto, a eficiência observada depende das características do resíduo alimentado ao sistema.

De maneira geral, os resultados apresentados demonstram que a associação entre o filtro prensa e o evaporador em três estágios proporcionou benefícios complementares. A filtração contribuiu para a redução do volume e da umidade do resíduo sólido, enquanto o sistema de evaporação apresentou papel importante na redução das concentrações dos contaminantes avaliados e na recuperação de uma corrente de água regenerada.²

Os dados de HPLC evidenciaram reduções globais superiores a 90% para os compostos avaliados, com destaque para a redução aproximada de 97,2% do Sulfentrazone. Paralelamente, a redução de 75% na quantidade de resíduos destinados à incineração demonstra o impacto da modificação realizada no gerenciamento dos subprodutos do tratamento. Em conjunto, esses resultados indicam que a integração das operações unitárias contribuiu para melhorar o desempenho do sistema, embora a variabilidade da composição dos resíduos e a presença de concentrações residuais na água recuperada evidenciem a necessidade de monitoramento e controle contínuos.²

Conclusões

A análise do estudo permitiu observar que a integração entre o tratamento físico-químico, o filtro prensa e o evaporador em três estágios constitui uma alternativa relevante para o tratamento de águas residuais contaminadas com agroquímicos. A associação dessas operações permitiu atuar em diferentes etapas do gerenciamento do resíduo, promovendo a separação da fração sólida, a concentração dos contaminantes e a recuperação de uma corrente líquida para posterior tratamento e reuso.

Os resultados apresentados evidenciaram benefícios importantes após a implantação do filtro prensa. A redução aproximada de 75% na quantidade de resíduos destinados à incineração demonstra que a separação prévia da fração sólida contribuiu para diminuir o volume de material encaminhado à destinação final. Além disso, a formação da torta com menor

teor de umidade representou uma melhoria nas condições de manuseio e transporte do resíduo.

Em relação à remoção dos contaminantes avaliados, os resultados das análises por HPLC demonstraram reduções expressivas entre as amostras de água bruta e água destilada. As reduções calculadas a partir dos dados apresentados foram de aproximadamente 92,9% para o Tebutiuron no Herbicida A, 92,8% para o Tebutiuron no Herbicida B e 97,2% para o Sulfentrazone. Esses resultados indicam a contribuição significativa do processo de evaporação para a redução das concentrações dos compostos avaliados na água recuperada.

Entretanto, a presença de concentrações residuais na água destilada demonstra que a corrente recuperada não pode ser considerada completamente isenta de contaminantes apenas com base na etapa de evaporação. Nesse sentido, a realização de tratamento complementar, conforme previsto no sistema estudado, é importante antes da definição de sua aplicação para reuso. O monitoramento analítico da água regenerada também se mostra necessário para acompanhar o desempenho do processo e garantir condições adequadas para sua utilização.

Outro aspecto relevante observado é que o desempenho do sistema está diretamente relacionado às características dos resíduos recebidos. A variabilidade na composição dos efluentes representa uma dificuldade operacional, pois pode exigir ajustes nas condições de tratamento físico-químico e comprometer a estabilidade das etapas subsequentes. Dessa forma, a caracterização e o controle da alimentação são fundamentais para tornar o processo mais previsível e manter sua eficiência.

Assim, conclui-se que o sistema avaliado apresentou resultados positivos tanto na redução do volume de resíduos quanto na diminuição das concentrações dos contaminantes analisados. A integração entre as diferentes operações unitárias demonstrou ser um aspecto essencial para o desempenho global do tratamento, associando melhorias operacionais à recuperação de água e ao gerenciamento mais eficiente dos resíduos.

