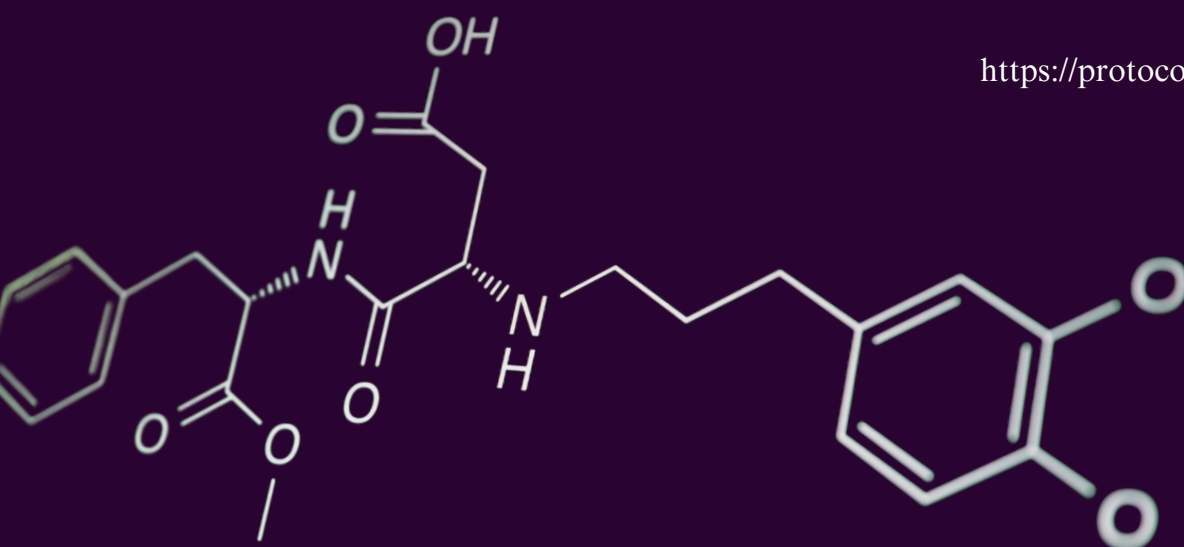


# Protocolos em Química

Vol. 4  
Nº. 2

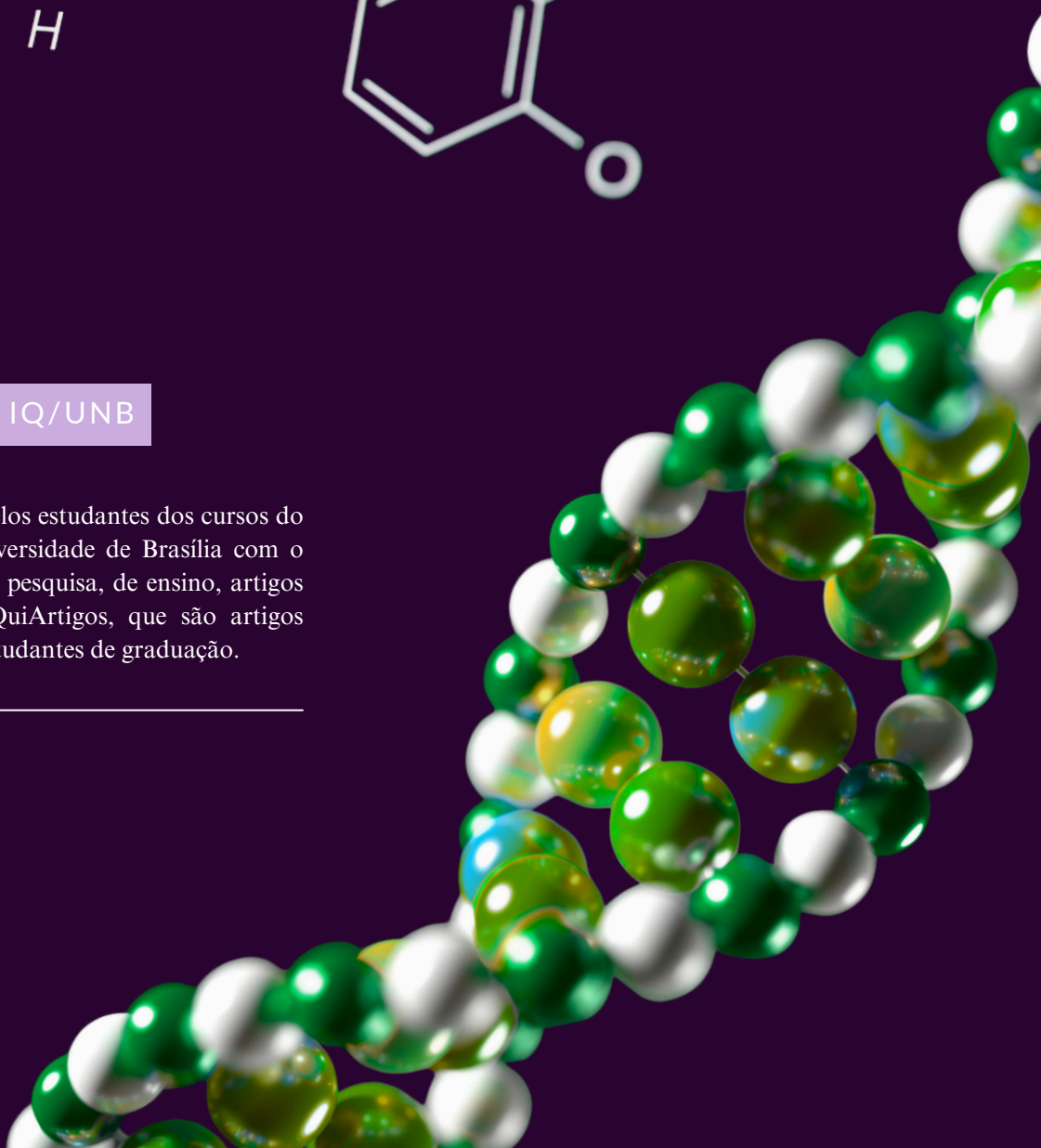
30 de abril de 2026

<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.



# SUMÁRIO

Sobre o projeto.....	03
Editoração.....	04
<b>Seção QuiArtigo:</b>	
A química por trás dos cremes cosméticos: o papel das emulsões.....	06
Arsênio e cádmio em solos do cerrado: ocorrência, monitoramento e impactos ambientais.....	10
Clonagem de genes e CRISPR-Cas9: progresso científico, limitações e desafios éticos...	16
Comparativo de métodos não-invasivos para análise e caracterização de tinta ferrogálica.....	23
Estudos de determinação estrutural de complexos de $Cd^{2+}$ com ligante do tipo hidrazona utilizando a técnica de difração de raio-X em monocristal.....	28
Produção de clorofórmio em reator PFR: modelagem matemática e simulação computacional.....	32
Resíduos de antibióticos em amostras de milho: um novo método válido, rápido e confiável, utilizando HPLC-FLD.....	37
Saneamento e precariedade urbana: uma análise crítica sobre o acesso à água e ao esgoto em assentamentos informais.....	45



# 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 Aleksandro 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

## **Atos de Jesus Silva**

Estudante de Licenciatura em 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.

## **Bruna Seguins**

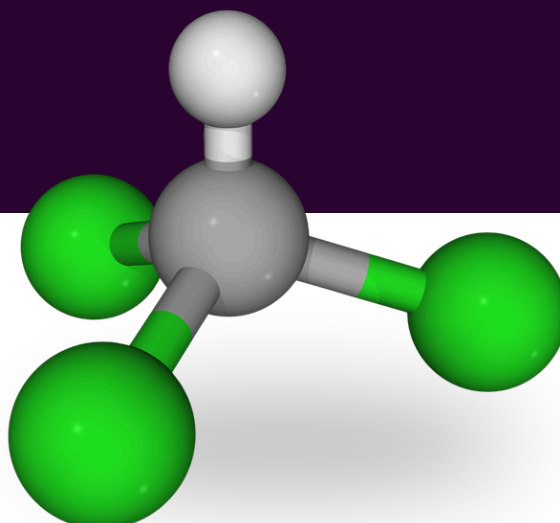
Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

## **Catarina Sampaio**

Estudante de Bacharelado em Química 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.

**Julia Ribeiro**

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

**Larissa Cavalcante**

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

**Linara Tarusa**

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

**Pedro Henrique Carvalho**

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



# A química por trás dos cremes cosméticos: o papel das emulsões

DOI: 10.5281/zenodo.19890941

Julia Ribeiro Dias <sup>a\*</sup>

Cosmetics play a significant role in everyday life, being widely used for personal care, hygiene, and well-being. Among these products, cosmetic creams stand out, as their efficacy and stability are directly related to their chemical composition. This study aimed to analyze the chemical principles involved in the formulation of these products, with an emphasis on the role of emulsions. Based on a bibliographic review, it was found that emulsions consist of systems formed by the dispersion of immiscible liquids, such as water and oil, stabilized by emulsifying agents that reduce interfacial tension and ensure system homogeneity. It was also observed that the choice of emulsion type, whether oil-in-water or water-in-oil, as well as the selection of surfactants, directly influences the physicochemical, sensory, and functional properties of the creams. Thus, the importance of formulation control for obtaining stable, effective, and safe products is highlighted.

Os cosméticos desempenham papel relevante no cotidiano, sendo amplamente utilizados para cuidados pessoais, higiene e bem-estar. Dentre esses produtos, destacam-se os cremes cosméticos, cuja eficácia e estabilidade estão diretamente relacionadas à sua composição química. Este trabalho teve como objetivo analisar os fundamentos químicos envolvidos na formulação desses produtos, com ênfase no papel das emulsões. A partir de uma revisão bibliográfica, verificou-se que as emulsões consistem em sistemas formados pela dispersão de líquidos imiscíveis, como água e óleo, estabilizados por agentes emulsificantes que reduzem a tensão interfacial e garantem a homogeneidade do sistema. Observou-se que a escolha do tipo de emulsão, seja óleo em água ou água em óleo, bem como a seleção de tensoativos, influencia diretamente as propriedades físico-químicas, sensoriais e funcionais dos cremes. Dessa forma, destaca-se a importância do controle da formulação para a obtenção de produtos estáveis, eficazes e seguros.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: juliariberdias@gmail.com

**Palavras-chave:** Cosméticos; cremes cosméticos; emulsões.

Aceito em 12 de abril de 2026,  
Aprovado em 26 de abril de 2026,  
Publicado em 30 de abril de 2026.

## Introdução

**De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), os cosméticos são produtos destinados ao uso externo no corpo humano, com a finalidade de limpeza, proteção, perfumação ou alteração da aparência. Essa definição, presente em regulamentações como a Resolução RDC nº 07, de 10 de fevereiro de 2015, evidencia que esses produtos fazem parte do cotidiano e estão sujeitos a critérios rigorosos de segurança e qualidade.<sup>1</sup>**

Dentre esses produtos, os cremes hidratantes se destacam pela sua importância na manutenção da integridade da pele. Sendo o maior órgão do corpo humano, a pele atua como uma barreira entre o organismo e o meio externo, desempenhando papel fundamental na proteção contra agentes infecciosos e substâncias tóxicas. Dessa forma, necessita de cuidados constantes para evitar a perda de água, processo conhecido como desidratação cutânea. Nesse sentido, os hidratantes atuam promovendo a retenção hídrica e formando uma camada protetora, contribuindo para o equilíbrio e a saúde da pele.<sup>2</sup>

Estima-se que seja necessário um teor mínimo de aproximadamente 10% de água no estrato córneo, a camada mais externa da pele, para a manutenção de sua integridade. Essa camada é a principal responsável pela retenção de água, sendo essencial para a preservação da hidratação em todos os níveis cutâneos.<sup>3</sup>

Do ponto de vista da formulação, os cremes hidratantes são compostos por substâncias com diferentes características físico-químicas, sendo obtidos pela mistura de componentes oleosos, de natureza apolar, e aquosos, de natureza polar. No entanto, a combinação desses constituintes representa um desafio tecnológico, uma vez que são naturalmente imiscíveis, ou seja, não se misturam espontaneamente.<sup>4</sup>

Para superar essa limitação, a indústria cosmética utiliza sistemas como as emulsões, que permitem a dispersão de um líquido em outro na forma de pequenas gotículas. Esse processo é viabilizado pela presença de agentes emulsificantes, responsáveis por reduzir a tensão interfacial entre as fases e estabilizar a mistura, garantindo a formação de produtos

homogêneos, com propriedades adequadas de textura, estabilidade e eficácia.<sup>3</sup>

Além disso, as emulsões desempenham papel essencial na determinação das características sensoriais e funcionais dos cremes cosméticos, influenciando aspectos como viscosidade, absorção e liberação de princípios ativos. Tais propriedades são determinantes para a aceitação do produto pelo consumidor e para o seu desempenho dermatológico.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a química por trás dos cremes hidratantes, com ênfase no papel das emulsões em sua formulação, destacando a importância dos agentes emulsificantes na obtenção de produtos seguros, eficazes e estáveis.

## Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa, baseada na análise de artigos científicos, livros e documentos técnicos relacionados à área de cosméticos. A pesquisa foi realizada por meio de plataformas digitais, como bases de dados acadêmicas e científicas, incluindo Google Acadêmico, SciELO e periódicos especializados, utilizando palavras-chave como “cosméticos”, “cremes cosméticos” e “emulsões”, bem como suas combinações.

Como critérios de inclusão, foram considerados estudos publicados no período de 2010 a 2025, redigidos em português e inglês, que abordassem a composição, formulação e os princípios físico-químicos envolvidos na produção de cosméticos, especialmente emulsões.

## Resultados e discussão

### Emulsões em cremes cosméticos

Cremes cosméticos são sistemas coloidais amplamente empregados na indústria de cuidados pessoais, caracterizados pela combinação de substâncias com propriedades físico-químicas distintas. Esses produtos são geralmente constituídos por uma fase aquosa, de natureza polar, e uma fase oleosa, de natureza apolar. Entretanto, tais componentes são naturalmente imiscíveis, o que torna necessária a utilização de estratégias que garantam a estabilidade e a homogeneidade da formulação.<sup>4</sup>

Nesse contexto, as emulsões desempenham papel fundamental, sendo definidas como sistemas heterogêneos nos

quais um líquido é disperso em outro na forma de pequenas gotículas microscópicas. Essa estrutura permite a obtenção de produtos com características adequadas de textura, espalhabilidade e eficácia, tornando-se essencial para o desenvolvimento de cremes cosméticos estáveis e seguros. Além disso, as emulsões influenciam diretamente as propriedades sensoriais dos produtos, como viscosidade, brilho, absorção e toque na pele, fatores determinantes para a aceitação do consumidor e para o desempenho do cosmético.<sup>4</sup>

### Tipos de emulsões

As emulsões podem ser classificadas de acordo com a distribuição das fases dispersa e contínua, sendo os dois principais tipos: óleo em água (O/A) e água em óleo (A/O). As emulsões do tipo óleo em água apresentam gotículas de óleo dispersas na fase aquosa e são amplamente utilizadas em cremes hidratantes e loções corporais devido à sua textura leve, rápida absorção e sensação não oleosa na pele. Além disso, apresentam fácil remoção e proporcionam maior conforto ao usuário. Por outro lado, as emulsões do tipo água em óleo possuem gotículas de água dispersas na fase oleosa, resultando em formulações mais viscosas e emolientes.<sup>2,5</sup>

Essas emulsões apresentam maior resistência à evaporação da água e maior capacidade de formar uma barreira protetora sobre a pele, sendo indicadas para produtos destinados à nutrição e proteção de peles secas e sensíveis. Dessa forma, a escolha do tipo de emulsão influencia diretamente as propriedades sensoriais, a estabilidade e a eficácia do cosmético, evidenciando a importância do controle da formulação no desenvolvimento industrial.<sup>2,4</sup>

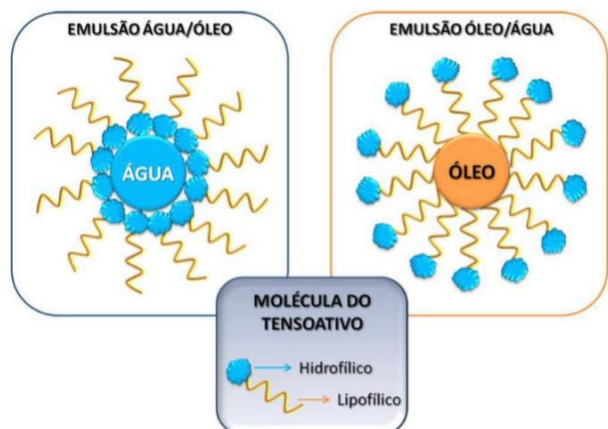
### Papel dos tensoativos e emulsificantes

A estabilidade das emulsões é assegurada pela presença de agentes emulsificantes, que pertencem à classe dos tensoativos. Essas substâncias apresentam estrutura anfifílica, composta por uma porção hidrofílica e outra lipofílica, permitindo a interação entre fases imiscíveis, como água e óleo.<sup>4</sup>

Do ponto de vista físico-químico, é importante destacar que emulsões são sistemas termodinamicamente instáveis. Assim, a chamada “estabilidade” refere-se, na realidade, a uma estabilidade cinética. Conforme ilustrado na Figura 1, os emulsificantes atuam reduzindo a tensão interfacial entre as fases e formando uma barreira protetora ao redor das gotículas dispersas. Essa barreira dificulta a aproximação e a coalescência das gotículas, retardando os processos de separação de fases. Dessa forma, garantem a

homogeneidade e prolongam a vida útil dos cremes cosméticos.<sup>3,5</sup>

**Figura 1.** Esquema de micelas água-em-óleo, óleo-em-água e de uma molécula de tensoativo. Extraído da referência 4.



Além disso, o sistema de Balanço Hidrofílico-Lipofílico (HLB), proposto por Griffin, constitui um parâmetro essencial na formulação, sendo amplamente utilizado como padrão industrial para a seleção de tensoativos. Esse sistema atribui valores numéricos aos emulsificantes de acordo com sua afinidade relativa por fases aquosas ou oleosas. Emulsificantes com valores elevados de HLB são mais indicados para emulsões do tipo óleo em água, enquanto aqueles com valores reduzidos são mais adequados para emulsões do tipo água em óleo. Sem a consideração desse parâmetro, a escolha do emulsificante torna-se incompleta e menos eficiente. Entre os diversos tipos de tensoativos, os não iônicos destacam-se por sua elevada estabilidade química, baixa toxicidade e menor potencial de irritação cutânea, sendo amplamente empregados na produção de cremes cosméticos hipoalergênicos (formulados para minimizar riscos de reações alérgicas) e compatíveis com a pele.<sup>4,5</sup>