Por fim, o estudo evidencia o potencial da evaporação em três estágios como uma tecnologia aplicável ao tratamento de efluentes industriais complexos, especialmente quando associada a etapas adequadas de pré-tratamento e controle operacional. A redução da necessidade de destinação de resíduos, aliada à possibilidade de recuperação e reuso da água, demonstra a contribuição desse tipo de sistema para práticas industriais mais eficientes e sustentáveis. Entretanto, os resultados também reforçam que a manutenção do desempenho depende do acompanhamento contínuo das características dos efluentes e do controle das condições de operação do processo.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de observações são de Hellen Ferreira da Silva.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 Balkan, F.; Çolak, N.; Hepbaşlı, A. Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis. *International Journal of Energy Research*, **29**, 455–470, 2005.
- 2 Oliveira, L. M. de. Uso de evaporador em três estágios, para remoção de contaminantes em águas residuais de agroquímicos. *Universidade de Uberaba*, 2025.
- 3 Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União: Brasília*, 2011.
- 4 Costa, M. A.; Lima, D. R. Tecnologias limpas na indústria: aplicações e impactos. *Interciência*, 2021.
- 5 McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriott, P. Operações unitárias na engenharia química. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2005.
- 6 Manzan, D. H. C. Sistema integrado de evaporação e tratamento de gases residuais de incineração. *Universidade de Uberaba*, 2024.
- 7 Pereira, V. H. et al. Reaproveitamento de água industrial: estudo de caso em planta de tratamento físico-químico. *Revista Engenharia e Sustentabilidade*, **12**, 22–31, 2021.
- 8 Pignati, W. A. et al. Exposição aos agrotóxicos no Brasil: um panorama nacional. *Ciência & Saúde Coletiva*, **22**, 3281–3293, 2017.
- 9 Pitarch, J. L.; Palacín, C. G.; De Prada, C.; Voglauer, B.; Seyfriedsberger, G. Optimisation of the resource efficiency in an industrial evaporation system. *Journal of Process Control*, **56**, 1–12, 2017.
- 10 Rogério, H. A.; Costa, A. O. S.; Costa Junior, E. F. Aplicações industriais de evaporadores de múltiplo efeito. 2013.
- 11 Silva, A. C. et al. Contaminação de recursos hídricos por agrotóxicos no Brasil: uma revisão crítica. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, **15**, 85–96, 2021.

Uso de um complexo de cobre para a determinação espectrofotométrica de cobre (II) em amostras de aguardente

DOI: 10.5281/zenodo.22311197

Pedro Henrique Carvalho Lima^{a*}

Tiquira is a traditional cassava spirit from Maranhão with an alcohol content ranging from 38% to 54% (v/v). Its copper content must comply with current regulations due to the metal's toxicity when present in excess in the human body. Conventional analytical methods for determining this content—such as graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS) and UV-Vis—can entail high costs and significant reagent consumption. This review presents an alternative method for determining Cu(II) via UV-Vis spectrophotometry using the compound 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol (PAN) as a complexing agent.

A Tiquira é um aguardente de mandioca tradicional do Maranhão, com teor alcoólico que varia entre 38–54% (v/v). Seu teor de cobre deve atender à legislação vigente, devido a toxicidade do metal caso esteja em excesso no organismo humano. Métodos convencionais de análise para determinação desse teor, como espectrometria de absorção atômica com forno grafite (GFAAS) e UV-Vis, podem apresentar alto custo e elevado consumo de reagentes. Esta revisão apresenta um método alternativo para a determinação de Cu(II) por espectrofotometria UV-Vis utilizando o composto 1-(2-piridilazo)-2-naftol (PAN) como agente complexante.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: phclima3101@gmail.com

Palavras-chave: Tiquira; aguardente; cachaça; cobre(II); UV-Vis.

Recebido em 17 de agosto de 2026,

Aprovado em 30 de agosto de 2026,

Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

O cobre foi um dos primeiros metais a serem utilizados pelos humanos, substituindo a pedra na confecção de armas e ferramentas de trabalho, e devido, principalmente, à sua durabilidade, o uso desse metal proporcionou um grande avanço tecnológico na história da humanidade. Atualmente, o cobre é usado na produção de tubulações, fios elétricos, ligas metálicas e moedas, devido a sua grande capacidade de conduzir energia elétrica e térmica, além de boa ductilidade, maleabilidade, entre outros. Além disso, o cobre ainda é considerado 100% reciclável, sem distinção ou perda de qualidade entre o cobre vindo direto de mineradoras ou o reciclado, o que torna o seu uso mais benéfico ao mundo.^{1,2}

Encontrado principalmente na malaquita, o cobre apresenta estados de oxidação de +1 a +4, sendo o estado +2 o mais comum deles, e também o mais importante para o nosso organismo, sendo necessário o consumo de até 5 miligramas desse metal diariamente, presente principalmente em órgãos como rins e fígado. Ele é um excelente antioxidante, mas apesar de ser essencial, o excesso desse metal no nosso corpo pode ser extremamente prejudicial, podendo causar problemas graves devido ao estresse oxidativo no sistema, afetando a proliferação celular e causando danos ao DNA.^{3,4,5,6}

No Brasil, o cobre comumente aparece na produção de cachaça e aguardente, sendo o principal material utilizado nos alambiques, uma espécie de caldeira onde adiciona-se a bebida alcóolica a ser destilada. De acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), cachaças e aguardentes produzidos artesanalmente devem conter, no máximo, 5 mg.L⁻¹ de cobre em sua composição, valor este maior que o recomendado por outras instituições mundo afora, que é de 2 mg.L⁻¹.⁷

A Tiquira, nome popular para a aguardente feita a partir de mandioca, que tem graduação alcoólica entre 38 e 54 % volume, é uma bebida muito comum no Maranhão. Assim como outras bebidas, ela deve seguir as normas impostas pelo MAPA em relação ao teor de cobre em sua composição. Existem vários métodos que podem ser utilizados para determinar a quantidade de cobre nessa e em outras bebidas, como a espectrometria de absorção atômica com forno grafite (GFAAS) e a espectroscopia no UV-Vis com adição de biquinolina, porém estes possuem custo elevado e gasto excessivo de solventes e reagentes, além da necessidade de preparar as amostras a serem analisadas.^{8,9}

Diante disso, Oliveira e colaboradores propõem um método analítico alternativo para determinar o teor de cobre(II) na Tiquira, utilizando espectrofotometria de absorção no UV-

Vis com adição do reagente 1-(2-piridilazo)-2-naftol (PAN), que atua como ligante na reação de complexação com o metal analisado.⁸

Metodologia

Uma solução 1 mmol.L⁻¹ do ligante PAN foi preparada após diluir o reagente em uma solução alcoólica 50%, devido a sua baixa solubilidade em água. Após isso, ela foi armazenada em frascos de polietileno a uma temperatura de 15 °C. Os cientistas também prepararam dois tampões: um de acetato de sódio (CH₃COONa) e ácido acético (CH₃COOH) e outro de cloreto de amônio (NH₄Cl) e hidróxido de amônio (NH₄OH), utilizando padrões dos reagentes, todos a 2 mol.L⁻¹. Ambos foram utilizados para estudar se a variação do pH na solução contendo o complexo Cu(II)-PAN afetava sua absorbância.⁸

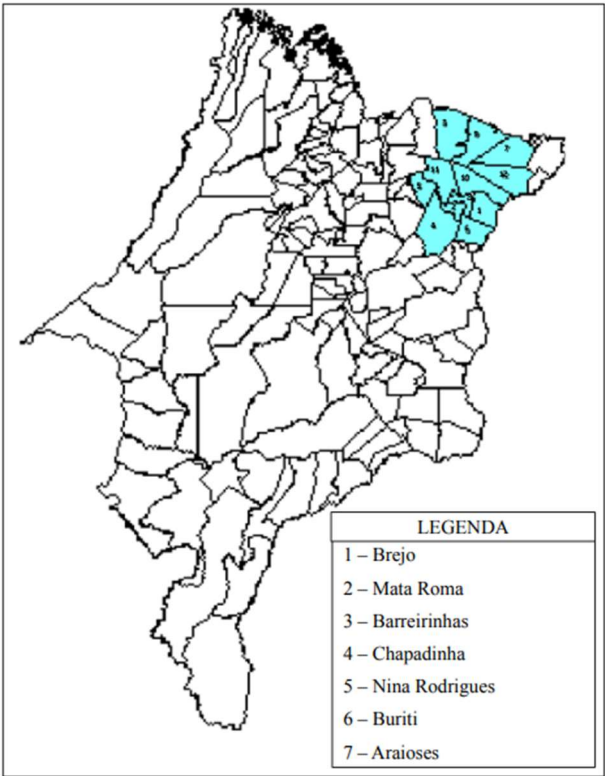
Os pesquisadores prepararam diversas soluções estoque de diferentes metais, como mostra a Tabela 1. Posteriormente, elas foram diluídas no tampão CH₃COONa/CH₃COOH, ajustando o pH para 6,0 e a força iônica para 0,2 mol.L⁻¹. Todas foram armazenadas a 15 °C para serem utilizadas futuramente, evitando assim a degradação.⁸

Tabela 1. Metais utilizados nas soluções estoque, com suas concentrações. Dados extraídos da referência 8.

Soluções estoque a 1x10 ⁻² mol.L ⁻¹	Soluções estoque a 1x10 ⁻³ mol.L ⁻¹
Níquel(II)	Cobre (II)
Ferro(III)	
Cádmio(II)	
Cobalto(III)	
Chumbo(II)	
Zinco(II)	

Oliveira e colaboradores coletaram amostras de Tiquira dos principais municípios maranhenses, como mostra a Figura 1, que produz esse tipo de aguardente, sendo todos de origem artesanal. As amostras foram coletadas de maio a junho de 2019 e o teor alcoólico delas variou entre 51 e 54 °GL. Todas as coletas seguiram os passos demonstrados no trabalho de K.Z. Brařnina. Por fim, elas foram acidificadas e armazenadas a temperatura ambiente como descrito no trabalho de Barbeira e colaboradores.^{8,10,11}

Figura 1. Principais municípios maranhenses que produzem Tiquira. Extraído da referência 8.