### Estabilidade das emulsões

A estabilidade das emulsões constitui um fator determinante para a qualidade e a vida útil dos produtos cosméticos. Entre os principais mecanismos de instabilidade destacam-se a floculação, a sedimentação, a cremagem, a coalescência e a inversão de fases. A floculação ocorre quando as gotículas se agregam sem ruptura de sua interface; a cremagem e a sedimentação resultam da diferença de densidade entre as fases; a coalescência corresponde à fusão das gotículas, levando à separação das fases; e a inversão de fases refere-se à mudança do tipo de emulsão, de óleo em água para água em óleo ou vice-versa.<sup>3,6</sup>

A cremagem e a sedimentação podem ser descritas quantitativamente pela Lei de Stokes, que expressa a velocidade de migração das gotículas em função de parâmetros como o raio das partículas, a diferença de densidade entre as fases e a viscosidade do meio contínuo:

$$v = \frac{2r^2(\rho_d - \rho_c)g}{9\eta} \quad (1)$$

Em que  $v$  é a velocidade de separação,  $r$  é o raio das gotículas,  $\rho_d$  e  $\rho_c$  são as densidades da fase dispersa e contínua, respectivamente,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\eta$  é a viscosidade da fase contínua. Essa relação demonstra que a redução do tamanho das gotículas e o aumento da viscosidade da fase externa são estratégias eficazes para minimizar a separação e aumentar a estabilidade cinética da emulsão.<sup>6,7</sup>

Outro fenômeno relevante é o amadurecimento de Ostwald, que consiste no crescimento de gotículas maiores à custa da dissolução das menores, devido a diferenças de pressão de Laplace e solubilidade. Esse processo leva ao aumento do tamanho médio das gotículas ao longo do tempo, contribuindo para a instabilidade da emulsão, mesmo na ausência de coalescência direta.<sup>7</sup>

Diversos fatores influenciam a estabilidade dessas formulações, tais como o tipo e a concentração do emulsificante, o tamanho das gotículas, a viscosidade do sistema, o pH da formulação, a temperatura e as condições de armazenamento, bem como a intensidade da agitação durante o processo produtivo. O controle dessas variáveis é essencial para garantir a eficiência, a segurança e a qualidade dos cremes cosméticos, assegurando sua conformidade com os padrões exigidos pela indústria e pelos órgãos reguladores.<sup>2,5</sup>

## Conclusões

A química desempenha papel central na formulação de cremes cosméticos, especialmente no que se refere à aplicação de emulsões para a obtenção de produtos estáveis, eficazes e seguros. A análise evidenciou que a combinação de substâncias hidrofílicas e lipofílicas constitui um desafio físico-químico, em razão de sua imiscibilidade natural, sendo as emulsões fundamentais para viabilizar a interação entre essas fases e garantir a homogeneidade das formulações.

Verificou-se que a escolha do tipo de emulsão, seja óleo em água (O/A) ou água em óleo (A/O), influencia diretamente as propriedades sensoriais, a estabilidade e a

eficácia dos cremes cosméticos. Ademais, o emprego de tensoativos com características anfífilas mostra-se indispensável para a redução da tensão interfacial e para a manutenção da estabilidade ao longo do tempo.

Reconhece-se como limitação o caráter teórico desta revisão o que certamente reduziu a abrangência dos estudos analisados. Para avançar, seria produtivo testar experimentalmente formulações e explorar técnicas como emulsificação a baixa energia, visando uma transferência mais direta para a indústria cosmética.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de detalhes obtidos por artigos auxiliares são de Julia Ribeiro Dias.

## 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 Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), Resolução RDC nº 7, de 10 de fevereiro de 2015, Brasil, 2015. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2015/rdc0007\\_10\\_02\\_2015.pdf](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2015/rdc0007_10_02_2015.pdf)
- 2 FIDELIS, Lorena de Moraes. Desenvolvimento, avaliação e classificação de emulsões cosméticas Óleo/Água, 2020.
- 3 SILVA, M. F. Aplicação de emulsões múltiplas na indústria de cosméticos: uma revisão da literatura, 2021.
- 4 L. R. Sartori, N. P. Lopes and T. Guaratini, A Química no Cuidado da Pele, *Sociedade Brasileira de Química, São Paulo*, 2021, **5**.
- 5 CASTRO, R. M. L. Emulsão: uma revisão bibliográfica, 2014.
- 6 Atkins, P. and de Paula, J., Físico-Química, *LTC, Rio de Janeiro*, 2014, **10**.
- 7 Aulton, M. E. and Taylor, K., Delitos Farmacêuticos: A Ciência das Formas Farmacêuticas, *Elsevier, Rio de Janeiro*, 2016, **4**.

# Arsênio e cádmio em solos do cerrado: ocorrência, monitoramento e impactos ambientais

DOI: 10.5281/zenodo.19902706

Atos de Jesus Silva <sup>a\*</sup>

The cerrado biome stands out as one of Brazil's main agricultural regions, driven by favorable climate, mechanization, and correction of naturally nutrient-poor soils. However, the continuous use of fertilizers and amendments may introduce toxic elements such as arsenic (As) and cadmium (Cd), promoting diffuse soil contamination. The mobility of these elements depends on factors such as pH, organic matter, and mineralogy. Studies in preserved areas indicate low natural levels of As and Cd, important as environmental reference values. Thus, agricultural sustainability in the cerrado biome depends on balancing productivity and conservation of natural resources.

O bioma cerrado destaca-se como uma das principais regiões agrícolas do Brasil, impulsionado por clima favorável, mecanização e correção de solos naturalmente pobres de nutrientes. Contudo, o uso contínuo de fertilizantes e corretivos pode introduzir elementos tóxicos, como Arsênio (As) e Cádmio (Cd), favorecendo contaminação difusa do solo. A mobilidade desses elementos depende de fatores como pH, matéria orgânica e mineralogia. Estudos em áreas preservadas indicam baixos teores naturais de As e Cd, importantes como valores de referência ambiental. Assim, a sustentabilidade agrícola no bioma cerrado depende do equilíbrio entre produtividade e conservação dos recursos naturais.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: euatos1@gmail.com

**Palavras-chave:** Cerrado; fertilizantes; metais pesados; arsênio; cádmio.

Recebido em 12 de abril de 2026,

Aprovado em 26 de abril de 2026,

Publicado em 30 de abril de 2026.

## Introdução

O cerrado destaca-se como uma das regiões mais importantes para a produção agrícola brasileira, sendo responsável pelo cultivo de alimentos essenciais ao consumo interno e por expressivas taxas de exportação de *commodities*, como a soja.<sup>1</sup> A expansão da fronteira agrícola nesse bioma contribuiu significativamente para a consolidação do Brasil no mercado global de alimentos, transformando o cerrado em um dos principais centros produtivos do país.<sup>2</sup> Entretanto, o avanço da produção em larga escala está associado a diversos impactos ambientais, entre eles a supressão da vegetação nativa, alterações nos ciclos hidrológicos, degradação física e química do solo e intensificação do uso de insumos agrícolas.<sup>1</sup> Nesse cenário, fertilizantes, corretivos e outros agentes químicos tornaram-se ferramentas fundamentais para sustentar elevados níveis de produtividade, especialmente em solos naturalmente pobres em nutrientes.<sup>3</sup>

Embora esses insumos desempenhem papel estratégico na agricultura moderna, sua utilização contínua pode introduzir ou acumular elementos potencialmente tóxicos no ambiente. Entre esses elementos, destacam-se o Arsênio (As) e o Cádmio (Cd), substâncias de interesse ambiental e toxicológico devido à sua persistência no solo, capacidade de

mobilização e potencial entrada na cadeia alimentar por meio das culturas agrícolas. Quando presentes em concentrações elevadas, esses contaminantes podem representar graves riscos à saúde humana e aos ecossistemas.<sup>4</sup>

Além das fontes antrópicas, As e Cd também podem ocorrer naturalmente nos solos em decorrência do material de origem e de processos geológicos, mesmo que em valores baixos.<sup>5</sup> Dessa forma, distinguir concentrações naturais de contaminações decorrentes da atividade humana constitui um desafio técnico importante. Nesse contexto, estudos que estabelecem valores de referência ou concentrações de base tornam-se essenciais para programas de monitoramento e gestão ambiental.<sup>6</sup>

Com base nessas considerações, este trabalho propõe discutir os impactos ambientais associados ao uso de agentes químicos no solo do bioma cerrado, tomando como referência estudos sobre os teores naturais de Arsênio e Cádmio em áreas sem contaminação intencional, bem como relacionando esses dados à dinâmica de solos submetidos ao manejo agrícola intensivo.

## Metodologia

A metodologia adotada baseou-se em pesquisa bibliográfica de caráter específico, utilizando palavras-chave como metais pesados, cerrado, agricultura, Arsênio, Cádmiio e contaminação do solo. A busca foi realizada em periódicos científicos e bases de dados como *Google Scholar*, SciELO e *ScienceDirect*. O acesso aos materiais foi viabilizado por meio do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), através da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), recurso disponibilizado gratuitamente aos estudantes da Universidade de Brasília (UnB). Complementarmente, utilizou-se como referência bibliográfica a obra *Heavy Metals in Soils*,<sup>5</sup> empregada como fonte de dados para contextualização, quantificação de metais e análise de suas ocorrências em solos.

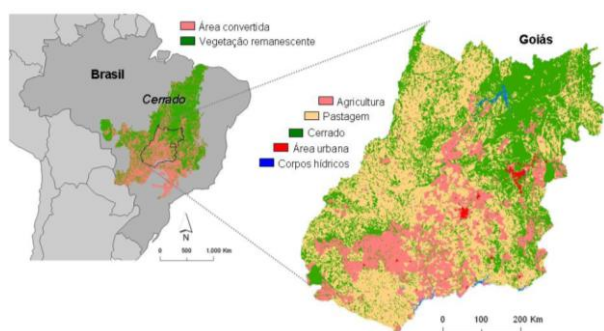
## Resultados e discussão

### Importância agrícola e expansão produtiva do cerrado

O cerrado consolidou-se como uma das regiões mais estratégicas para a agropecuária brasileira, desempenhando papel fundamental no abastecimento interno e na geração de excedentes destinados ao mercado externo. A elevada disponibilidade de terras agricultáveis, associada ao avanço tecnológico no manejo do solo e ao desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições climáticas da região, contribuiu para a expansão expressiva da produção agrícola nas últimas décadas.<sup>7</sup> Culturas como soja, milho, algodão e a pecuária extensiva ganharam destaque econômico, tornando o bioma peça central na balança comercial brasileira.<sup>8</sup> A Figura 1, apresenta as divisões e subdivisões regionais do cerrado utilizadas para caracterização territorial e estudos ambientais.

**Figura 1.** Localização e distribuição das classes de cobertura e uso da terra para o bioma cerrado e Estado de Goiás.

Extraído da referência 8.



Outro fator determinante para o sucesso agrícola do cerrado é seu regime climático bem definido, caracterizado por duas estações predominantes: uma chuvosa e outra seca. Essa

alternância sazonal favorece o planejamento das atividades agrícolas, permitindo maior previsibilidade para o preparo do solo, sementeira, desenvolvimento das culturas e colheita. O período chuvoso oferece condições favoráveis ao crescimento vegetal e à disponibilidade hídrica, enquanto a estação seca pode facilitar operações mecanizadas, colheita e manejo de determinadas áreas produtivas. A ascensão produtiva do cerrado está diretamente relacionada à modernização do setor agrícola, marcada pela mecanização, correção química dos solos e uso intensivo de fertilizantes e defensivos agrícolas.<sup>9</sup>

Solos originalmente considerados de baixa fertilidade natural passaram a sustentar elevadas produtividades por meio da aplicação de técnicas agrônômicas específicas voltadas à correção de limitações químicas e físicas. Entre essas práticas, destacam-se a calagem, utilizada para elevar o pH do solo, reduzir a toxicidade do alumínio trocável e aumentar a disponibilidade de nutrientes, e a adubação mineral, responsável pelo fornecimento de elementos essenciais como Fósforo (P), Nitrogênio (N) e Potássio (K).<sup>9</sup> Contudo, muitos insumos agrícolas empregados nesses processos podem conter resíduos ou impurezas de elementos potencialmente tóxicos, como Arsênio (As) e Cádmiio (Cd), introduzidos a partir da matéria-prima utilizada em sua fabricação.<sup>10</sup> Em solos do cerrado, marcados por elevada acidez e intensa dinâmica química, a presença desses elementos torna-se relevante, pois pode favorecer processos de retenção, mobilização ou absorção pelas plantas, dependendo das condições ambientais. Dessa forma, o manejo químico que viabilizou a alta produtividade também reforça a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade do solo e dos possíveis contaminantes associados à atividade agrícola.<sup>6</sup>

### Fertilizantes como fonte difusa de contaminação ambiental

Tendo em vista que os solos do cerrado apresentam baixa fertilidade natural, os elevados índices de produtividade agrícola observados na região só se tornaram possíveis por meio da correção da acidez do solo, da adubação mineral e do melhoramento genético das culturas.<sup>11</sup> O uso intensivo de fertilizantes passou a representar um dos principais fatores associados à alteração química dos solos agrícolas, especialmente em sistemas de produção contínua e de alta demanda nutricional. Embora esses insumos sejam aplicados com a finalidade de suprir nutrientes essenciais às plantas, sua composição pode incluir impurezas minerais provenientes das matérias-primas utilizadas em sua fabricação, sobretudo no caso dos fertilizantes fosfatados. As rochas fosfáticas, amplamente empregadas na produção desses fertilizantes,

apresentam composição variável conforme sua origem geológica, podendo conter elementos potencialmente tóxicos em concentrações distintas. Entre os contaminantes mais frequentemente relatados destacam-se o Cádmio (Cd), o Arsênio (As) e o Cromo (Cr).<sup>10</sup> Diferentemente de eventos pontuais de poluição, a introdução desses contaminantes ocorre de maneira gradual e distribuída ao longo do tempo, caracterizando um processo de contaminação difusa, decorrente do uso contínuo de fontes antropogênicas previamente mencionadas.<sup>12</sup> Em áreas agrícolas extensas, aplicações sucessivas podem promover o acúmulo progressivo desses elementos na camada superficial do solo, muitas vezes sem sinais visíveis imediatos de degradação ambiental.

O comportamento químico desses resíduos depende diretamente das propriedades do solo. Fatores como pH, teor de matéria orgânica, textura, mineralogia e capacidade de troca catiônica influenciam processos de adsorção, retenção, solubilização e mobilidade. Em condições favoráveis, parte desses elementos pode tornar-se biodisponível, aumentando a possibilidade de absorção pelas plantas ou de transporte para águas superficiais e subterrâneas.<sup>13</sup> Dessa forma, a avaliação da qualidade dos fertilizantes e o monitoramento periódico dos solos agrícolas tornam-se medidas essenciais para prevenir o acúmulo de contaminantes e garantir que o aumento da produtividade não ocorra em detrimento da qualidade ambiental, como foi destacado anteriormente.<sup>6</sup>

#### **Arsênio e Cádmio em solos do cerrado: ocorrência, mobilidade e riscos**

A presença de Arsênio (As) e Cádmio (Cd) nos solos pode estar associada tanto a processos naturais quanto às atividades humanas. Entretanto, a determinação de teores verdadeiramente naturais desses elementos constitui um desafio técnico relevante, uma vez que grande parte da superfície terrestre já sofreu algum grau de interferência antrópica ao longo do tempo, seja por atividades agrícolas, deposição atmosférica, urbanização, mineração ou descarte de resíduos.<sup>5</sup> A Tabela 1 apresenta valores médios observados em diferentes regiões do mundo para Arsênio (As) e Cádmio (Cd) em solos, permitindo contextualizar os resultados obtidos para o cerrado em relação ao cenário internacional.

**Tabela 1.** Concentrações medianas e máximas de metais pesados totais em solos superficiais de diferentes países e valores médios para solos do mundo (mg.kg<sup>-1</sup>). Extraída da referência 7.

	<b>Europa</b>	<b>EUA</b>	<b>Mundo</b>
Nº de amostras	852	1,903	-
As	6.0 (< 27.3)	-	4,7
Cd	0.145 (< 14)	0,16 (<41)	1,1

Nessas condições, a literatura frequentemente adota o conceito de concentração de base (*background*), entendido como o valor encontrado em determinada área e período, utilizado como referência para programas de monitoramento ambiental.<sup>6, 14</sup>

No contexto do cerrado, essa discussão torna-se especialmente importante em razão da rápida expansão agrícola observada nas últimas décadas. A intensificação do uso de fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas e resíduos orgânicos pode elevar progressivamente os teores de elementos potencialmente tóxicos no sistema solo, dificultando a distinção entre contribuições naturais e acréscimos decorrentes do manejo agrícola.<sup>9</sup> Soma-se a isso a ainda limitada disponibilidade de estudos voltados à determinação de teores naturais e valores de referência para solos desse bioma, o que amplia a relevância de investigações nessa área. Dessa forma, estudos conduzidos em áreas sem contaminação intencional tornam-se essenciais para estabelecer valores comparativos confiáveis.

Com esse objetivo, o artigo utilizado como base teórica avaliou solos representativos de três sub-regiões do bioma cerrado: leste de Goiás (G), Triângulo Mineiro (T) e nordeste de Minas Gerais (N). As amostras foram coletadas em locais nunca cultivados e distantes de estradas, indústrias e outras fontes potenciais de contaminação, buscando minimizar interferências externas. Após preparo laboratorial, as determinações de As e Cd foram realizadas por digestão ácida em forno de micro-ondas (método USEPA 3051A) e quantificação por espectrometria de absorção atômica com atomização eletrotérmica.<sup>6</sup>

Os resultados, evidenciados na Tabela 2, mostraram baixos teores médios de Arsênio (As), com a seguinte ordem entre as sub-regiões: G (3,29 mg.kg<sup>-1</sup>) > T (2,18 mg.kg<sup>-1</sup>) > N (0,62 mg.kg<sup>-1</sup>). Para o Cádmio (Cd), os maiores valores

ocorreram em G (2,45 mg.kg<sup>-1</sup>) e T (1,88 mg.kg<sup>-1</sup>), ambos superiores à sub-região N (1,16 mg.kg<sup>-1</sup>). A Tabela 3 complementa essa análise ao apresentar a distribuição dos teores em função das classes de solo, evidenciando variações associadas às características pedológicas de cada ambiente. De modo geral, os autores observaram que os teores encontrados para os solos do cerrado são baixos quando comparados a diversos solos avaliados em outras regiões do mundo.<sup>6, 14</sup>

**Tabela 2.** Teores médios de As e Cd para as sub-regiões G (Leste de Goiás), T (Triângulo Mineiro e N (nordeste de MG). Extraído da referência 6.