As amostras foram digeridas em ácido nítrico e ácido perclórico (2:1). Em um balão de destilação de 250 mL contendo esferas de vidro adicionou-se 100 mL da amostra de Tiquira e 200 µL de ácido nítrico concentrado. A mistura foi colocada em refluxo por 30 minutos. Após esse tempo, o sistema foi aberto e deixado em repouso até a diminuição da temperatura. Então, 100 µL de ácido nítrico e 150 µL de ácido perclórico foram adicionados no balão, sendo colocado em refluxo novamente, por outros 30 minutos. Ao fim do tempo, retirou-se o condensador do sistema, deixando a solução do balão ser reduzida mais ou menos 5% do volume da amostra. Depois, adicionou-se 30 mL de água deionizada, e o sistema foi aquecido novamente, até evaporar. Por fim, após o resfriamento do sistema, 100 mL do produto foram quantitativamente transferidos para um balão volumétrico, aferindo-se logo em seguida. Essas amostras foram armazenadas em geladeira, em frascos devidamente rotulados de polietileno de 125 mL, para serem analisados posteriormente.⁸

As medidas de UV-Vis foram realizadas em um espectrofotômetro modelo HP8452A, com monitor HP, modelo 386116 e impressora HP modelo 500. Os resultados

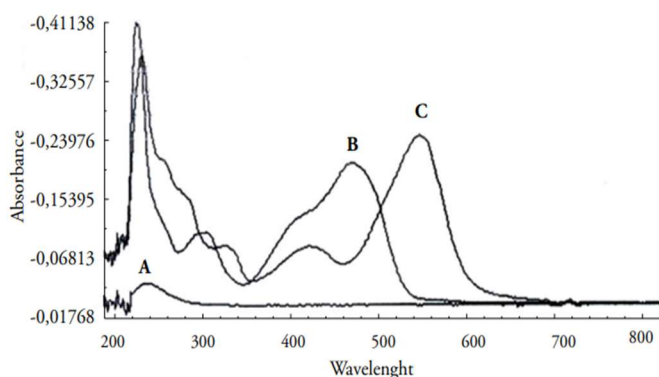
obtidos para os valores de cobre(II) foram avaliados estatisticamente, utilizando conceitos de recuperação, reprodutibilidade e limites de detecção, com coeficiente de probabilidade a 95%.⁸

Resultados e discussão

Analisando a Figura 2, percebe-se que um dos indícios de que a complexação foi bem sucedida é o deslocamento da banda de absorção em comparação com as bandas do cobre(II), do reagente PAN e do complexo Cu(II)-PAN, todos a 1,0 mol.L⁻¹.⁸

Os pesquisadores obtiveram que as absorbâncias do complexo Cu(II)-PAN sofriam variações de acordo com o pH do meio. Para valores de pH acima e abaixo de 6, a absorbância era reduzida, principalmente quando o sistema ficava mais básico. A maior absorção foi observada em pH = 6, no tampão CH₃COONa/CH₃COOH, como mostra a Figura 3.⁸

Figura 2. Espectro UV-Vis das soluções de cobre(II), do reagente PAN e do complexo Cu(II)-PAN, todas a 1,0 mol.L⁻¹.¹. Extraído da referência 8.



Oliveira e colaboradores estudaram o efeito da variação da concentração do metal, de 2,0x10⁻⁶ a 1,4x10⁻⁵ mol.L⁻¹, em tampão CH₃COONa/CH₃COOH a pH = 6,0, como mostra a Figura 4. Eles obtiveram que a absorbância aumentava proporcionalmente ao aumento da concentração de cobre(II), até a proporção 1:1. Após esse ponto, a absorbância em 1,4x10⁻⁵ mol.L⁻¹ se sobrepôs à medida anterior. Além disso, os espectros obtidos indicam a presença de um ponto isobéstico, ou seja, um ponto em que reagentes e produtos absorvem luz na mesma intensidade, em 500 nm, indicando que há dois cromóforos interconversíveis no sistema e que ligante e complexo estão em equilíbrio.⁸

Figura 3. Efeito do pH na absorção do complexo Cu(II)-PAN a 1,0x10⁻⁵ mol.L⁻¹ nos tampões de CH₃COONa/CH₃COOH (meio ácido) e NH₄Cl/NH₄OH (meio básico), variando o pH em intervalos de 0,5. Extraído da referência 8.