Sub-regiões	As	Cd
	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>
G	3,29 A	2,45 A
T	2,18 B	1,88 A
N	0,62 C	1,16 B

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si a testes F e t, nível mínimo de significância a 5%.

**Tabela 3.** Teores médios de As e Cd para as sub-regiões G (Leste de Goiás), T (Triângulo Mineiro e N (nordeste de MG). Extraído da referência 6.

Classe de solo	As	Cd
	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
Sub-região G		
CXbd	2,75 B	7,00 A
LAW	2,95 B	1,58 B
LVw	2,22 B	1,97 B
LVd	2,75 B	2,29 B
FFc	7,76 A	1,78 B
Sub-região T		
LVAd	3,79 A	1,27 B
LVd1	1,46 BC	1,39 B
LVd2	0,87 C	1,47 B
LVdf1	3,51 AB	3,32 A
Sub-região N		
LAd	1,37 A	1,45 A
LVAd	0,55 ABC	1,14 A
LVd1	0,45 BC	1,65 A
LVd2	1,03 AB	0,92 A
RQo	0,28 C	0,90 A

As comparações entre classes de solos dentro de cada sub-região foram testadas por meio dos testes F e t (p<0,05), sendo que médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si.

De acordo com os autores, o solo que apresentou maior teor de As foi o Plintossolo (FFc), o qual apresenta elevada presença de óxidos de ferro, característica que favorece a adsorção específica de arsênio devido à alta área superficial e à presença de grupos hidroxila reativos nesses minerais. Em contraste, o menor teor de As foi observado no Neossolo Quartzarênico (RQo) da sub-região N, o que está associado aos baixos teores de argila e óxidos de ferro, à reduzida área superficial específica e ao efeito de diluição característico de solos arenosos, que limita a retenção e favorece a remoção do elemento pela água infiltrada.<sup>6</sup>

Na sub-região G, ainda se observa predominância de sedimentos argilosos de cobertura, que favorecem a formação de solos mais desenvolvidos e ricos em frações finas, com maior presença de óxidos de ferro. Essas características aumentam a área superficial e a quantidade de sítios reativos no solo, o que intensifica a retenção de elementos traço, como o arsênio (As). Em contraste, na sub-região N, a predominância de materiais arenosos, como arenitos, resulta em solos menos desenvolvidos, com baixa fração argilosa e menor presença de óxidos de ferro. Essas condições reduzem a capacidade de adsorção e favorecem a remoção dos elementos pela água no solo, levando a menores concentrações de arsênio.<sup>6</sup>

A mobilidade de arsênio e cádmio no solo está diretamente relacionada às suas formas iônicas predominantes, que controlam suas interações com os constituintes do solo. O arsênio, em condições oxidantes, ocorre principalmente como arsenato (AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), uma espécie aniônica que apresenta forte afinidade por óxidos de ferro e alumínio, sendo, portanto, mais facilmente adsorvida e menos móvel em solos ricos nesses minerais, o que caracteriza sua maior toxicidade. Por outro lado, o cádmio encontra-se predominantemente como Cd<sup>2+</sup>, uma espécie catiônica cuja retenção depende da capacidade de troca catiônica do solo. Em ambientes ácidos, comuns no Cerrado, essa retenção é reduzida, aumentando sua mobilidade na solução do solo. Dessa forma, a natureza iônica dessas espécies desempenha papel fundamental na determinação de seu comportamento, influenciando sua disponibilidade para as plantas e seu potencial de transporte no ambiente.<sup>15, 16</sup>

## Conclusões

Evidentemente o cerrado ocupa posição estratégica na produção agrícola brasileira, resultado da combinação entre extensão territorial, condições climáticas favoráveis e avanço tecnológico aplicado ao campo. A definição sazonal entre períodos chuvoso e seco, associada ao desenvolvimento de técnicas de manejo e ao melhoramento genético das culturas, contribuiu para consolidar o bioma como uma das principais fronteiras agrícolas do país. Contudo, essa elevada produtividade depende diretamente de intervenções químicas e físicas capazes de corrigir limitações naturais dos solos da região.<sup>9</sup>

Entre essas intervenções, destaca-se o uso intensivo de fertilizantes e corretivos, fundamentais para suprir nutrientes e elevar a eficiência produtiva. Entretanto, tais insumos também podem atuar como fontes difusas de elementos potencialmente tóxicos, introduzidos gradualmente no solo ao longo de sucessivas aplicações. Esse processo demonstra que o aumento da produtividade agrícola, quando dissociado de práticas de monitoramento e controle de qualidade, pode favorecer o acúmulo silencioso de contaminantes no ambiente.

No caso específico do Arsênio (As) e do Cádmio (Cd), observa-se que sua presença no solo não está vinculada exclusivamente às atividades humanas, podendo também decorrer também de processos geológicos. Essa dualidade torna complexa a distinção entre concentrações naturais e contaminação antrópica, reforçando a importância de estudos voltados ao estabelecimento de valores de referência. O artigo analisado demonstrou que solos preservados do cerrado apresentam baixos teores desses elementos, fornecendo parâmetros relevantes para futuras avaliações ambientais.<sup>6</sup>

Conclui-se então que a sustentabilidade da agricultura no cerrado depende do equilíbrio entre produtividade e conservação ambiental. A adoção de práticas agrícolas responsáveis, aliada ao monitoramento químico contínuo dos solos e ao uso criterioso de insumos, é essencial para garantir segurança alimentar, proteção dos ecossistemas e manutenção da capacidade produtiva do bioma em longo prazo.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre os artigos em referência e a inclusão de observações são de Atos de Jesus Silva.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB e à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC). Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 F.A. de Queiroz, “Impactos da sojicultura de exportação sobre a biodiversidade do cerrado,” *Sociedade & Natureza*, 2009, **21**(2), 193–209.
- 2 N. Rada, “Assessing Brazil’s cerrado agricultural miracle” *Food Policy*, 2013, **38**, 146–155.
- 3 A.P. Chagas, “A síntese da amônia: alguns aspectos históricos,” *Quim Nova*, 2007, **30**(1), 240–247.
- 4 B. Gontijo, and F. Bittencourt, “Arsênio: uma revisão histórica,” *An Bras Dermatol*, 2005, **80**(1), 91–95.
- 5 B.J. Alloway, *Heavy Metals in Soils : Trace Metals and Mettalloids in Soils and Their Bioavailability*, Springer, 2013.
- 6 M.L. Campos, L.R.G. Guilherme, J.J.G. de S. e M. Marques, N. Curi, A.S.A. Araújo, D.J. Miquelluti, C. Lopes, and F.R. Spiazzi, “Teores de Arsênio e Cádmio em solos do bioma cerrado,” *Rev Bras Cienc Solo*, 2013, **37**(1), 281–286.
- 7 L.G. Ferreira, M.E. Ferreira, G.F. Rocha, M. Nemayer, and N.C. Ferreira, “Dinâmica agrícola e desmatamentos em áreas de cerrado: uma análise a partir de dados censitários e imagens de resolução moderada,” *Revista Brasileira de Cartografia*, 2009, **61**(2).
- 8 Embrapa, *Trajatória da agricultura brasileira*, <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira> (accessed April 10, 2026)
- 9 M. Siqueira Neto, M.D.C. Piccolo, E. Scopel, C. Costa Junior, C.C. Cerri, and M. Bernoux, “Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no cerrado,” *Acta Sci Agron*, 2009, **31**(4).
- 10 M.R. de Carvalho, T.A. de Almeida, G.A.Z. van Opbergen, F.H.A. Bispo, L. Botelho, A.B. de Lima,

- P.E.R. Marchiori, and L.R.G. Guilherme, “Arsenic, cadmium, and chromium concentrations in contrasting phosphate fertilizers and their bioaccumulation by crops: Towards a green label?,” *Environ Res*, 2024, 263.
- 11 Embrapa, Artigo – Dia da agricultura: como a pesquisa científica transformou o cerrado em referência mundial de produtividade e sustentabilidade, <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias> (accessed April 10, 2026)
  - 12 B. Hussain, M.J. Umer, J. Li, Y. Ma, Y. Abbas, M.N. Ashraf, N. Tahir, A. Ullah, N. Gogoi, and M. Farooq, “Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains,” *J Clean Prod*, 2021, 286.
  - 13 J. Hu, Z. Wang, G.D.Z. Williams, G.S. Dwyer, L. Gatiboni, O.W. Duckworth, and A. Vengosh, “Evidence for the accumulation of toxic metal(loid)s in agricultural soils impacted from long-term application of phosphate fertilizer”, *Science of The Total Environment*, 2024, 907.
  - 14 S. Albanese, B. de Vivo, A. Lima, and D. Cicchella, “Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy),” *J Geochem Explor*, 2007, **93**(1), 21–34.
  - 15 L.E. Deuel, and A.R. Swoboda, “Arsenic Solubility in a Reduced Environment,” *Soil Science Society of America Journal*, 1972, **36**(2), 276–278.
  - 16 Considerações sobre a acidez dos solos de cerrado, <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/213856/consideracoes-sobre-a-acidez-dos-solos-de-cerrado> (accessed April 28, 2026)

# Clonagem de genes e CRISPR-Cas9: progresso científico, limitações e desafios éticos

DOI: 10.5281/zenodo.19895136

Catarina Sampaio Lins de Albuquerque <sup>a\*</sup>

Since 1953, interest in gene cloning and mutation has been increasing. Since then, scientific advances have included the discovery of the DNA double helix, nuclear transfer in amphibians, the cloning of mammalian animals, and the development of CRISPR-Cas9 technology, currently considered the most advanced and promising. This technology has expanded the possibilities for medical, agricultural, and scientific applications, but it has also introduced challenges and difficulties. Among these are limitations and risks related to serious DNA mutations, as well as political, social, and ethical issues and debates. Thus, this article presents a literature review aimed at clarifying the evolution of studies on gene cloning and CRISPR-Cas9 gene editing, as well as discussing the ethical aspects associated with this innovation. Therefore, although the pursuit of genetic cloning and mutation has grown exponentially, it also brings risks, limitations, and important ethical and moral discussions.

Desde 1953, o interesse pela clonagem e mutação de genes tem crescido. Desde então, avanços científicos incluem a descoberta da dupla hélice de DNA, transferência nuclear em anfíbios, clonagem de animais mamíferos e a descoberta da tecnologia CRISPR-Cas9, até então a mais atual e promissora. Essa tecnologia ampliou as possibilidades para invocações medicinais, agrícolas e científicas, mas também trouxe dificuldades e desafios. Entre eles, estão limitações e riscos relacionados a graves mutações do DNA, além de questões e debates de ordem política, social e ética. Assim, este artigo faz uma revisão da literatura visando esclarecer a evolução dos estudos em relação a mutação de genes, a nova edição CRISPR-Cas9 e discutir os aspectos éticos associados a essa inovação. Portanto, embora a busca pela clonagem genética tenha crescido de forma exponencial, ela também traz riscos, limitações e importantes discussões éticas e morais.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: catarinasampaio2003@gmail.com

**Palavras-chave:** Edição genética; CRISPR-Cas9; nucleases programáveis; prêmio nobel; engenharia genômica.

Recebido em 12 de abril de 2026,

Aprovado em 26 de abril de 2026,

Publicado em 30 de abril de 2026.

## Introdução

A compreensão da estrutura do DNA, proposta por James Watson e Francis Crick em 1953, foi uma das pioneiras para o desenvolvimento das técnicas de manipulação genética. A partir desse avanço, estudos ao longo das décadas seguintes possibilitaram o desenvolvimento de métodos de clonagem e transferência nuclear, demonstrando que o material genético pode ser isolado, transferido e reprogramado.<sup>1</sup>

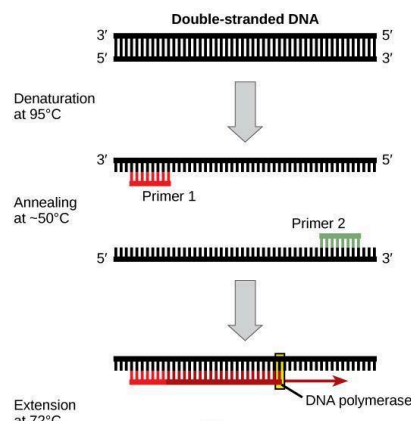
Esses avanços alcançam marcos importantes, como a edição e clonagem de genes de organismos a partir de células diferenciadas, tornando evidente que o genoma mantém sua informação essencial mesmo após processos de especialização celular. Essas descobertas impulsionaram o desenvolvimento da biotecnologia moderna e abriram caminho para técnicas mais avançadas da engenharia genética.<sup>1</sup>

Com o avanço da biologia molecular, técnicas como a mutação, clonagem genética e a reação em cadeia da polimerase (PCR), método que permite a amplificação

exponencial de fragmentos específicos de DNA, conforme apresentado na Figura 1, tornaram possível a análise, amplificação e manipulação do material genético de forma mais eficiente e precisa. Essas ferramentas incentivam e promovem estudos sobre regulação gênica e possibilitam aplicações importantes na medicina e na indústria, como a produção de proteínas recombinantes (por exemplo, insulina humana) e o desenvolvimento de vacinas.<sup>1, 2, 3, 4</sup>

**Figura 1.** Etapas da PCR: desnaturação do DNA, ligação dos primers e extensão pela DNA polimerase.

Extraído da referência 4.



Nesse contexto, em 2020, o prêmio Nobel de química foi concedido a Emmanuelle Charpentier e Jennifer Doudna por desenvolverem a tecnologia CRISPR-Cas9, uma ferramenta revolucionária sobre genética. Essa técnica funciona como uma “tesoura molecular”, permitindo cortar e modificar o DNA em locais específicos e possui aplicações promissoras na medicina, na agricultura e na ciência em geral.<sup>4</sup>

Diante desse cenário, a mutação de genes tem ganhado destaque devido a sua inovação. No entanto, também levanta importantes questões éticas e sociais, especialmente no que diz respeito à manipulação genética. Assim, este artigo tem como objetivo discutir a evolução dos estudos relacionados à clonagem de genes, com ênfase no desenvolvimento da tecnologia CRISPR-Cas9, bem como analisar os limites éticos associados a essas práticas.

## Metodologia

O presente artigo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, baseada em revisão bibliográfica, com o objetivo de analisar a evolução das técnicas de edição e clonagem genética e o desenvolvimento da tecnologia CRISPR-Cas9, bem como suas implicações éticas.

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento de artigos científicos e publicações acadêmicas disponíveis em bases de dados confiáveis, como Google Scholar, PubMed e SciELO. Foram selecionados trabalhos relevantes relacionados à clonagem de genes, técnicas de biologia molecular, como a Reação em Cadeia da Polimerase, e à tecnologia CRISPR-Cas9.

Os critérios de inclusão envolveram publicações que abordassem o desenvolvimento histórico das técnicas de manipulação genética, suas aplicações práticas e discussões sobre aspectos éticos. Foram priorizados artigos mais recentes. Foram excluídos da análise trabalhos com informações desatualizadas ou que não contribuíam significativamente para a compreensão da evolução das técnicas de manipulação genética também foram descartados, priorizando-se conteúdos mais recentes e relevantes para a discussão proposta.

Após a seleção, os materiais foram analisados de forma crítica e comparativa, buscando identificar os principais avanços científicos, aplicações e limitações das técnicas estudadas. Além disso, foi realizada uma análise

reflexiva sobre as questões éticas envolvidas, considerando diferentes perspectivas presentes na literatura.

Por fim, as informações foram organizadas de maneira sistemática, permitindo a construção de uma discussão integrada sobre a evolução da clonagem de genes e os impactos da tecnologia CRISPR-Cas9 na ciência contemporânea.

Dessa forma, a metodologia adotada permite explorar tanto os aspectos técnico-científicos quanto às dimensões éticas e sociais da clonagem, atendendo ao objetivo de fornecer uma visão integrada e didaticamente clara sobre o tema.

## Resultados e discussão

### Evolução da clonagem

A estrutura em dupla hélice do DNA foi descoberta por James Watson e Francis Crick, em 1953, e foi primordial para estabelecer as bases para o desenvolvimento das técnicas de manipulação genética. A partir desse avanço, estudos realizados ao longo das décadas, especialmente a partir da década de 1950, possibilitaram o desenvolvimento de métodos de transferência nuclear e clonagem.<sup>1</sup>

Com isso, experimentos pioneiros realizados em 1952 por Robert Briggs e Thomas King demonstraram a possibilidade da transferência nuclear em anfíbios. Posteriormente, em 1962, John Gurdon evidenciou que células diferenciadas, ou seja, especializadas, como: célula da pele, célula muscular, célula intestinal, mantêm a informação genética necessária para o desenvolvimento completo de um organismo.<sup>1</sup>

Outros avanços ocorreram em 1984, com experimentos em mamíferos realizados por James McGrath e Davor Solter, que indicaram limitações relacionadas à perda de totipotência celular, que nada mais é que capacidade que uma célula tem de originar um organismo completo, incluindo todos os tipos celulares e também estruturas extraembrionárias. Esse cenário foi transformado em 1996 com o nascimento da ovelha Dolly, o primeiro mamífero clonado a partir de células somáticas adultas, consolidando a possibilidade de reprogramação celular e impulsionando o avanço da biotecnologia moderna.<sup>1,2</sup>

## Clonagem molecular e aplicações

Com o avanço das técnicas de biologia molecular, e principalmente a clonagem molecular, a tecnologia do DNA recombinante, o uso de vetores plasmídeos e a reação em cadeia da polimerase (PCR), foi possível aumentar de forma impressionante a eficiência dos experimentos e das aplicações biotecnológicas.<sup>6</sup>

Antes dessas tecnologias, manipular genes era um processo lento, caro e muitas vezes impreciso. A clonagem molecular permitiu isolar e amplificar genes específicos, inserindo-os em vetores como os plasmídeos. Esses pequenos círculos de DNA levam o gene de interesse para dentro de bactérias ou outros organismos, onde ele pode ser produzido em larga escala.<sup>7</sup> Já a PCR, especialmente a PCR em tempo real (qPCR), é de extrema importância para a detecção e a quantificação de DNA e RNA, pois permite amplificar milhões de cópias de uma sequência a partir de uma quantidade mínima de material biológico. Isso trouxe muito mais rapidez, sensibilidade e precisão.<sup>6</sup>

Essas técnicas viabilizaram a produção de proteínas recombinantes de interesse médico e industrial. Um exemplo é a produção de insulina recombinante, em que, antes, a insulina era extraída do pâncreas de animais, o que era caro e podia causar reações alérgicas. Hoje, com o DNA recombinante, o gene da insulina humana é inserido em um plasmídeo, que é colocado dentro de bactérias como a *Escherichia coli*. Essas bactérias passam a produzir insulina humana idêntica à natural, de forma pura, segura e em grande quantidade.<sup>8</sup>

Dessa forma, a tecnologia permitiu o desenvolvimento de vacinas recombinantes. Em vez de usar o vírus inteiro (atenuado ou inativado), os cientistas podem inserir em vetores apenas o gene que codifica uma proteína específica do patógeno. Essa proteína é produzida em laboratório e usada para estimular o sistema imunológico, gerando proteção sem risco de causar a doença. Exemplos incluem vacinas contra hepatite B e HPV.<sup>8</sup>

Além disso, uma enorme variedade de proteínas recombinantes foi produzida para diferentes finalidades: hormônios como o hormônio do crescimento humano (hGH) e a eritropoetina (para tratar anemia); anticorpos monoclonais usados no tratamento de câncer e doenças autoimunes; enzimas industriais aplicadas na fabricação de alimentos, como amilases e proteases; e até fatores de crescimento usados na regeneração de tecidos.<sup>6,8</sup>

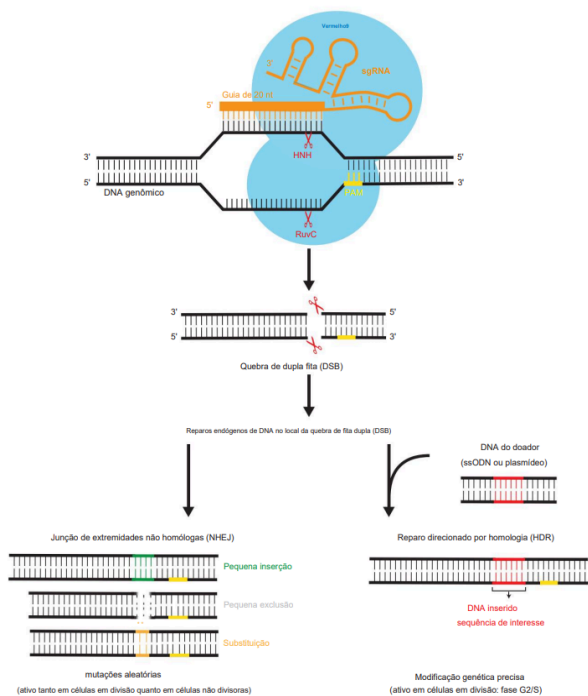
Tudo isso foi possível graças à combinação entre clonagem, vetores plasmídeos, DNA recombinante e PCR, que tornaram a engenharia genética mais acessível, rápida e precisa, trazendo benefícios diretos para a saúde, a agricultura e a indústria.<sup>7</sup>

## CRISPR-Cas9 como avanço da clonagem

O desenvolvimento da tecnologia CRISPR-Cas9 representa um dos maiores avanços da biologia molecular nas últimas décadas. Originalmente descoberto como um mecanismo de defesa de bactérias contra vírus, esse sistema foi transformado em uma ferramenta importante e de grande impacto para edição do genoma. Esse conhecimento veio com a concessão do Prêmio Nobel de Química de 2020 para Jennifer Doudna e Emmanuelle Charpentier, que foram fundamentais para transformar o CRISPR-Cas9 em uma tecnologia programável e acessível.<sup>5</sup>

A CRISPR-Cas9 funciona como uma "tesoura molecular" guiada por um RNA. O sistema utiliza uma enzima chamada Cas9 e um pequeno RNA guia que é programado para reconhecer uma sequência específica do DNA. Quando o RNA guia encontra essa sequência no genoma, a Cas9 realiza um corte preciso no local desejado, permitindo que os cientistas removam, modifiquem ou substituam pedaços do DNA com alta eficiência, precisão e baixo custo em comparação com técnicas anteriores.<sup>5,9</sup> Após o corte no DNA, a célula pode repará-lo por dois mecanismos principais, sendo eles a junção de extremidades não homólogas (NHEJ), que pode causar pequenas inserções ou deleções, e o reparo dirigido por homologia (HDR), que utiliza uma sequência molde para promover alterações precisas no DNA.<sup>9</sup> Esse sistema está evidenciado na Figura 2.

**Figura 2.** Funcionamento esquemático do sistema CRISPR-Cas9 na edição genômica. Extraído da referência 9.



Quando comparamos o CRISPR-Cas9 com as técnicas anteriormente mencionadas de edição genômica, é evidente a evolução que essa nova tecnologia trouxe. Métodos mais antigos exigiam que os pesquisadores projetassem proteínas específicas para cada sequência de DNA que se desejava modificar. Isso tornava o processo demorado, caro e tecnicamente difícil. O CRISPR-Cas9, por outro lado, utiliza um simples RNA guia para levar a enzima Cas9 até o local desejado no DNA. Basta alterar 20 letras do RNA para redirecionar o sistema para praticamente qualquer sequência do genoma.<sup>9</sup>

Uma das simplicidades dessa técnica é a precisão. O sistema só corta o DNA quando encontra uma sequência alvo que combine com o RNA guia e que esteja ao lado de um pequeno sinal chamado PAM. Isso reduz bastante a chance de cortes em lugares errados. A segunda vantagem é a facilidade de uso. Hoje, qualquer laboratório de biologia molecular consegue usar o CRISPR-Cas9 sem precisar de equipamentos muito caros e sofisticados ou conhecimentos especiais de engenharia de proteínas. A terceira vantagem é o custo. Enquanto os métodos antigos podiam custar milhares de dólares e levar meses para funcionar, o CRISPR-Cas9 é muito mais barato e pode ser testado em poucos dias.<sup>10</sup>

Essa tecnologia causou um grande impacto na pesquisa científica. Na área da clonagem, por exemplo, o CRISPR-Cas9 permite que cientistas editem células somáticas com precisão antes mesmo de realizar a transferência nuclear. Isso significa que é possível gerar animais clonados com mutações específicas de forma direta, sem a necessidade de cruzamentos prolongados. Em animais, a criação de camundongos knockout, que antes levava anos, agora pode ser feita em poucos meses. Na agricultura, já existem plantas editadas com maior resistência a pragas, melhor rendimento de grãos e maior valor nutricional. Na medicina, o sistema está sendo testado em ensaios clínicos para tratar doenças genéticas como anemia falciforme e certos tipos de cegueira hereditária.<sup>5, 10</sup>

É indubitável que a tecnologia ainda apresenta desafios. Um dos principais é evitar os chamados efeitos fora do alvo, ou seja, cortes em locais parecidos, mas não idênticos, ao alvo desejado. Pesquisadores já desenvolveram versões melhoradas da Cas9, como a SpCas9-HF1, que mantém a eficiência, mas reduz bastante os cortes indesejados. Outro desafio é a entrega do sistema dentro do corpo humano para terapias gênicas, um problema que está sendo atacado com o uso de nanopartículas e vírus modificados.<sup>4, 8, 10, 11</sup>

### Limitações e riscos

Um dos maiores riscos da edição genômica é que as ferramentas como CRISPR/Cas9 podem cortar o DNA no lugar errado. Esses erros, chamados de *off-target*, podem causar mutações acidentais em genes importantes, aumentando o risco de câncer ou perda de função celular.<sup>11, 12</sup>

Além disso, estudos recentes mostram que o CRISPR pode causar não apenas pequenas mutações, mas também grandes alterações no DNA, como deleções enormes, perda de cromossomos inteiros e até rearranjos perigosos como translocações. Esses problemas são ainda piores quando se usam certas substâncias para tentar melhorar a edição.<sup>11</sup>

Além dos erros no DNA, a edição genômica pode causar outros problemas biológicos, em que a entrega das ferramentas de edição, muitas vezes feita com vírus, pode provocar reações do sistema imunológico. O corpo pode atacar as proteínas usadas, como a Cas9, causando inflamação ou rejeição.<sup>12</sup>

Outro risco importante é que o processo de edição ativa a proteína p53, que controla danos no DNA. Isso pode

matar as células editadas ou, pior, selecionar células mutantes que escapam do controle e podem virar câncer.<sup>11</sup>

### Questões éticas

A edição genômica utilizando o sistema CRISPR-Cas9 tem gerado grandes expectativas na ciência, mas também levanta sérias questões éticas, especialmente quando aplicada à linhagem germinativa humana. A modificação de embriões humanos envolve riscos significativos, incluindo mutações fora do alvo (*off-target*), mosaicismos e até mesmo perda de cromossomos inteiros, o que torna a técnica ainda insegura para uso clínico.<sup>12</sup> Estudos iniciais com embriões humanos mostraram baixa eficiência na correção precisa de mutações, com menos de 10% das células apresentando a alteração desejada, enquanto efeitos indesejados eram muito mais comuns.<sup>13</sup> Essas limitações técnicas levaram a comunidade científica a defender uma discussão moral sobre a edição hereditária, recomendando que pesquisas básicas continuem, mas que a criação de "bebês geneticamente modificados" seja evitada até que critérios rigorosos de segurança e eficácia sejam atendidos.<sup>13, 14</sup>

O caso mais simbólico do uso prematuro dessa tecnologia ocorreu em 2018, quando um pesquisador chinês anunciou o nascimento de duas gêmeas com o gene CCR5 editado para supostamente conferir resistência ao HIV. Esse evento foi amplamente condenado pela comunidade internacional, não apenas pela falta de segurança, mas também pela ausência de justificativa médica e pelo consentimento inadequado dos pais.<sup>15</sup> Dessa forma, a edição da linhagem germinativa só poderia ser eticamente aceitável para prevenir doenças graves sem alternativas razoáveis, o que não era o caso. Além disso, a criação de bebês geneticamente modificados sem supervisão regulatória representa um desvio ético grave, pois expõe crianças a riscos desconhecidos sem benefício direto comprovado.<sup>14, 15</sup>

Outra preocupação central é a desigualdade no acesso à tecnologia. A edição genômica hereditária, quando se tornar segura, provavelmente será um procedimento caro, acessível apenas a populações e países e cidadãos com recursos financeiros mais elevados. Isso pode aprofundar ainda mais a desigualdade em relação a entre classes socioeconômicas, criando um novo estilo de elite, enquanto a maioria da população permanece sem acesso.<sup>14, 15</sup> Assim, é estimado que, nos Estados Unidos, apenas cerca de 100 nascimentos por ano poderiam se beneficiar da edição germinativa para casos sem alternativas, mas se a tecnologia for ampliada para outras indicações, milhões de casais

poderiam buscar o procedimento, ainda que de forma desigual.<sup>13</sup>

Diante desses desafios, a pergunta que se impõe é até onde é aceitável modificar o genoma humano. Especialistas sugerem que existem limites importantes. O primeiro é a linha tênue entre limite terapêutico e aperfeiçoamento, em que, enquanto a correção de mutações que causam doenças graves pode ser justificada pelo princípio da beneficência, o uso da edição para "melhorar" características humanas, como altura, inteligência ou capacidade atlética, é amplamente rejeitado por falta de consenso sobre o que constitui uma melhoria e pelo risco de resgatar práticas eugenistas.<sup>15</sup> O segundo limite é o da segurança. Até que a edição germinativa alcance eficácia comparável a outras tecnologias reprodutivas, qualquer aplicação clínica violaria o princípio da não maleficência, já que os riscos superam os benefícios potenciais.<sup>13</sup> Outro limite diz respeito ao consentimento das futuras gerações, que não podem autorizar as alterações genéticas que lhes serão impostas. Por último, há o limite da diversidade genética humana, que é algo fundamental para a adaptação da espécie, eliminar certas variantes genéticas sem entendimento profundo sobre suas funções em diferentes contextos ambientais pode trazer consequências imprevisíveis.<sup>12-15</sup>

### Conclusões

A trajetória da biologia molecular, desde a elucidação da estrutura do DNA por Watson e Crick até o desenvolvimento da revolucionária tecnologia CRISPR-Cas9, demonstra um notável avanço na capacidade humana de manipular a vida em seu nível mais fundamental. Conforme evidenciado, os marcos históricos, da transferência nuclear em anfíbios à clonagem da ovelha Dolly, passando pelo aprimoramento da clonagem molecular e da PCR, construíram, de forma gradativa, a base para as ferramentas de edição genômica atuais.

O CRISPR-Cas9, em particular, superou as limitações de técnicas anteriores em precisão, custo e acessibilidade, com aplicações promissoras na medicina, agricultura e indústria. No entanto, a análise também revela desafios significativos. As limitações técnicas, como os efeitos *off-target* e grandes rearranjos cromossômicos, junto aos riscos biológicos, impõem barreiras concretas para a aplicação clínica segura.

Mais profundamente, as questões éticas, especialmente a edição da linhagem germinativa humana, exemplificada pelo caso das gêmeas editadas na China, e o risco de ampliação das desigualdades sociais, exigem uma

reflexão cuidadosa. Os limites entre o terapêutico e o melhoramento, a necessidade de consentimento das futuras gerações e a preservação da diversidade genética humana são princípios que não podem ser negligenciados.

Assim, conclui-se que, embora a tecnologia de edição genética represente um dos maiores feitos científicos do século XXI, sua aplicação responsável depende tanto de avanços técnicos contínuos para reduzir riscos quanto de um amplo, democrático e internacional debate ético-regulatório.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de detalhes obtidos por artigos auxiliares são de Catarina Sampaio Lins de Albuquerque.

## 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 fornecido.

## Notas e referências

1. R. Roberto, T. Caleffè, S. Rodrigues De Oliveira, A. Cristina, O. Freitas, K. K. Kido, A. Garcia and J. A. Pamphile, CLONAGEM DE GENES: MÉTODOS E APLICAÇÕES, *Rev. Uningá*, 2026, **47**, 73–77.
2. W. Hong, S. G. Ha, H. C. Kwon e S.-J. V. Lee, Brief guide to gene cloning, *Mol. Cells*, 2025, **48**, 100234.
3. M. Ashwini, S. B. Murugan, S. Balamurugan, R. Sathishkumar, M. Ashwini, S. B. Murugan, S. Balamurugan and R. Sathishkumar, Последние достижения в области молекулярного клонирования, *Молекулярная биология*, 2016, **50**, 3–9.
4. C. Molnar, J. Gair, Molnár, Charles, Gair e Jane, 10.1 Cloning and Genetic Engineering.
5. K. E. Uyhazi and J. Bennett, A CRISPR view of the 2020 nobel prize in chemistry, *American Society for Clinical Investigation*, 2021, **131**.
6. F. T. Ishmael and C. Stellato, Principles and applications of polymerase chain reaction: Basic science for the practicing physician, *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 2008, **101**, 437–443.
7. I. Sokra, M. Horn, R. Lika, C. Socheata and S. Somaly, Plasmid Vectors for Gene Editing and Genetic Engineering: Design Principles, Efficiency, and Applications, *Journal of Agriculture and Technology*, 2026, **2**, 254–264.
8. S. Purkait, G. S. P. A. In and P. Yousuf, Recombinant DNA Technology and It's Applications, *Futuristic Trends in Biotechnology*, 2024, **3**, 219–236.
9. F. Jiang e J. A. Doudna, CRISPR–Cas9 structures and mechanisms, *Annu. Rev. Biophys.*, 2017, **46**, 505–529.
10. A. N. M. Ansori, Y. Antonius, R. J. K. Susilo, S. Hayaza, V. D. Kharisma, A. A. Parikesit, R. Zainul, V. Jakhmola, T. Saklani, M. Rebezov, M. E. Ullah, N. Maksimiuk, M. Derkho e P. Burkov, Application of CRISPR-Cas9 genome editing technology in various fields: A review, *Narra J*, 2023, **3**, e184.
11. C. Aussel, T. Cathomen e C. Fuster-García, The hidden risks of CRISPR/Cas: structural variations and genome integrity, *Nat. Commun.*, 2025, **16**, 7208.
12. D. B. T. Cox, R. J. Platt e F. Zhang, Therapeutic genome editing: prospects and challenges, *Nat. Med.*, 2015, **21**, 121–131.
13. J. Turocy, E. Y. Adashi e D. Egli, Heritable human genome editing: Research progress, ethical considerations, and hurdles to clinical practice, *Cell*, 2021, **184**, 1561–1574.

14. R. E, Ethical issues in genome editing using crispr/Cas9 system, *J. Clin. Res. Bioeth.*, 2016, **7**, 1000266.
15. C. Brokowski e M. Adli, CRISPR ethics: Moral considerations for applications of a powerful tool, *J. Mol. Biol.*, 2019, **431**, 88–101.

# Comparativo de métodos não-invasivos para análise e caracterização de tinta ferrogálica

DOI: 10.5281/zenodo.19895136

Anthony Monteiro Lima<sup>a\*</sup>

Iron gall ink was widely used in the production of historical manuscripts, playing a fundamental role in the preservation of records over centuries. However, its complex chemical composition and associated degradation processes make its characterization a significant analytical challenge, especially in the context of cultural heritage conservation. Given this scenario, this work consists of a comparison of possible analytical methods to characterize, quantify, and study iron gall ink and its implications on the various materials in which it is found, without resorting to processes that could damage the analyzed documents.

A tinta ferrogálica foi amplamente utilizada na produção de manuscritos históricos, desempenhando um papel fundamental na preservação de registros ao longo de séculos. No entanto, sua composição química complexa e os processos de degradação associados tornam sua caracterização um desafio analítico relevante, especialmente no contexto da conservação do patrimônio cultural. Diante deste cenário, este trabalho consiste numa comparação de possíveis métodos analíticos para caracterizar, quantificar e estudar tinta ferrogálica e suas implicações nos diversos materiais em que ela é encontrada, sem recorrer a processos que possam prejudicar os documentos analisados.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: anthonymonteiro2877@gmail.com

**Palavras-chave:** Ferrogálica, Preservação, Análise não-invasiva

Recebido em 13 de Abril de 2026,  
Aprovado em 26 de Abril de 2026,  
Publicado em 30 de Abril de 2026.