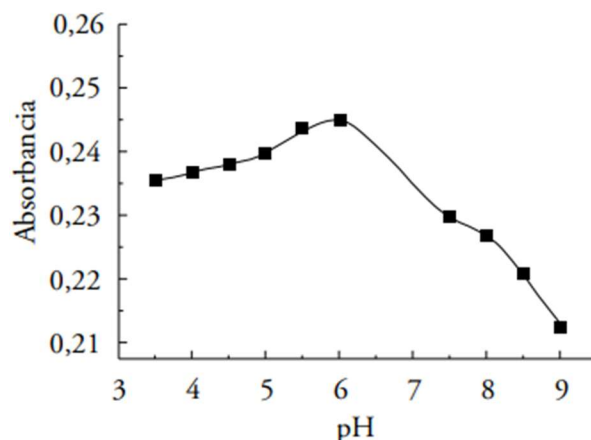
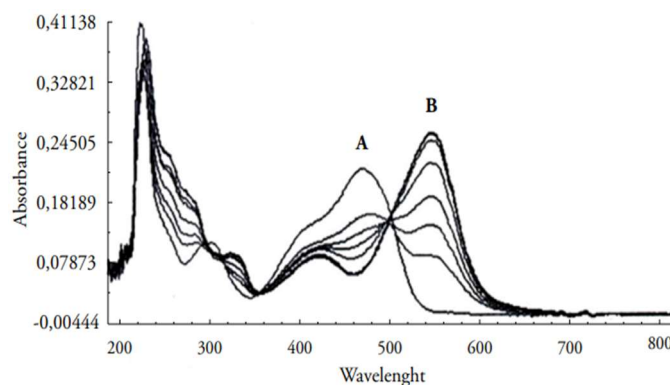


Figura 4. Absorção do ligante PAN (A) e das variações de concentração do cobre(II) na solução de Cu(II)-PAN, mantendo a concentração do ligante constante (1,0x10⁻⁵ mol.L⁻¹) em tampão CH₃COONa/CH₃COOH (B). Extraído da referência 8.



A mesma ideia de variação foi repetida, agora mantendo a concentração do metal constante e variando a concentração do reagente PAN, de 1,0x10⁻⁶ a 1,0x10⁻⁵ mol.L⁻¹. O resultado indicou que a absorbância também aumentava proporcionalmente ao aumento da concentração do ligante, como mostra a Figura 5.⁸

Os cientistas observaram que a formação do complexo Cu(II)-PAN acontece instantaneamente após a mistura das soluções do metal e do ligante, em tampão CH₃COONa/CH₃COOH, ambas a 1,0x10⁻⁵ mol.L⁻¹, e ao estudar a estabilidade dele, os pesquisadores concluíram que o complexo é estável e não sofre degradação ao longo do tempo, como mostra a Figura 6.⁸

Figura 5. Absorção do complexo Cu(II)-PAN variando a concentração do ligante PAN, em tampão CH₃COONa/CH₃COOH a pH = 6,0. Extraído da referência 8.

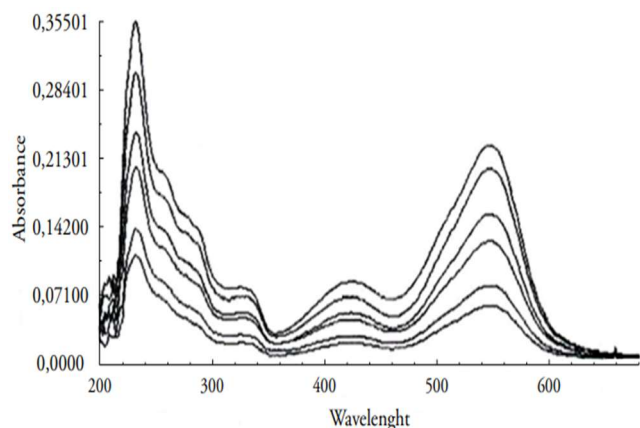
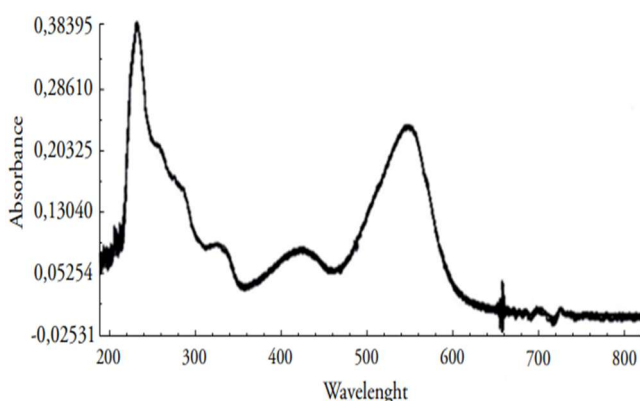


Figura 6. Estabilidade do complexo Cu(II)-PAN após 420 minutos, em tampão CH₃COONa/CH₃COOH a pH = 6,0. Extraído da referência 8.