## Introdução

A tinta ferrogálica faz parte de um dos dois grandes grupos de tintas de escrita utilizadas da antiguidade até o início do século XX, que são as tintas com base em complexos organometálicos. Esta tinta era confeccionada geralmente com extrato de galhas ou outras fontes de taninos, um sal de ferro (comumente  $\text{FeSO}_4$ ), goma arábica, água e, por vezes, adições que intensificassem a cor escura.<sup>1</sup> Ela foi criada com o intuito de substituir a tinta negra de fumo, que com o tempo desaparecia do suporte de papel, contudo, a tinta ferrogálica apresentava uma outra desvantagem: fortes probabilidades de degradação do suporte, perdendo-se o conteúdo.<sup>2</sup>

No Ocidente, considera-se que a tinta ferrogálica impulsionou-se no século XIII e, a partir de então, foi utilizada com constância principalmente em manuscritos, mas também em alguns desenhos e pinturas. Sua ampla utilização gerou diversas receitas diferentes baseadas nos mesmos elementos, documentando-se uma vasta variabilidade.<sup>3</sup> Estes dois fatores são importantes para se colocar tanto a importância histórica da tinta ferrogálica quanto a importância

de seu estudo aprofundado: o entendimento de diversas ocorrências históricas pode depender do estudo estrutural, de conservação e de restauração da tinta ferrogálica.<sup>3,4</sup>

A conservação é o fator de preocupação principal, tendo em vista a tendência da tinta ferrogálica de degradar o suporte em que está inserida. O mecanismo de degradação pode ser bem complexo e depende de fatores diversos, mas os relatados com mais frequência são a hidrólise catalisada por ácido sulfúrico, que reduz as propriedades mecânicas do papel, e a oxidação catalisada pelo  $\text{Fe(II)}$  presente na tinta, que desenvolve compostos voláteis, enfraquece mecânicamente o papel e descolore.<sup>5</sup> Sendo assim, é fundamental a aplicação de métodos analíticos para estudo e caracterização de tintas ferrogálicas em materiais antigos, não só para retardamento dos efeitos de degradação mas também para identificar e datar peças históricas.<sup>6,7</sup>

Diversos métodos analíticos já foram empregados no estudo da tinta ferrogálica. A necessidade de preservação dos documentos leva a maioria das análises a serem por métodos não-destrutivos, como fluorescência por raios X (XRF), espectroscopia Raman e no infravermelho (FTIR). Porém,

para obter maior detalhamento, é também empregado técnicas cromatográficas e espectrométricas, que envolvem amostragem. Apesar do detalhamento, a necessidade de amostragem gera dificuldades ao se considerar a baixa quantidade possível de se obter da tinta *in situ*, além da interferência do material de suporte.<sup>6,7</sup> Fica clara, portanto, a necessidade de uma análise crítica dos métodos disponíveis a fim de declarar os mais eficazes para a análise de documentação histórica diante de todos os desafios apresentados.

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é revisar métodos analíticos empregados na análise de tinta ferrogálica a partir de dois trabalhos de Aceto e colaboradores e um de Corregidor e colaboradores, que descrevem e criticam os métodos, com o intuito de discutir vantagens e desvantagens de cada ao analisar manuscritos históricos e priorizar a preservação do patrimônio cultural.<sup>4, 6, 7</sup>

## Metodologia

A seleção dos estudos a serem considerados foi baseada a partir de buscas em bases de dados científicas utilizando conceitos relacionados à tinta ferrogálica, métodos analíticos, análise de manuscritos e preservação histórica como palavras-chave. Foram incluídos estudos experimentais focados no comparativo entre métodos analíticos no estudo e caracterização de tinta ferrogálica em documentação histórica. Os artigos buscam avaliar a efetividade de diferentes técnicas não destrutivas, sua aplicabilidade e viabilidade diante de diversos cenários com suas vantagens e limitações, visando a preservação histórica.

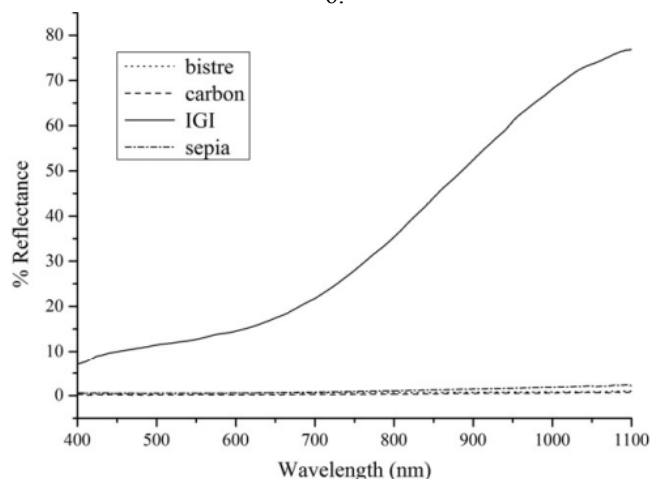
## Resultados e discussão

Os estudos abordados evidenciam a ampla variedade de técnicas analíticas disponíveis na caracterização de tinta ferrogálica, trazendo também a complexidade química deste composto que exige por vezes uma análise híbrida. Em geral, a escolha do método depende do equilíbrio entre necessidade de detalhamento e preservação da documentação, apesar de sempre buscar-se métodos não invasivos.<sup>6, 7</sup>

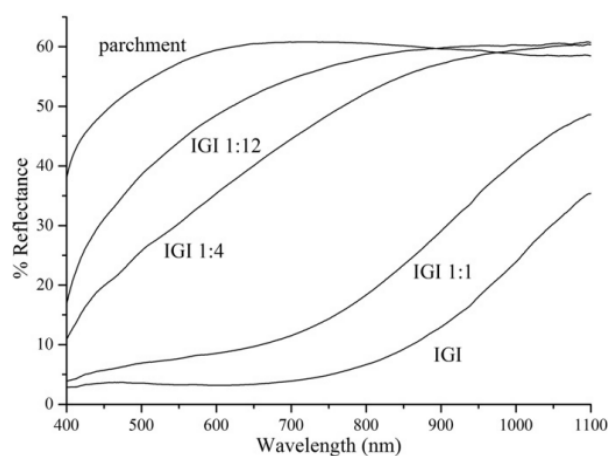
Em todos os três trabalhos foram abordadas técnicas não-destrutivas que, diante do objetivo de preservação dos documentos históricos, seriam as mais recomendadas. A primeira técnica no trabalho de Aceto e colaboradores no estudo de diferenciação de tinta ferrogálica na presença de outras tintas foi a espectroscopia de reflexão em UV-Vis-NIR com fibras ópticas, conhecida como FORS.<sup>6</sup> Esta técnica consiste na reflexão difusa de radiação UV, visível e de

infravermelho próximo, usada em amostras sólidas ou líquidas que apresentem reflexão especular, ou seja, em que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.<sup>8</sup> É relatado pelos autores que esta técnica é de difícil interpretação para o caso de tinta ferrogálica no caso de não ser conhecida a tinta analisada, pois a reflectância pode variar muito por diversos fatores. Os mecanismos de degradação da tinta, as diferenças de composição considerando aditivos utilizados ao longo da história e a diluição da tinta são fatores modificadores da tonalidade observada que, por consequência, gera diferenças de reflectância que prejudicam a veracidade da análise. Contudo, é uma técnica que consegue identificar a presença de tinta ferrogálica (apesar de não sua composição) de forma não invasiva, sendo assim, quando associada com outras técnicas, pode ser valiosa.<sup>6</sup>

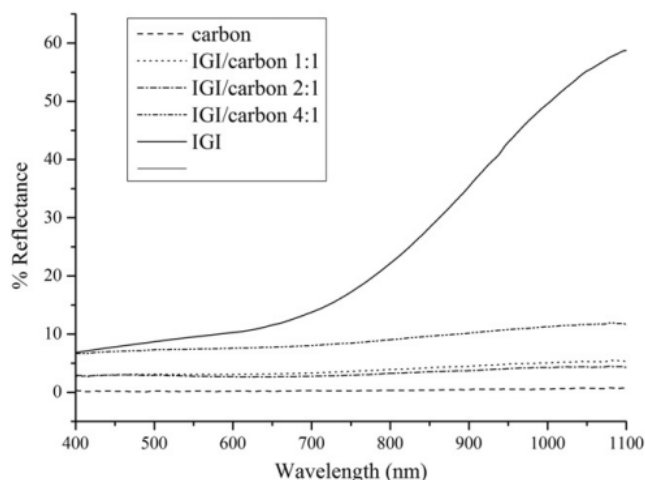
**Figura 1.** Espectro por FORS de tinta ferrogálica (IGI) e tintas à base de bistre, carbono e sépia.. Extraído da referência 6.



**Figura 2.** Espectro por FORS de tinta ferrogálica (IGI) em diferentes proporções de pigmento e meio. Extraído da referência 6.

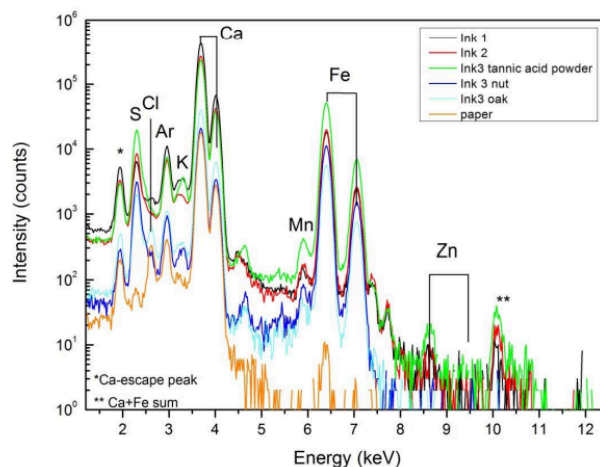


**Figura 3.** Espectro por FORS de tinta ferrogálica (IGI) em diferentes proporções de pigmento e carbono, aditivo comumente utilizado para escurecer a tinta. Extraído da referência 6.



Em ambos trabalhos de Aceto e colaboradores é utilizada a técnica de fluorescência de raios-X (XRF).<sup>4,6</sup> Esta técnica é capaz de determinar a composição, além de quantificar as espécies químicas presentes numa amostra através da particularidade de fluorescência que cada átomo possui.<sup>9</sup> Os autores julgaram esta técnica a mais plausível para análise *in situ*, considerando a abundância de aparelhagem portátil para este tipo de análise, sendo assim uma das técnicas que mais entram no critério de preservação histórica. É necessário, porém, considerar que a presença de ferro não necessariamente dita a presença de tinta ferrogálica, tendo em vista que há outras fontes possíveis de ferro em manuscritos históricos que não a composição da tinta. A presença de sulfato em conjunto com o ferro, principalmente a razão entre ambos, é um indicativo bem mais considerável de tinta ferrogálica.<sup>4, 6</sup> Corregidor e colaboradores usaram em seus estudos uma técnica derivada da XRF, a emissão de raios-X induzida por prótons (PIXE). Esta é uma técnica bem mais sensível, na casa de partes por milhão (ppm), que permitiu que os autores diferenciassem composições diversas de tinta ferrogálica em papel. Porém, é uma técnica que não permite portabilidade.<sup>7</sup>

**Figura 4.** Espectro por PIXE de tinta ferrogálica em diferentes proporções de cada ingrediente, além de diferentes fontes de ácido tânico (pó, noz e carvalho, respectivamente); e do papel utilizado de suporte. Extraído da referência 7.



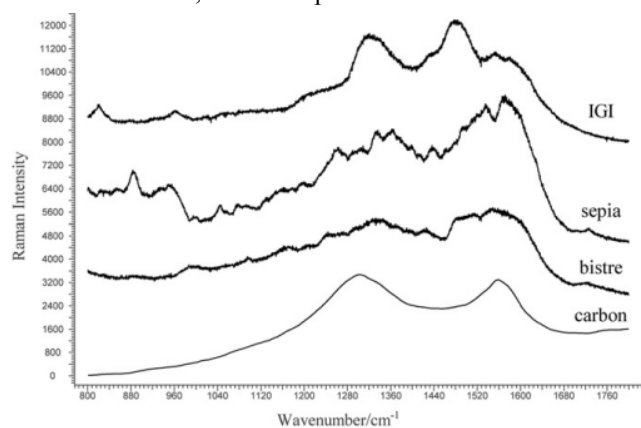
**Tabela 1.** Relação de composição de tinta ferrogálica do trabalho de Corregidor e colaboradores. Extraído da referência 7.

Tinta	Composição
Tinta 1 (Ink 1)	2,3g de ácido tânico, 1g de goma arábica 3g de sulfato de ferro e 100mL de água
Tinta 2 (Ink 2)	7g de ácido tânico, 3,3g de goma arábica, 14,7g de sulfato de ferro e 100mL de água
Tinta 3 (Ink 3)	0,5g de ácido tânico (de pó comercial, nozes ou carvalho), 2g de goma arábica 12g de sulfato de ferro e 100mL de água

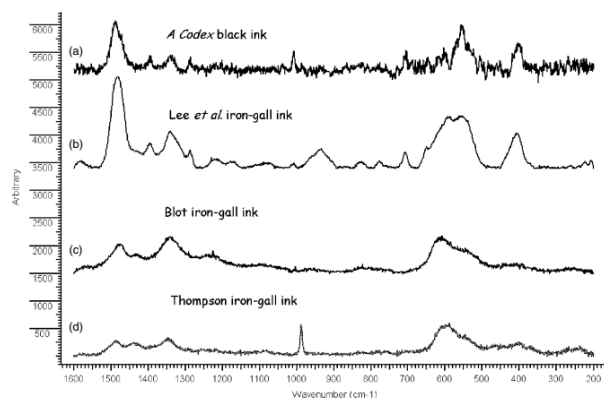
Também em ambos trabalhos, Aceto e colaboradores utilizaram a técnica de espectroscopia Raman, que consiste na emissão de radiação na amostra para gerar espalhamento, assim obtendo uma frequência maior ou menor que a radiação incidente e essa diferença corresponde a transições vibracionais moleculares que são únicas.<sup>4, 6, 10</sup> De acordo com os autores, esta é a técnica mais seletiva dentre as técnicas não invasivas, tendo em vista que os espectros obtidos são “digitais” e permitem uma diferenciação precisa entre tintas. Porém, há um perigo de prejudicar o documento analisado durante o procedimento, pois a radiação térmica pode causar danos ao papel queimando-o, além de que há uma necessidade de manter a superfície analisada bem estável e visível e, considerando que a manipulação direta de documentos históricos é desencorajada, isto pode gerar

dificuldades. A análise de forma não destrutiva é possível, mas necessita de uma maior distância entre a fonte de radiação e o documento, o que gera uma certa perda de sensibilidade.<sup>4,6</sup>

**Figura 5.** Espectro por Raman de tinta ferrogálica e tintas a base de carbono, bistre e sépia. Extraído da referência 6.



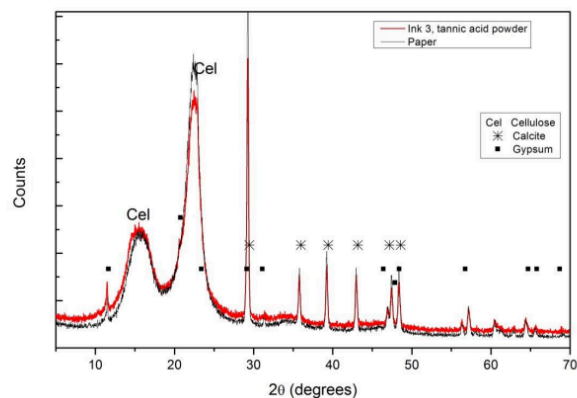
**Figura 6.** Espectro por Raman de tinta ferrogálica presente no manuscrito *Codex Vercellensis*, tinta ferrogálica analisada no trabalho de Lee e colaboradores<sup>11</sup>, tinta ferrogálica comercial de Scribbles e tinta ferrogálica comercial de Thompson. Extraído da referência 4.



Por fim, uma análise interessante obtida por Corregidor e colaboradores foi utilizando difração de raios-X, ou XRD. Este método é útil para o entendimento de estruturas cristalinas e espaçamento interatômico, baseado na interferência construtiva entre raios-X monocromáticos e uma amostra cristalizada.<sup>12</sup> Foi constatado pelos autores que este método não era capaz de diferenciar entre as áreas preenchidas pela tinta no papel e o próprio papel. Apesar disso, a técnica é capaz de captar a perda de cristalinidade nas

áreas pintadas, demonstrando os primeiros passos da degradação do papel principalmente pela hidrólise ácida da celulose e presença de Fe(II). A técnica também identificou CaCO<sub>3</sub> e sulfato de cálcio desidratado, comumente utilizados para melhorar a opacidade no papel.<sup>7</sup>

**Figura 7.** Espectro por XRD de tinta ferrogálica com ácido tânico em pó e do papel utilizado de suporte. Extraído da referência 7.



## Conclusões

Diante de todos os métodos analisados, é possível declarar que a espectroscopia Raman e FORS são as melhores técnicas para *in situ*, sendo o Raman a técnica com mais qualidade informativa, mas FORS sendo a mais versátil em todo tipo de situação que o documento possa se encontrar.<sup>6</sup> Das técnicas que não possibilitam *in situ*, a XRF, em especial a PIXE, é uma técnica valiosa principalmente por sua sensibilidade, ditando bem as concentrações de cada composto da tinta.<sup>6,7</sup> Apesar de não caracterizar nem determinar concentrações, a XRD pode ser uma importante ferramenta para prevenir a degradação de manuscritos que possuam tinta ferrogálica.<sup>7</sup>

É importante considerar que dentre tantas técnicas analíticas existentes, estas são todas não-destrutivas, o que já as coloca como preferenciais. Assim, cabe ao pesquisador decidir, a depender de sua necessidade, que técnica se adequa melhor dentro de seus prós e contras, além de poder alinhar métodos diferentes que suportem informações complementares.<sup>6</sup>

## Contribuições por Autor

O artigo, a revisão de referências e a inclusão de algumas observações são de Anthony Monteiro.

## 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 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 V. S. e. Silva, M. J. S. de Melo e M. da Conceição Lopes Casanova, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- 2 J. F. C. Carvalho, N. Camarheiro e M. de Conceição Casanova, Universidade Católica Portuguesa, 2023.
- 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 M. Aceto, A. Agostino, E. Boccaleri e A. C. Garlanda, The Vercelli Gospels laid open: an investigation into the inks used to write the oldest Gospels in Latin, *Xray Spectrom.*, 2008, **37**, 286–292.
- 5 J. R. de Oliveira Campos e R. E. de Souza, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, 2021.
- 6 M. Aceto e E. Calà, Analytical evidences of the use of iron-gall ink as a pigment on miniature paintings, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, **187**, 1–8.
- 7 V. Corregidor, R. Viegas, L. M. Ferreira e L. C. Alves, Study of iron gall inks, ingredients and paper composition using non-destructive techniques, *Heritage*, 2019, **2**, 2691–2703.
- 8 C. Gupta, A. Bhardwaj, R. Kant e S. Patnaik, em *Nanostructured Carbon Nitrides for Sustainable Energy and Environmental Applications*, Elsevier, 2022, pp. 39–62.
- 9 B. L. do Nascimento-Dias, D. F. Oliveira e M. J. dos Anjos, A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X, *Rev. Bras. Ensino Fís.*, 2017, **39**(4).
- 10 IB. L. do Nascimento-Dias, Espectroscopia Raman: Uma revisão concisa a partir da Física Aplicada e seu uso em pesquisas de Astrobiologia, *Rev. Bras. Ensino Fís.*, **47**.
- 11 A. S. Lee, P. J. Mahon e D. C. Creagh, Raman analysis of iron gall inks on parchment, *Vib. Spectrosc.*, 2006, **41**, 170–175.
- 12 R. F. da Silva, A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais, *Rev. process. quim.*, 2020, **14**, 73–82.

# Estudos de determinação estrutural de complexos de Cd<sup>2+</sup> com ligante do tipo hidrazona utilizando a técnica de difração de raio-X em monocristal

DOI: 10.5281/zenodo.19902926

Linara Tarusa Damascena Correa <sup>a\*</sup>

Coordination chemistry studies the interaction between metal ions and ligands, and is fundamental to the development of compounds with diverse applications. In the work under review, the authors present the synthesis and structural characterization of a cadmium(II) complex with an aroylhydrazone ligand, known for its polydentate coordination capacity. The structure was determined by single-crystal X-ray diffraction, allowing for the precise identification of the coordination geometry, which proved to be a distorted octahedral structure involving nitrogen and oxygen atoms. This review aimed to explain aspects of crystallography, i.e., how X-ray diffraction works, and how the compound crystallizes in the orthorhombic system, space group Aba2, with four units per unit cell ( $Z = 4$ ). The results highlight the importance of X-ray diffraction in structural elucidation and contribute to the understanding of the properties of coordination complexes.

A Química de coordenação estuda a interação entre íons metálicos e ligantes, sendo fundamental para o desenvolvimento de compostos com diversas aplicações. No trabalho em referência, os autores apresentam a síntese e caracterização estrutural de um complexo de cádmio(II) com um ligante do tipo aroilhidrazona, conhecido por sua capacidade de coordenação polidentada. A estrutura foi determinada por difração de raios X em monocristal, permitindo a identificação precisa da geometria de coordenação, que se mostrou octaédrica distorcida, envolvendo átomos de nitrogênio e oxigênio. Essa resenha teve o papel de explicar aspectos da cristalografia, ou seja, como funciona a difração de Raios X, e como o composto cristaliza no sistema ortorrômbico, grupo espacial Aba2, com quatro unidades formuladas por célula unitária ( $Z = 4$ ). Os resultados evidenciam a importância da difração de raios X na elucidação estrutural e contribuem para o entendimento das propriedades de complexos de coordenação.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: linara.tarusa@gmail.com

**Palavras-chave:** Química de coordenação; hidrazonas; aroilhidrazona, difração de raio-X.

Recebido em 12 de abril de 2026,

Aprovado em 26 de abril de 2026,

Publicado em 30 de abril de 2026.

## Introdução

A Química de coordenação é um ramo da química que estuda compostos formados pela ligação entre íons metálicos e moléculas ou íons chamados ligantes. Esses ligantes possuem pares de elétrons disponíveis que podem ser doados ao metal, formando ligações coordenadas, assim o átomo metálico central, geralmente um metal de transição, atua como ácido de Lewis, enquanto os ligantes atuam como bases de Lewis.<sup>1</sup>

Uma característica importante desses compostos é o número de coordenação, que corresponde à quantidade de átomos doadores ligados diretamente ao metal. Esse número, junto com o tipo de ligante, determina a geometria do complexo, que pode ser, por exemplo, octaédrica, tetraédrica ou quadrado-planar. Além disso, os ligantes podem ser classificados de acordo com o número de átomos que utilizam para se ligar ao metal, sendo chamados de monodentados, bidentados ou polidentados. Dentre todos os citados, os

ligantes polidentados geralmente apresentam maior estabilidade.<sup>1</sup>

Dessa forma, o artigo em referência tem como foco as aroilhidrazonas que se destacam como ligantes versáteis na química de coordenação, devido à sua natureza polidentada, resultando em complexos metálicos estáveis, além de apresentar a possibilidade de se ligar a centros metálicos por múltiplos sítios. Por esse motivo, diversas pesquisas têm sido feitas com esse ligante a fim de obter compostos diferentes e com diferentes funcionalidades, como processos catalíticos e em estudos com relevância biológica.<sup>2,3,4</sup>

É importante ressaltar que esses compostos também apresentam equilíbrio tautomérico entre as formas ceto e enol, possibilitando diferentes tipos de ligante, contudo, a forma ceto predomina no ligante está livre, ou seja, sem coordenação ao metal.<sup>2,3,4</sup>

A Química de coordenação possui grande importância prática, sendo aplicada em áreas como catálise industrial,

desenvolvimento de fármacos, tratamento de doenças, sensores químicos e materiais avançados.

Portanto, os autores do artigo em referência propõem em seu trabalho uma análise de um complexo inédito, estudo que permite compreender melhor o comportamento dos metais em diferentes ambientes e explorar suas propriedades em diversas aplicações tecnológicas e científicas, bem com o entendimento de como o ligante se organiza ao se ligar ao íon  $Cd^{2+}$  e como isso influencia a estrutura final do composto.

## Metodologia

O artigo descreve a síntese e a caracterização estrutural de um complexo de cádmio(II) com um ligante do tipo aroilhidrazona. Assim, a síntese do composto foi realizada a partir da reação entre o ligante e um sal de cádmio em solução de metanol e água, seguida de evaporação lenta do solvente, o que permitiu a formação de cristais adequados para análise estrutural. Os dados cristalográficos foram obtidos utilizando a técnica de difração de Raios X.

A elaboração e redação deste QuiArtigo contaram com a utilização das plataformas *Google Scholar*, Portal de Periódicos da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o *Web of Science*.

## Resultados e discussão

A difração de raios X, também conhecida apenas como DRX, é uma das técnicas mais importantes para a determinação estrutural de materiais, muito utilizada na Química de coordenação devido ao seu grau de precisão. Assim, a técnica se baseia na interação dos raios X com os elétrons dos átomos em um cristal, ou seja, quando um feixe de raios X incide sobre uma estrutura cristalina (elevado grau de organização das moléculas), ele é espalhado de maneira específica considerando a interação única de cada átomo com o feixe, gerando um padrão de difração que pode ser interpretado para revelar a posição dos átomos no espaço.<sup>5</sup>

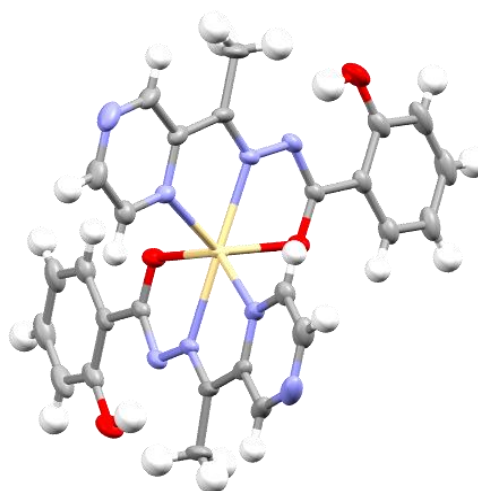
Em geral, nas áreas de síntese tanto orgânica como inorgânica, diversas caracterizações espectroscópicas são realizadas a fim de determinar a estrutura final sintetizada, contudo o grande diferencial da DRX está no tipo de informação que ela fornece. Ou seja, enquanto métodos como espectroscopia no infravermelho (IV), UV-Vis ou RMN indicam quais grupos funcionais estão presentes, quais ligações existem ou aspectos do ambiente eletrônico, a difração de raios X permite determinar diretamente a estrutura tridimensional completa da molécula ou do sólido, incluindo posição atômica,

os comprimentos de ligação, ângulos e até a geometria de coordenação ao redor de um metal.<sup>5</sup>

No entanto, é importante destacar que a DRX exige cristais de boa qualidade, o que é a limitação da técnica, pois a formação de cristal pressupõe um alto nível de organização. Em geral, em síntese inorgânica é comum ver a técnica de evaporação lenta, como citada no artigo em referência, para a formação de monocristal.

No trabalho dos autores em referência, a análise por difração de raios X mostra que o complexo formado possui fórmula  $[Cd(L)_2]$ , ou seja, o átomo metálico está ao centro coordenado por duas unidades de ligantes, o que resulta em uma geometria octaédrica distorcida ao redor do metal, conforme Figura 1, e a Tabela 1 e 2 que representa respectivamente os parâmetros gerais do cristal e os ângulos de ligação.

**Figura 1.** Estrutura do complexo  $[Cd(L)_2]$ . Reproduzido no *Mercury*<sup>6</sup> pela autora com base na referência 2.



**Tabela 1.** Parâmetros gerais. Extraído da referência 2.

Parâmetros	Valor
Fórmula química	$C_{20}H_{16}CdN_6O_4$
Massa molar	516.78 g/mol
Sistema cristalino	Ortorrômbico
Grupo espacial	Pbca
a (Å)	13.2
b (Å)	14.5
c (Å)	20.3
Volume (Å <sup>3</sup> )	3900

**Tabela 2.** Ângulos de ligação. Extraído da referência 2.

Ângulos de ligação	Valor em graus
O1-Cd-O2	85.2
O1-Cd-N1	92.4
O1-Cd-N2	168.7
O2-Cd-N3	94.1
O2-Cd-N4	160.3
N1-Cd-N2	73.5
N3-Cd-N4	74.8
N1-Cd-N3	101.2

Essa distorção em relação à geometria ideal ocorre principalmente devido às restrições impostas pelo próprio ligante, que como pode ser observado pela Figura 1, é relativamente rígido.<sup>2</sup>

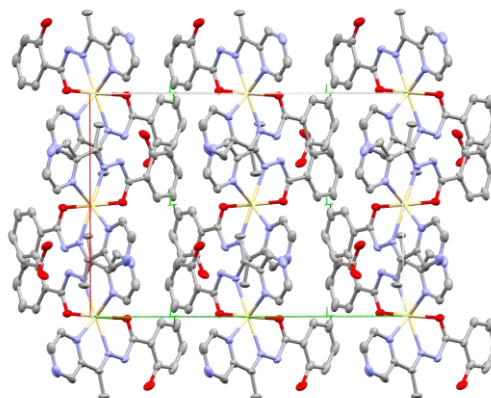
Além disso, também pode ser observado que o complexo é estabilizado por interações intramoleculares, como ligações de hidrogênio do tipo C–H···O e C–H···N, além de interações envolvendo sistemas aromáticos, como empilhamento  $\pi$ – $\pi$  e interações C–H··· $\pi$ . Essas forças promovem a formação de camadas bidimensionais que, por sua vez, se conectam para gerar uma rede tridimensional estável.<sup>2</sup>

**Tabela 3.** Comprimentos das ligações. Extraído da referência 2.

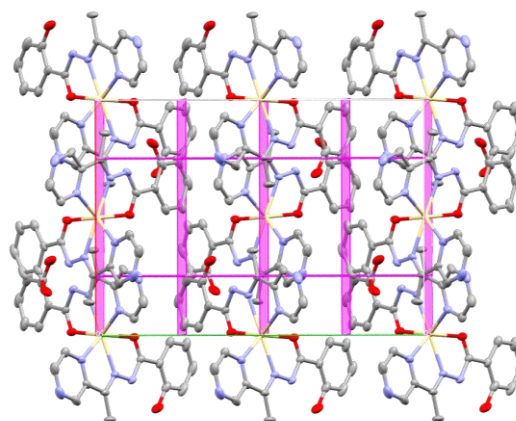
Ligação	Comprimento (Å)
Cd–O1	2.24
Cd–O2	2.28
Cd–N1	2.31
Cd–N2	2.34
Cd–N3	2.36
Cd–N4	2.33
C–O	1.25–1.30
C=N	1.28–1.31

Outra observação que pode-se fazer com relação ao artigo é o grupo de simetria que descreve de que maneira as moléculas estão organizadas e se repetem dentro de um cristal. No caso do  $[\text{Cd}(\text{L})_2]$ , o grupo espacial é  $\text{Aba}2$ , pertencente ao sistema ortorrômbico. Esse grupo indica que a estrutura apresenta diferentes elementos de simetria, como eixos de rotação de ordem 2 que promovem uma rotação de  $180^\circ$ ,

conforme apresentado na Figura 2, com os pontos de rotação marcados em verde.<sup>5,7</sup>

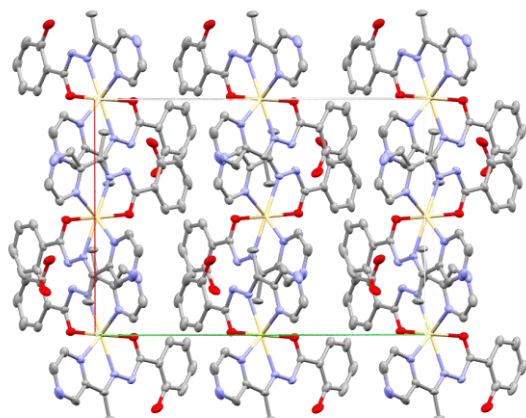
**Figura 2.** Eixos de rotação de  $[\text{Cd}(\text{L})_2]$  reproduzido no Mercury<sup>6</sup> pela autora com base na referência 2.

Também podem ser observados planos de deslizamento (*glide planes*), que combinam uma reflexão com um pequeno deslocamento da molécula dentro da célula unitária, conforme apresentado na Figura 3. Além disso, a letra “A” indica que a célula é centrada, ou seja, possui pontos adicionais de repetição além dos vértices da célula.<sup>5,7</sup>

**Figura 3.** *Glide planes* de  $[\text{Cd}(\text{L})_2]$  reproduzido pela autora no Mercury<sup>6</sup> com base na referência 2.

No artigo é observado que o parâmetro  $Z$  é igual a 4 e em cristalografia, esse número corresponde ao número de unidades assimétricas presentes dentro da célula unitária. No caso em questão,  $Z = 4$  indica que existem quatro unidades do composto dentro de cada célula unitária completa, valor que está diretamente relacionado às operações de simetria do grupo espacial, já que são essas operações que determinam quantas vezes a unidade assimétrica será repetida dentro da célula.<sup>5,7</sup>

**Figura 4.** Estrutura da cela unitária do [Cd(L)<sub>2</sub>] reproduzido no *Mercury*<sup>6</sup> pela autora com base na referência 2.



## Conclusões

A análise do complexo estudado evidencia a importância da Química de coordenação na compreensão das interações entre metais e ligantes, especialmente no caso de sistemas envolvendo aroilhidrazonas, que apresentam elevada versatilidade estrutural e capacidade de coordenação polidentada.

A determinação estrutural por difração de raios X mostrou-se essencial, permitindo identificar com precisão a geometria de coordenação ao redor do íon cádmio, bem como os parâmetros estruturais e o arranjo cristalino. Dessa forma, o estudo reforça o papel da difração de raios X como técnica fundamental para elucidação estrutural, complementando outras metodologias e ampliando o entendimento sobre compostos de coordenação.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Linara Tarusa Damascena Correa.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Agradeço 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 D. F. Shriver, P. W. Atkins and C. H. Langford, Oxford University Press, Oxford, Repr. (with corrections), 1991.
- 2 P. Yang, X.-B. Xie and Q.-S. Shi, Crystal structure of bis{2-hydroxy- N '-[1-(pyrazin-2-yl)ethylidene]benzohidrazidato}cadmium(II), *Acta Crystallogr E Cryst Commun*, 2021, **77**, 153–157.
- 3 W. Huang, F.-X. Shen, S.-Q. Wu, L. Liu, D. Wu, Z. Zheng, J. Xu, M. Zhang, X.-C. Huang, J. Jiang, F. Pan, Y. Li, K. Zhu and O. Sato, Metallogrid Single-Molecule Magnet: Solvent-Induced Nuclearity Transformation and Magnetic Hysteresis at 16 K, *Inorg. Chem.*, 2016, **55**, 5476–5484.
- 4 P. Yang, H. Chen, Z.-Z. Wang, L.-L. Zhang, D.-D. Zhang, Q.-S. Shi and X.-B. Xie, Crystal structures and biological properties of aroylhydrazone Ni(II) complexes, *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2020, **213**, 111248.
- 5 M. F. C. Ladd and R. A. Palmer, Structure Determination by X-ray Crystallography: Analysis by X-rays and Neutrons, Springer, Boston, MA, 5th ed. 2013., 2013.
- 6 C. F. Macrae, P. R. Edgington, P. McCabe, E. Pidcock, G. P. Shields, R. Taylor, M. Towler and J. van de Streek, *J. Appl. Cryst.*, 2006, **39**, 453–457.
- 7 M. I. Aroyo (ed.), International Tables for Crystallography, Volume A: Space-group symmetry, Wiley, Chichester, 2016.

# Produção de clorofórmio em reator PFR: modelagem matemática e simulação computacional

DOI: 10.5281/zenodo.19893408

Hellen Ferreira da Silva <sup>a\*</sup>

This work presents a scientific review of the mathematical modeling of chloroform production in a steady-state plug flow reactor. The study is based on simplifying partial differential equations into ordinary differential equations, assuming first-order kinetics and no accumulation. The results show good agreement with experimental data for chloride consumption along the reactor. However, discrepancies were observed in predicting chloroform consumption, mainly due to model simplifications, such as neglecting parallel reactions and complex transport effects. It is concluded that mathematical modeling is a useful tool for preliminary analysis and process optimization, despite its limitations.