Oliveira e colaboradores utilizaram o método da Razão Molar, que relaciona a absorbância de diferentes soluções do complexo e a proporção molar entre a concentração do metal e do ligante. Eles concluíram que a proporção estequiométrica na formação do Cu(II)-PAN é de 1:1. O valor foi obtido a partir do rebatimento, ou seja, da rotação da extrapolação das tangentes, cruzando a reta a partir do ponto em que a curva muda de inclinação, até o eixo da razão molar, como mostra a Figura 7. O resultado se encontra dentro do esperado para metais de transição.^{8, 12}

Os cientistas avaliaram também a interferência de outros íons metálicos que poderiam estar presentes em uma amostra de Tiquira, advindos de adubos, contaminações nas etapas de processamento e armazenamento, ou até da água utilizada na produção da bebida. A presença de outros íons metálicos no sistema geraria uma competitividade na formação

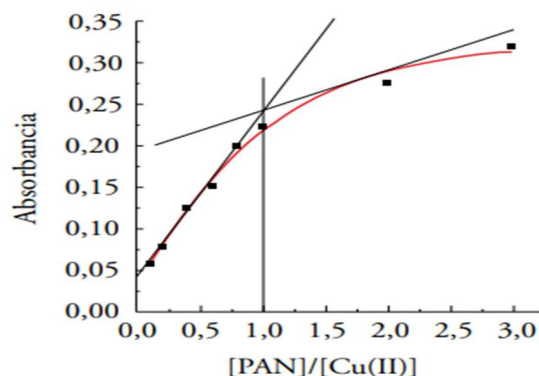
de complexos com o ligante PAN, o que afetaria os resultados de possíveis análises.

A análise foi realizada a partir da adição das soluções padrões dos íons metálicos à solução de cobre(II), seguida pela adição do ligante PAN. Como mostra a Tabela 2, os pesquisadores observaram que a interferência dos íons de Zn(II), Ni(II), Cd(II) e Pb(II) só aconteciam em concentrações 100 vezes maiores que a do cobre(II). Em relação ao Fe(III), a interferência ocorria a uma concentração 100 vezes maior que a de Cu(II), mascarando completamente a banda do complexo Cu(II)-PAN. Por fim, o íon Co(III) foi o que interferiu mesmo em menor quantidade (em relação aos outros metais), sendo possível observar a interferência em concentrações 10 vezes maiores que a concentração de Cu(II), diminuindo a banda de absorção do Cu(II)-PAN.⁸

Tabela 2. Interferência de outros íons metálicos no espectro UV-Vis do Cu(II) a $1,0 \times 10^{-5}$ mol.L⁻¹, em tampão CH₃COONa/CH₃COOH em pH = 6,0. A razão molar refere-se a $C_{\text{Metal}}/C_{\text{Cu(II)}}$. Extraído da referência 8.

Ion	Razão molar	Interferência
Níquel(II)	≤ 100	Não ocorre
Ferro(III)	< 100	Não ocorre
	≥ 100	Ocorre
Cádmio(II)	≤ 100	Não ocorre
Cobalto(III)	< 10	Não ocorre
	≥ 10	Ocorre
Chumbo(II)	≤ 100	Não ocorre
Zinco(II)	≤ 100	Não ocorre

Figura 7. Razão molar do Cu(II)-PAN, mantendo a concentração de Cu(II) constante ($1,0 \times 10^{-5}$ mol.L⁻¹) e variando a concentração do ligante ($1,0 \times 10^{-6}$ a $4,0 \times 10^{-5}$ mol.L⁻¹), em tampão CH₃COONa/CH₃COOH a pH = 6,0. Extraído da referência 8.



Utilizando as medidas de recuperação do Cu(II) em amostras com concentrações variadas e conhecidas do analito, os pesquisadores avaliaram a exatidão do método. Por meio do método de adição de padrão, eles avaliaram a recuperação de Cu(II) utilizando amostras de Cu(II) com concentrações previamente determinadas por Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS), como mostra a Tabela 3.⁸

As porcentagens de recuperação foram obtidas utilizando a seguinte equação:

$$\text{Recuperação}(\%) = \frac{C(\text{obtida})}{C(\text{adicionada})} \quad (1)$$

obtendo resultados que variam de 98 a 107,5%, com uma média de $104,54 \pm 7,01\%$. A razão determinada para a confiabilidade de um método é entre 80 a 110%, portanto, os resultados obtidos comprovam a eficácia do método, além do baixo desvio padrão, igual a 4,41.⁸

Tabela 3. Estudo da recuperação de Cu(II) pelo método da adição de padrão, para 95% de confiança, em tampão $\text{CH}_3\text{COONa}/\text{CH}_3\text{COOH}$ e pH = 6,0. Extraído da referência 8.

Recuperação (%)	Erro abs. (mol.L ⁻¹)	Erro rel. (mol.L ⁻¹)	Fator de correlação
107,5	$0,15 \times 10^{-6}$	7,50	0,9995
106,0	$0,09 \times 10^{-6}$	6,00	0,9986
98,0	$0,05 \times 10^{-6}$	2,00	0,9997
106,67	$0,10 \times 10^{-6}$	6,67	0,9952

A precisão do método foi determinada utilizando o desvio padrão relativo (%) das leituras obtidas após a análise de 10 réplicas de todas as amostras de Tiquira, sendo realizadas no mesmo dia. Os pesquisadores concluíram que o desvio padrão relativo (%) está entre 1,300 e 5,405, indicando boa precisão, levando em conta que valores de até 15% são aceitos na validação de um método analítico.⁸

O limite de detecção foi calculado por Oliveira e colaboradores utilizando a seguinte equação:

$$\text{Limite de detecção} = \frac{K \cdot SD}{m} \quad (2)$$

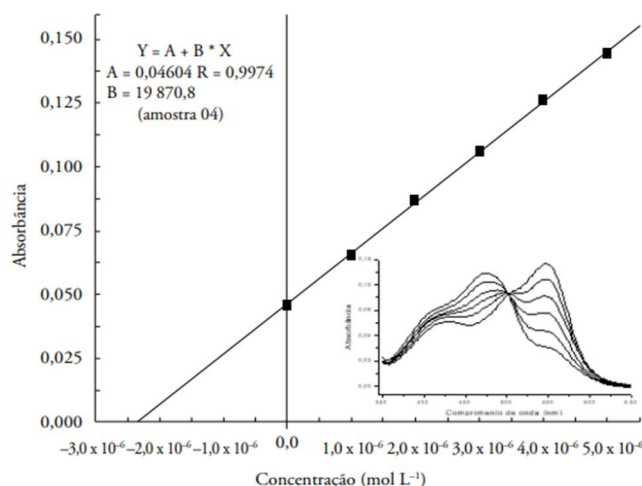
sendo K igual a três vezes o valor do ruído a partir do momento em que obtém-se um sinal analítico; SD, o desvio padrão absoluto; e m, o coeficiente angular da curva analítica. Os pesquisadores obtiveram o resultado de $3,3 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. Com isso, a Tabela 4 mostra as condições ideais para a reação de complexação.⁸

Tabela 4. Condições experimentais ideais para a utilização do método de detecção de Cu(II) por UV-Vis. Extraído da referência 8.

Condições experimentais	Especificações
Comprimento de onda do complexo Cu(II)-PAN (nm)	548
pH	6,0
Tampão	$\text{CH}_3\text{COONa}/\text{CH}_3\text{COOH}$
Faixa ideal de trabalho (mol.L ⁻¹)	$1,0 \times 10^{-6}$ a $1,0 \times 10^{-5}$
Limite de detecção (mg.L ⁻¹)	$3,3 \times 10^{-2}$

O método proposto foi utilizado para determinar a concentração de cobre em cinco amostras de Tiquira maranhenses, todas analisadas em triplicata. Como mostra a Figura 8, para a amostra 4, a análise por adição de padrão apresentou bandas de absorção bem definidas, indicando baixa interferência de outros íons metálicos. Além disso, a curva analítica apresentou boa linearidade, demonstrando a adequação do método para a determinação de cobre nas amostras.⁸

Figura 8. Curva do método de adição de padrão e espectros da amostra 4, seguindo as condições ideais determinadas na Tabela 3. Extraído da referência 8.



Oliveira e colaboradores mostraram uma comparação dos teores de cobre(II) obtidos pelo método proposto e por

AAS, como mostra a Tabela 5. Observou-se que, com exceção da amostra de Nina Rodrigues, os erros relativos variaram entre 5,76% e 11,11%, faixa considerada aceitável. Esses resultados indicam boa precisão do método. Entretanto, todas as amostras apresentaram concentrações de Cu(II) superiores ao limite máximo de 5,0 mg.L⁻¹ (7,87x10⁻⁵ mol.L⁻¹) estabelecido pela legislação vigente.⁸

Tabela 5. Comparação das concentrações médias de Cu(II) determinadas pelo método de adição de padrão e por AAS em amostras de Tiquira. Extraído da referência 8.

Nº	Concentração média de cobre pelo método proposto (mg.L ⁻¹)	Concentração de cobre por AAS (mg.L ⁻¹)	Erro relativo (%)
1	13,53	10,61	27,52
2	14,42	13,09	10,16
3	9,60	8,64	11,11
4	7,88	8,64	8,80
5	8,26	7,81	5,76

Conclusões

A técnica sugerida pela *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC) para quantificar cobre em cachaça e aguardente emprega a espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS), utilizando padrões que são preparados em solução alcoólica. Contudo, em razão do efeito da matriz, o método foi modificado ao trocar a curva de calibração pelo método de adição de padrões. Mesmo assim, o protocolo sugerido apresenta algumas desvantagens, como uma faixa linear limitada e uma baixa frequência de análises.