Este trabalho apresenta uma resenha científica sobre a modelagem matemática da produção de clorofórmio em reator de fluxo pistonado em regime estacionário. O estudo baseia-se na simplificação de equações diferenciais parciais em equações ordinárias, considerando reação de primeira ordem e ausência de acúmulo. Os resultados indicam boa concordância com dados experimentais para o consumo de cloreto ao longo do reator. Contudo, foram observadas discrepâncias na previsão do consumo de clorofórmio, atribuídas às simplificações do modelo, como a desconsideração de reações paralelas e efeitos de transporte mais complexos. Conclui-se que a modelagem matemática é uma ferramenta útil para análises preliminares e otimização de processos, apesar de suas limitações.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: [hellenferreiradf@gmail.com](mailto:hellenferreiradf@gmail.com)

**Palavras-chave:** PFR; clorofórmio; modelagem; simulação.

Recebido em 11 de abril de 2026,

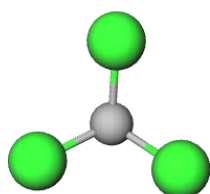
Aprovado em 26 de abril de 2026,

Publicado em 30 de abril de 2026.

## Introdução

A produção de compostos químicos em escala industrial está diretamente associada ao domínio dos fenômenos de transporte, da cinética química e do projeto adequado de reatores.<sup>1</sup> Entre os diversos produtos de interesse industrial, o clorofórmio (CHCl<sub>3</sub>) destaca-se por sua ampla aplicação como solvente em análises laboratoriais, além de atuar como intermediário na síntese de outros compostos relevantes, como o tetracloreto de carbono e fluidos refrigerantes.<sup>2</sup> Dessa forma, a compreensão dos mecanismos envolvidos em sua produção é essencial para garantir eficiência, segurança e viabilidade econômica nos processos industriais.

Figura 1. Estrutura do Clorofórmio (CHCl<sub>3</sub>)



A produção de clorofórmio ocorre, majoritariamente, por meio de reações sucessivas de cloração de compostos derivados do metano, envolvendo etapas complexas que podem gerar diferentes subprodutos dependendo das condições operacionais.<sup>3</sup> Nesse contexto, fatores como temperatura, pressão, tempo de residência e configuração do reator influenciam diretamente a conversão e seletividade do processo. Assim, a análise detalhada dessas variáveis torna-se indispensável para a otimização do sistema reacional.

Diante dessas complexidades, a modelagem matemática surge como uma ferramenta fundamental na engenharia química, permitindo a descrição quantitativa do comportamento de sistemas reacionais por meio de equações que representam balanços de massa, energia e quantidade de movimento. A partir desses modelos, torna-se possível prever o desempenho de processos sob diferentes condições operacionais, reduzindo a necessidade de experimentação direta, o que implica menor custo e maior segurança operacional.<sup>4</sup>

Além disso, a simulação computacional, aliada à modelagem matemática, possibilita a análise de cenários diversos de forma rápida e eficiente, contribuindo para o

desenvolvimento e otimização de processos industriais.<sup>4</sup> No caso de reatores químicos, modelos baseados em equações diferenciais são amplamente utilizados para descrever variações espaciais e temporais das concentrações das espécies envolvidas, sendo os reatores de fluxo pistonado (PFR) particularmente relevantes devido à sua aplicabilidade em sistemas gasosos e sua elevada eficiência em promover reações com altos graus de conversão.<sup>5</sup>

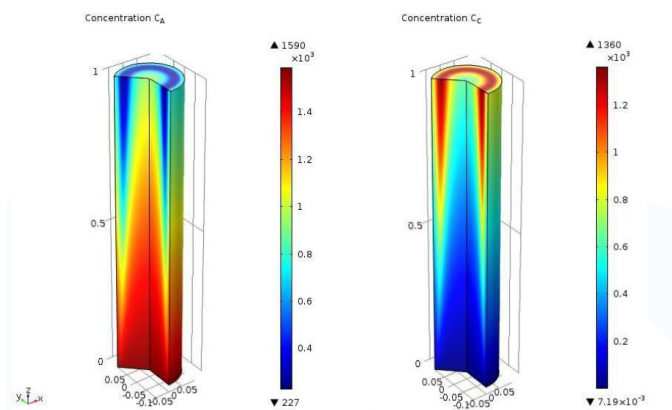
Nesse contexto, o trabalho de Guerreiro, H. M. *et. al* propõe a utilização de um modelo matemático simplificado para descrever a produção de clorofórmio em um reator PFR operando em regime estacionário.<sup>4</sup> A abordagem consiste na redução de equações diferenciais parciais para equações diferenciais ordinárias, facilitando a obtenção de soluções analíticas e a implementação computacional. Tal simplificação permite avaliar o comportamento do sistema com menor custo computacional, ao mesmo tempo em que mantém uma representação adequada dos fenômenos principais.

Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar o estudo proposto, destacando seus fundamentos teóricos, metodologia empregada, principais resultados e limitações. Busca-se, assim, compreender a aplicabilidade da modelagem matemática como ferramenta de análise e otimização de processos químicos, evidenciando suas contribuições e restrições no contexto da engenharia química.

## Metodologia

A presente resenha científica foi elaborada com base na análise de um estudo que aborda a modelagem matemática e a simulação computacional da produção de clorofórmio em um reator químico de fluxo pistonado (*Plug Flow Reactor* – PFR), operando em regime estacionário.<sup>4</sup> A metodologia do trabalho original fundamenta-se na aplicação de princípios clássicos da engenharia química, especialmente aqueles relacionados aos balanços de massa, fenômenos de transporte e cinética das reações químicas.

**Figura 2.** Esquema de um reator de fluxo pistonado (perfil de concentração ao longo do comprimento). Extraído da referência 4.



Inicialmente, o modelo matemático foi construído a partir de equações diferenciais parciais (EDPs), que descrevem o comportamento das concentrações das espécies químicas ao longo do reator, considerando os efeitos combinados de convecção, difusão e reação. Essas equações são derivadas do balanço de massa (Equação 1) aplicado a um elemento diferencial de volume no interior do reator, permitindo representar a variação espacial e temporal das propriedades do sistema.<sup>6,7</sup>

$$\text{Entrada} - \text{Saída} + \text{Geração} - \text{Consumo} = \text{Acumulado} \quad (1)$$

Com o objetivo de simplificar a resolução do modelo e reduzir a complexidade computacional, adotou-se a hipótese de regime estacionário (Equação 2), na qual o termo de acúmulo é desprezado. Essa consideração permite a transformação das equações diferenciais parciais em equações diferenciais ordinárias (EDOs), facilitando a obtenção de soluções analíticas para o perfil de concentração das espécies ao longo da coordenada axial do reator.<sup>4,7</sup>

$$C_A = C_{A_0} e^{-\frac{v}{D_{AB}} \sqrt{\left(\frac{v}{D_{AB}}\right)^2 + 4 \frac{k_1}{D_{AB}}} \frac{z}{2}} \quad (2)$$

Adicionalmente, foram assumidas algumas hipóteses simplificadoras, entre as quais destacam-se: comportamento ideal do escoamento em regime pistonado; ausência de mistura axial significativa; reação química de primeira ordem dependente de um único reagente limitante e negligência de efeitos associados a reações paralelas e mecanismos radiculares. Tais suposições são comuns em modelagens iniciais, pois permitem capturar os principais fenômenos do

sistema sem comprometer excessivamente a viabilidade da solução.<sup>4</sup>

Os parâmetros operacionais utilizados na modelagem, como temperatura, pressão, vazão mássica, concentração inicial dos reagentes, velocidade de escoamento e coeficiente de difusividade, foram obtidos a partir de dados da literatura, garantindo consistência e comparabilidade com estudos experimentais previamente realizados. Esses parâmetros são fundamentais para a resolução das equações e influenciam diretamente os perfis de concentração e as taxas de reação ao longo do reator.

A solução do modelo matemático foi implementada com o auxílio do software *Engineering Equation Solver* (EES), uma ferramenta amplamente utilizada na resolução de sistemas de equações não lineares e na simulação de processos de engenharia. O uso desse software possibilitou a obtenção de resultados gráficos que representam o comportamento das espécies químicas ao longo do reator, permitindo a análise qualitativa e quantitativa do sistema.

Por fim, os resultados obtidos por meio da modelagem foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura, utilizando-se métricas de erro percentual para avaliar a precisão do modelo. Essa etapa é essencial para validar a aplicabilidade da abordagem proposta, bem como para identificar possíveis limitações decorrentes das simplificações adotadas.

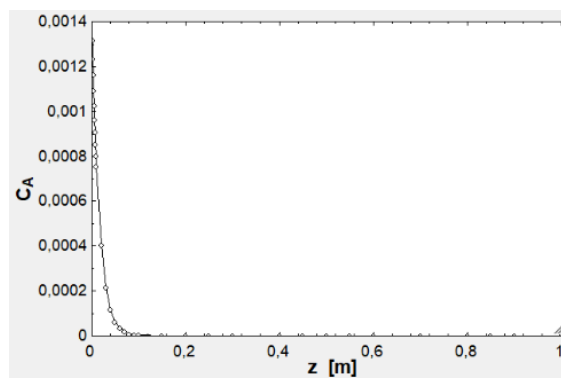
## Resultados e discussão

Os resultados obtidos a partir da modelagem matemática evidenciam que o modelo proposto é capaz de descrever, de forma consistente, o comportamento do consumo de cloreto ao longo do reator de fluxo pistonado. Observa-se que a concentração do reagente decresce acentuadamente nos primeiros trechos do reator, indicando uma elevada taxa de reação inicial. Esse comportamento está de acordo com o esperado para sistemas reacionais com cinética de primeira ordem, nos quais a taxa de consumo é proporcional à concentração do reagente, resultando em maior intensidade reacional nas regiões próximas à entrada.<sup>4</sup>

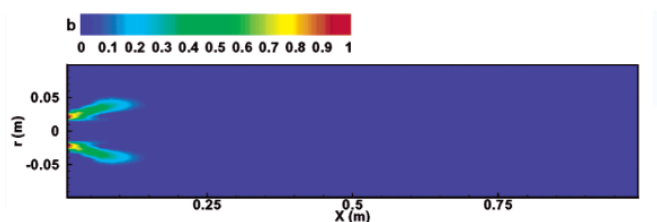
A comparação entre os dados simulados e os resultados experimentais disponíveis na literatura demonstra uma boa concordância qualitativa no perfil de consumo do cloreto, especialmente no que se refere à posição ao longo do reator onde ocorre seu esgotamento. Tal resultado reforça a validade da abordagem adotada, indicando que o modelo,

mesmo simplificado, é capaz de capturar os principais fenômenos associados ao transporte e à reação química no sistema.<sup>4,8</sup>

**Figura 3.** Comparação do comportamento do sistema modelado em estado estacionário (Gráfico da modelagem matemática). Extraído da referência 4.



**Figura 4.** Comparação do comportamento do sistema modelado em estado estacionário (Resultado experimental). Extraído da referência 4.



Entretanto, ao analisar o comportamento do clorofórmio, observam-se discrepâncias relevantes entre os resultados simulados e os dados experimentais. O modelo prevê um consumo mais acentuado desse composto ao longo do reator, resultando em concentrações residuais significativamente inferiores às observadas experimentalmente. Essa diferença pode ser atribuída, principalmente, às simplificações inerentes ao modelo matemático adotado.<sup>4</sup>

Dentre as limitações, destaca-se a consideração de apenas uma reação global de formação do clorofórmio, desconsiderando a presença de reações paralelas e consecutivas que ocorrem no sistema real. Na prática, o processo de cloração envolve uma rede complexa de reações, incluindo a formação de subprodutos como o tetracloreto de carbono, que consomem o clorofórmio formado e alteram significativamente o balanço global de espécies. A ausência

dessa rede reacional no modelo contribui para a superestimação do consumo do produto.<sup>4,9</sup>

Outro fator relevante diz respeito à representação dos fenômenos de transporte, especialmente a difusão. O modelo utiliza valores de difusividade simplificados, o que pode não refletir adequadamente o comportamento real das espécies no meio reacional, sobretudo em sistemas gasosos com interações multicomponentes.<sup>4</sup> Pequenas variações nesses parâmetros podem resultar em mudanças significativas nos perfis de concentração, evidenciando a sensibilidade do modelo às propriedades físico-químicas adotadas.

Além disso, o modelo assume condições ideais de escoamento em regime pistonado, negligenciando possíveis efeitos de dispersão axial, não uniformidades de velocidade e limitações de mistura. Em sistemas reais, tais efeitos podem influenciar a distribuição de concentração ao longo do reator, afetando diretamente as taxas de reação e a formação de produtos. A ausência dessas considerações contribui para o afastamento entre os resultados simulados e experimentais.

A influência das condições operacionais também deve ser destacada. Estudos experimentais indicam que fatores como pré-mistura dos reagentes e forma de alimentação impactam significativamente o desempenho do reator.<sup>4,9</sup> No entanto, essas variáveis não são plenamente incorporadas no modelo simplificado, limitando sua capacidade de reproduzir com exatidão o comportamento do sistema real.

Apesar dessas limitações, o modelo apresenta vantagens importantes, como a simplicidade de implementação e o baixo custo computacional. Tais características tornam a abordagem particularmente útil em etapas iniciais de análise e projeto de processos, permitindo a realização de estudos paramétricos e a identificação de tendências de comportamento do sistema.

De forma geral, os resultados indicam que a modelagem matemática em regime estacionário é eficaz para descrever qualitativamente o processo de produção de clorofórmio, especialmente no que se refere ao consumo de reagentes. Contudo, para uma representação quantitativa mais precisa, faz-se necessária a incorporação de maior complexidade ao modelo, incluindo múltiplas reações, efeitos de transporte mais realistas e validações experimentais adicionais.

## Conclusões

A análise do estudo evidenciou que a modelagem matemática aplicada à produção de clorofórmio em reator de fluxo pistonado constitui uma ferramenta relevante para a compreensão do comportamento de sistemas reacionais. O modelo desenvolvido, baseado na simplificação de equações diferenciais e na adoção do regime estacionário, mostrou-se eficiente na descrição qualitativa do consumo de reagentes, especialmente do cloreto, apresentando boa concordância com dados experimentais disponíveis na literatura.

Entretanto, foram identificadas limitações significativas na capacidade do modelo em prever com precisão o comportamento do clorofórmio ao longo do reator. Essas discrepâncias estão diretamente associadas às simplificações adotadas, como a consideração de uma única reação global, a negligência de mecanismos reacionais mais complexos e a ausência de efeitos detalhados de transporte e mistura. Tais fatores evidenciam que, embora o modelo seja útil para análises iniciais, sua aplicação em previsões quantitativas mais rigorosas é limitada.

Apesar disso, destaca-se que a simplicidade do modelo representa uma vantagem importante, permitindo sua utilização em estudos preliminares, análises paramétricas e no ensino de conceitos fundamentais de engenharia química. A abordagem adotada possibilita compreender tendências do sistema com baixo custo computacional, sendo especialmente útil em contextos acadêmicos.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros incorporem maior complexidade ao modelo, incluindo redes reacionais mais completas, efeitos de difusão multicomponente e validações experimentais adicionais. Tais aprimoramentos poderão ampliar a precisão e a aplicabilidade da modelagem, contribuindo de forma mais robusta para o desenvolvimento e otimização de processos industriais.

## 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 Kurtz, B. E. Homogeneous kinetics of methyl chloride chlorination. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1972, **11**, 332–338.
- 2 Raman, V. et al. Effect of feed-stream configuration on gas-phase chlorination reactor performance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, **42**, 2544–2557.
- 3 Luyben, W. L. *Process modeling, simulation, and control for chemical engineers*. 1996, **2**.
- 4 Guerreiro, H. M.; Fonseca Júnior, E. Q.; Rossi, A. S. Modelagem matemática e simulação computacional da produção de clorofórmio em reator químico de estado estacionário. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 2025, **23**.
- 5 Fogler, H. S. *Elementos das reações químicas*, 2009, **4**.
- 6 Li, W. et al. Multicomponent diffusion of F, Cl and OH in apatite with application to magma ascent rates. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, **550**.
- 7 Boyce, W. E.; DiPrima, R. C. Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno. *10 ed. Rio de Janeiro: LTC*, 2015, **10**.
- 8 Windholz, M. et al. The Merck Index. *10. ed. Rahway: Merck*, 1983.
- 9 Brunetti, F. Mecânica dos fluidos. *2. ed. São Paulo: Pearson*, 2008.
- 10 Cremasco, M. A. Fundamentos de transferência de massa. *2. ed. São Paulo: Blucher*, 2016.
- 11 Dantas, J. H. A. Síntese de catalisadores e concepção de reator para reações de cloração do gás natural. *Natal: UFRN*, 2005.

# Resíduos de antibióticos em amostras de milho: um novo método válido, rápido e confiável, utilizando HPLC-FLD

DOI: 10.5281/zenodo.19918912

Pedro Henrique Carvalho Lima <sup>a\*</sup>

Enrofloxacin is a fluoroquinolone drug widely used as an antibacterial agent in dogs, cats, chickens, and other animals for the treatment of various diseases. In these animals' bodies, this substance is metabolized into ciprofloxacin, another antibiotic belonging to the quinolone class. Despite being effective medications, these substances are excreted by these animals and end up contaminating the soil, affecting the development of certain plants, such as corn. This article addresses the creation and validation of a method for detecting these drugs in corn samples using High-Performance Liquid Chromatography with Fluorescence Detection (HPLC-FLD).

A enrofloxacin é um medicamento da família das fluoroquinolonas amplamente utilizado como antibactericida em cães, gatos, galinhas, e outros animais, para o tratamento de diversas doenças. No organismo desses animais, essa substância é metabolizada em ciprofloxacin, outro antibiótico pertencente à classe das quinolonas. Apesar de serem medicamentos eficazes, essas substâncias são excretadas por esses animais e acabam contaminando o solo, afetando o desenvolvimento de certas plantas, como o milho. O presente artigo aborda a criação e validação de um método de detecção desses medicamentos em amostras de milho, utilizando a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência com Detector de Fluorescência (HPLC-FLD).