Os dados obtidos das amostras de Tiquira mostraram erros relativos que são considerados aceitáveis quando comparados ao método indicado pela AOAC, sugerindo que o método proposto pode ser uma alternativa válida. Embora existam outras abordagens espectrofotométricas para a medição de cobre em aguardentes, o trabalho de Oliveira e colaboradores se destaca pela composição da matriz analisada e complementa as informações existentes na literatura.

É importante ressaltar que, durante a leitura e avaliação do artigo base, nota-se um erro de digitação na tabela que contém o valor calculado para o Limite de Detecção do método desenvolvido por Oliveira e colaboradores, que está em mol.L⁻¹, indo em contrapartida com a notação apresentada

no resumo (mg.L⁻¹), o que pode propagar erros em futuros trabalhos que utilizem o artigo revisado como fonte.

Além disso, as análises mostraram que todas as amostras de Tiquira recolhidas estavam com concentrações de Cu(II) muito acima do valor permitido, tanto no Brasil, quanto no exterior, o que evidência um possível problema em alguma etapa da linha de produção da bebida, sendo claramente um risco aos consumidores, principalmente ao considerar que as amostras foram recolhidas em diferentes municípios.

Por fim, é importante frisar a enorme discrepância do erro relativo obtido para a amostra 1. Baseando-se nos dados e resultados do artigo analisado, o erro pode estar ligado a interferências na determinação do Cu(II)-PAN causadas por um forte efeito de matriz devido a íons de Fe(III) e Co(II), que mascaram completamente a banda de absorção do complexo analisado. Porém, como não há muitas informações da composição da amostra 1 e da presença desses íons nela, essa hipótese não pode ser totalmente confirmada, e interferências causadas devido a diferença no preparo das amostras, principalmente na etapa de digestão, e no uso do método de adição de padrão também podem ser consideradas.

Contribuições por Autor

O artigo, a revisão das referências utilizadas e a inclusão de algumas observações são de Pedro Henrique Carvalho Lima.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 SeTIC-UFSC, Materioteca Sustentável, <https://materioteca.paginas.ufsc.br/cobre/>, (accessed August 16, 2026).
- 2 Conheça as principais aplicações do cobre, <https://coppermetal.com.br/blog/conheca-as->

- principais-aplicacoes-do-cobre/, (accessed August 16, 2026).
- 3 A. E. Charkiewicz, Is Copper Still Safe for Us? What Do We Know and What Are the Latest Literature Statements? *Current Issues in Molecular Biology*, 2024, **46**, 8441–8463.
 - 4 A. Royer and T. Sharman, in *StatPearls*, StatPearls Publishing, Treasure Island (FL), 2026.
 - 5 S. A. Corassa and M. C. C. Nardi, Determinação de cobre em amostras de cachaça artesanal produzidas na região de Itapira-SP, *REVISTA OBSERVATORIO DE LA ECONOMIA LATINOAMERICANA*, 2023, **21**, 27808–27823.
 - 6 W. Feng, S. Su, C. Song, F. Yu, J. Zhou, J. Li, R. Jia, P. Xu and Y. Tang, Effects of Copper Exposure on Oxidative Stress, Apoptosis, Endoplasmic Reticulum Stress, Autophagy and Immune Response in Different Tissues of Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*), *Antioxidants*, 2022, **11**, 2029.
 - 7 M. A. Rodrigues, P. P. Silva e W. Guerra, Química Nova na Escola, 2012, **34**, 161–162.
 - 8 R. W. S. de Oliveira, P. R. B. Gomes, J. D. Ribeiro, J. B. Reis, M. A. Fontenele, G. O. Everton, W. da S. Lyra, H. C. Louzeiro, M. do L. de Paula and V. E. M. Filho, Determinação espectrofotométrica de Cobre(II) em aguardente de mandioca (Tiquira), *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 2020, **49**, 355–373.
 - 9 Decreto N° 12.709, https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/decreto/d12709.htm, (accessed August 17, 2026).
 - 10 K.Z. Brañina, Stripping voltammetry in chemical analysis, John Wiley & Sons, Incorporated, Michigan, 1974, p. 222
 - 11 P. Barbeira and N. Stradiotto, Differential pulse anodic stripping determination of Pb and Cu traces in tropical alcoholic drinks, *Anais Associação Brasileira de Química*, 1996, **45**, 97-101.
 - 12 R. Caulcutt, R. Boddy, Statistics for analytical chemists, Chapman & Hall, London 1995, p. 264.



protocolosemquimica@gmail.com



@protocolosemquimica



<https://protocolosemquimica.com/>

O grupo PET-Química/IQ/UnB agradece à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial.