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: phclima3101@gmail.com

**Palavras-chave:** Enrofloxacin; ciprofloxacin; milho; contaminação; HPLC-FLD.

Recebido em 11 de abril de 2026,

Aprovado em 26 de abril de 2026,

Publicado em 30 de abril de 2026

## Introdução

A agricultura brasileira é uma das maiores e mais competitivas do mundo. Dados mostram que o Brasil foi o quarto maior produtor de grãos (como soja, milho, feijão, arroz etc.) entre 2021 e 2023, produzindo cerca de 311 milhões de toneladas só em 2023, correspondendo a cerca de 8,8% da produção global de grãos.<sup>1,2</sup> A produção de milho, especificamente, foi de mais de 130 milhões de toneladas em 2023, posicionando o Brasil como o terceiro maior produtor do grão no mundo.<sup>2,3</sup> A Figura 1 mostra um levantamento da quantidade de milho produzida no Brasil desde a década de 70. Nota-se que o plantio do grão cresceu exponencialmente, principalmente entre 2010 e 2023.<sup>3</sup> Um grão versátil, de fácil plantio e colheita, é utilizado tanto para o consumo quanto para a produção de combustível, entre outras coisas.<sup>4,5,6</sup>

A enrofloxacin é uma molécula pertencente à classe das fluoroquinolonas, uma família de antibactericidas que agem a partir da inibição da atividade de duas enzimas cruciais para a reprodução do DNA bacteriano, a DNA-girase e a topoisomerase.<sup>7</sup> Ela é classificada como um zwitterion, ou seja, é uma molécula eletricamente neutra, mas que possui, em sua estrutura, números iguais de cargas positivas e negativas.<sup>8</sup> Ela

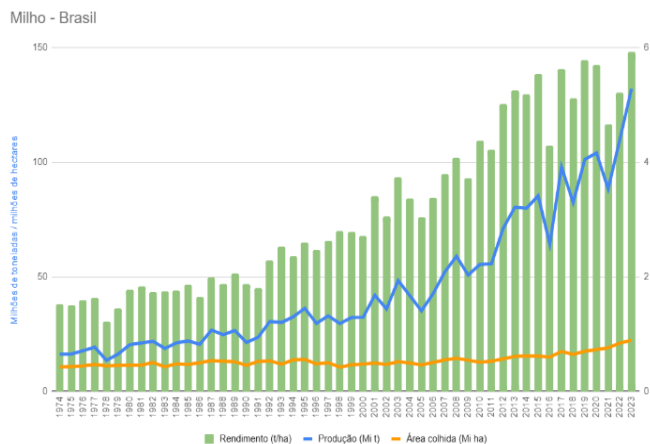
é utilizada principalmente no tratamento de infecções causadas por bactérias gram-negativas e gram-positivas, além de outros microrganismos sensíveis a esse medicamento, em cães, gatos, animais de grande porte, como bovinos, entre outros.<sup>9,10</sup> O principal metabólito dessa substância é a ciprofloxacin, antibactericida da família das quinolonas.<sup>11</sup>

Ambos os medicamentos, apesar de eficazes no tratamento de vários tipos de infecções bacterianas, não são completamente absorvidos no organismo desses animais, e acabam sendo excretados por eles. As fezes, contendo traços desses antibióticos, contaminam o solo e a água de onde são depositadas, e podem infectar futuras plantações que forem feitas nessas áreas, ou irrigadas com a água que, sem o conhecimento do produtor, está contaminada, assim como o uso desses excrementos como adubo em plantações.<sup>12</sup>

Gomes e colaboradores mostram que, mesmo em baixas concentrações, essas substâncias afetam consideravelmente a fisiologia e o desenvolvimento de diversas plantas, como o milho.<sup>13</sup> O desenvolvimento de técnicas para estimar a quantidade de resíduos de antibióticos é de suma importância para pesquisas sobre o crescimento do milho, e considerando a importância econômica do cultivo

desse grão, surge a necessidade de métodos cientificamente validados para identificar os resíduos desses medicamentos nas plantações.

**Figura 1.** Produção de milho no Brasil. Extraído da referência 3.



A validação de métodos é essencial, tanto para a criação de procedimentos que buscam ser utilizados como referência quanto para a avaliação da habilidade de um laboratório em produzir resultados analíticos estatisticamente confiáveis. Por isso, o processo para validar um método novo engloba uma variedade de aspectos, especialmente quando se considera seu papel na garantia e controle de qualidade (GQ/CQ) em métodos analíticos e práticas laboratoriais utilizadas em análises químicas.

Considerando a pouca quantidade de métodos validados para a determinação desses antibióticos em plantas, ainda mais aqueles que podem ser utilizados para a análise de partes do milho durante a germinação, Brito e colaboradores descrevem a criação e validação de um método inovador de detecção de enrofloxacin e ciprofloxacina em cultivos de milho utilizando Cromatografia Líquida de Alta Eficiência com Detector de Fluorescência (HPLC-FLD), e que pode ser aplicada a outros tipos de plantações.<sup>12</sup>

## Metodologia

Os pesquisadores utilizaram os reagentes descritos na Tabela 1, com suas respectivas marcas. Todos eram classificados como *pro analysis* (p.a.), com exceção dos solventes utilizados durante a análise no HPLC-FLD, que eram de grau HPLC ou superior.

**Tabela 1.** Reagentes utilizados por Brito e colaboradores durante o experimento.

Reagente	Marca e origem
Padrão de ciprofloxacina	Sigma-Aldrich, MO, EUA
Padrão de enrofloxacin	Sigma-Aldrich, MO, EUA
Hidróxido de sódio	Neon, São Paulo, Brasil
Fosfato de sódio dibásico	Neon, São Paulo, Brasil
Fosfato de sódio monobásico	Cromoline-Química Fina, São Paulo, Brasil
Ácido fosfórico	Sigma-Aldrich, St. Louis, EUA
Trietilamina	Merck, Darmstadt, Alemanha
Metanol	Merck, Darmstadt, Alemanha
Acetonitrila	Honeywell, EUA
Clorofórmio	Chemical CRQ, São Paulo, Brasil

Primeiramente, diluiu-se as soluções padrões de ciprofloxacina e enrofloxacin em uma mistura de água, metanol e uma solução aquosa de hidróxido de sódio a 0.1 mol.L<sup>-1</sup>, na proporção 20:40:40 (v/v/v). Posteriormente, as duas soluções resultantes foram então diluídas novamente, agora em uma mistura de trietilamina 0.4%, metanol e acetonitrila, na proporção 80:12:8 (v/v/v). Foram obtidas 6 soluções diferentes de cada um dos dois medicamentos, com concentrações iguais a 30, 40, 50, 60, 70 e 100 µg.kg<sup>-1</sup>, sendo todas elas armazenadas em recipientes de vidro âmbar na temperatura de -20 °C após o término de sua preparação.<sup>12</sup>

Para a validação do método, Brito e colaboradores utilizaram amostras de *Zea mays* (nome científico do milho) colhidas na Universidade Federal do Paraná (UFPR), que foram colhidas 30 dias após o plantio em um solo isento de quinolonas. As raízes das amostras foram removidas e a parte que nasceu para fora do solo foi triturada. Por fim, pesou-se 0.5 g dessas amostras em tubos de polipropileno de 15 mL, que posteriormente foram armazenados em um freezer a -20 °C, até o momento das análises.<sup>12</sup>

Os pesquisadores utilizaram um método de extração baseado na técnica proposta por Migliore e colaboradores, com algumas pequenas alterações.<sup>12,14</sup> Cada amostra moída foi transferida para um tubo de centrífuga tampado e homogeneizada. Após isso, adicionou-se os padrões de ciprofloxacina e enrofloxacin. As amostras foram mantidas

em repouso a 25 °C por 10 minutos. Em seguida, a extração foi iniciada com 1.5 mL de uma solução de acetonitrila e ácido acético, na proporção 99:1 (v/v), sendo posta em um vórtex por 1 minuto e depois em um banho de ultrassom por 5 minutos. O extrato resultante foi então evaporado até ficar seco, sob vácuo.<sup>12</sup>

Posteriormente, adicionou-se 2 mL de uma solução tampão fosfato salino (PBS, do inglês *Phosphate-Buffered Saline*), de 0.2 a 0.5 mol.L<sup>-1</sup> e pH = 7 as amostras secas e então postas no vórtex por 30 segundos. Após isso, 5 mL de clorofórmio foram adicionados nas soluções resultantes, sendo então agitadas por 2.5 minutos, colocadas no banho de ultrassom por mais 5 min e, por fim, sendo centrifugadas a 4.000 rpm por 5 min. Depois, 3 mL da fase orgânica obtida foram coletadas e secas a vácuo.<sup>12</sup>

Então, resuspendeu-se o produto obtido em 1 mL de uma mistura de trietilamina 0.4%, metanol e acetonitrila, na proporção 80:12:8 (v/v/v), com pH = 3, passando novamente pelo vórtex por 30 s, então por 5 min no banho de ultrassom, e finalmente sendo filtrada em um filtro de membrana de nylon com diâmetro de 13mm e poros com tamanho de 0.22 µm.<sup>12</sup>

As análises cromatográficas foram realizadas em um HPLC da marca Waters Alliance, que consiste em um módulo de separação (Waters 2695) acoplado a um detector de fluorescência (Waters 2475). A separação do analito foi realizada em uma coluna C18 da marca Supelco Analytical Ascentis (250 × 4,6 mm, 5 µm), mantida a 35 °C, com uma vazão de 1 mL.min<sup>-1</sup> e volume de injeção da amostra de 20 µL. A detecção por fluorescência foi realizada utilizando comprimentos de onda de excitação e emissão ajustados para 278 nm e 453 nm, respectivamente. A fase móvel consistiu em uma solução de trietilamina 0.4% com pH = 3 (fase A), metanol (fase B) e acetonitrila (fase C). Por fim, a eluição foi realizada sob condições de gradiente, conforme detalhado na Tabela 2.<sup>12</sup>

Para a validação do método, Brito e colaboradores consideraram a linearidade dos resultados, a matriz de efeitos sobre eles, a precisão e exatidão, e os limites de quantificação e detecção.<sup>12</sup>

A linearidade do método foi avaliada por meio da análise, em triplicata, de amostras em branco enriquecidas com soluções padrão de ciprofloxacina e enrofloxacina em cinco níveis de concentração: 30, 40, 50, 70 e 100 µg.kg<sup>-1</sup>. As áreas dos picos, extraídas dos cromatogramas resultantes, foram

utilizadas na construção das curvas de calibração. Baseando-se nesses resultados, os pesquisadores calcularam os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) e de correlação (r) para amostras não fortificadas e fortificadas. Em seguida, as curvas de calibração com matriz correspondente para ciprofloxacina e enrofloxacina foram analisadas quanto à normalidade dos resíduos, empregando o teste de Ryan-Joiner. O teste de Durbin-Watson foi utilizado para investigar a autocorrelação, enquanto o teste de Brown-Forsythe foi empregado para avaliar a homogeneidade das variâncias. Por fim, a análise de variância (ANOVA) confirmou a linearidade do método.<sup>12</sup>

**Tabela 2.** Gradiente estabelecido para a fase móvel do HPLC. Extraído da referência 12.

Tempo (min)	Fase móvel (%)		
	A	B	C
0	80	12	8
5	80	12	8
8	78	13	9
12	76	14	10
18	5	95	0
21	5	95	0
25	80	12	8

A seletividade do método foi avaliada por meio do estudo dos cromatogramas dos brancos produzidos, visando detectar a ocorrência de alterações que possam eluir simultaneamente a retenção dos analitos alvo.<sup>12</sup>

O efeito de matriz foi analisado pelos pesquisadores por meio da comparação de duas curvas de calibração: uma elaborada com extratos de matriz fortificados e outra confeccionada sem a presença de matriz, ou seja, as soluções padrão dos analitos, nos cinco níveis de concentração citados anteriormente. Depois de reconstituídos os extratos de matriz, adicionou-se a solução padrão com os analitos, e a mistura foi colocada no vórtex por 30 segundos. Após isso, as amostras foram injetadas e as curvas de calibração foram geradas em triplicata para cada concentração. Finalmente, com o objetivo de avaliar as disparidades na variância e nas inclinações das curvas de calibração, Brito e colaboradores empregaram o teste F e o teste t de Student, para comparar estatisticamente as curvas, com um nível de confiança de 95%.<sup>12</sup>

Os pesquisadores avaliaram a precisão do método de acordo com sua repetibilidade e reprodutibilidade intralaboral.

A repetibilidade foi analisada utilizando brancos nas concentrações de 30, 60 e 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ , analisando-os em triplicata nas mesmas condições estabelecidas para o método criado. Além disso, a mesma instrumentação foi utilizada, assim como o mesmo pesquisador reproduziu as análises. As análises de reprodutibilidade intralaboral foram feitas sob o mesmo protocolo, porém, nesse cenário, as medidas foram realizadas em dias distintos, por dois analistas diferentes. O desvio padrão foi calculado de seguindo as regras estabelecidas no Manual de Garantia da Qualidade Analítica.<sup>12,15</sup>

Testes de recuperação foram utilizados pelos pesquisadores para avaliar a exatidão do método. Utilizando brancos nas concentrações de 30, 60 e 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  e rodando os testes em triplicata, a recuperação foi determinada utilizando a seguinte equação:

$$\text{Recuperação (\%)} = \left( \frac{\text{conteúdo medido}}{\text{nível de fortificação}} \right) * 100 \quad (1)$$

Os resultados foram avaliados de acordo com os critérios de aceitação estabelecidos no Manual de Garantia da Qualidade Analítica.<sup>12,15</sup>

Os limites de detecção e quantificação foram obtidos a partir de um método que relaciona o desvio padrão dos resultados com a inclinação da curva analítica. Com isso, as Equações 2 e 3 foram utilizadas para calcular os dois parâmetros.

$$LOD = \frac{(3.3 * \sigma)}{s} \quad (2)$$

$$LOQ = \frac{(10 * \sigma)}{s} \quad (3)$$

Por fim, Brito e colaboradores, baseando-se na estatística de J Youden, com apenas algumas mínimas alterações pré-estabelecidas nas condições cromatográficas, estudaram a robustez do método elaborado. Foram realizados oito testes utilizando amostras em branco fortificadas a 60  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ , todos em duplicata, para determinar o quanto cada fator analisado (listados na Tabela 3) influência no resultado. Finalmente, foi feita uma comparação entre o desvio padrão da reprodutibilidade intralaboral ( $S_{repr}$ ) e o desvio padrão da

diferença do resultado entre os fatores analisados ( $S_{factor}$ ), sendo a robustez rejeitada para todo  $S_{factor} > S_{repr}$ .<sup>12</sup>

**Tabela 3.** Gradiente estabelecido para a fase móvel do HPLC. Extraído da referência 12.

Fator	1	2	3	4	5	6	7	8
A ou a	A	A	A	A	a	a	a	a
B ou b	B	b	B	b	B	b	B	b
C ou c	C	C	c	c	C	C	c	c

## Resultados e discussão

A análise de resíduos de antibióticos ou de qualquer outro tipo de contaminante em plantas apresenta elevada complexidade, e estudos como esse necessitam de um método que remova os analitos das células de maneira adequada, mas que também não traga junto outras coisas que atrapalhem a análise. Considerando isso, Brito e colaboradores decidiram estabilizar o pH = 7, pois eles observaram que, caso o pH ficasse abaixo de 6 ou passasse de 8, tanto a ciprofloxacina quanto a enrofloxacin demonstravam maior afinidade com solventes que se misturam com água, ou seja, solventes polares, o que fazia com que o clorofórmio não funcionasse tão bem para extrair os antibióticos.<sup>12</sup>

Considerando as análises feitas nas concentrações de 30, 40, 50, 70 e 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  para avaliar a linearidade do método, os pesquisadores obtiveram os resultados listados na Tabela 4, para ambos os analitos. Brito e colaboradores destacaram a diferença de valores entre os coeficientes angulares das equações das retas obtidas, sendo o valor da enrofloxacin sete vezes maior que o da ciprofloxacina, o que indica que a enrofloxacin emite um sinal mais significativo que seu metabólito na matriz estabelecida. Ambos os valores de  $R^2$  e  $r$  encontrados estão dentro da faixa de aceitação estabelecida pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que é de  $>0.99$ .<sup>12,16</sup>

Como descrito na seção “Metodologia” e ilustrado na Figura 2, a seletividade do método foi avaliada utilizando os cromatogramas da matriz em branco, dos solventes padrões e da matriz padrão. No branco (Figura 2a), observa-se que não há sinal dos analitos, e já na Figura 2b, podemos observar que as amostras fortificadas com 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  emitem o sinal de ambos os analitos, entre 10 e 15 min de retenção. Este resultado

confirma que o método de extração estabelecido pelos colaboradores foi eficiente e que a análise foi devidamente otimizada.<sup>12</sup>

**Tabela 4.** Dados da linearidade do método criado para determinar os antibióticos numa concentração entre 30 e 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ . Extraído da referência 12.

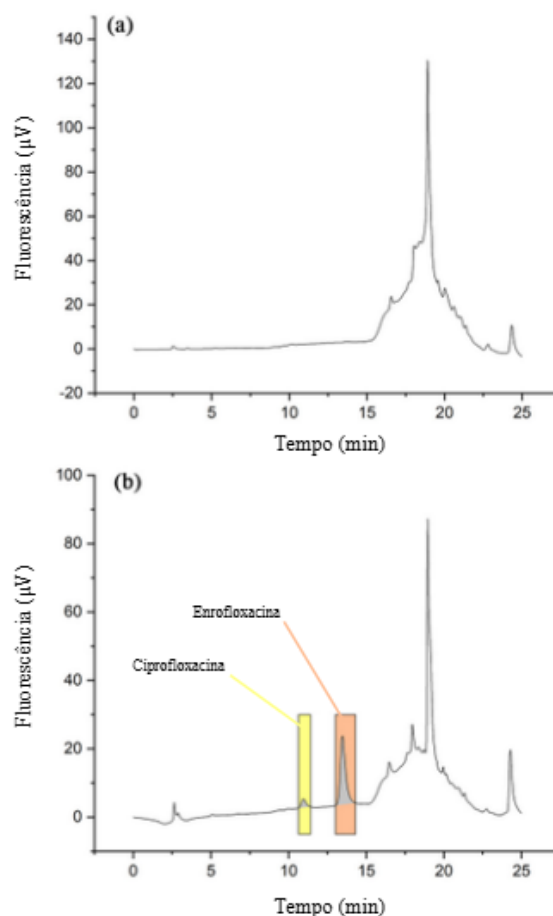
Dados	Analito	
	Ciprofloxacina	Enrofloxacina
Eq. da reta	$y = 0.0104x - 0.0264$	$y = 0.0755x - 0.4064$
$R^2$	0.9907	0.9962
$r$	0.9953	0.9980

Assim como nas equações da reta na avaliação da linearidade do método, foram observados, nos resultados da avaliação dos efeitos da matriz, diferenças relevantes entre as inclinações das curvas de calibração obtidas para os analitos, tanto para as amostras contendo a matriz estabelecida quanto para as soluções padrão, como mostra a Figura 3.<sup>12</sup>

Como ilustrado na Figura 3, em cada nível de concentração testado (30, 40, 50, 70 e 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ), as curvas de calibração feitas na matriz se mostraram diferentes das curvas feitas utilizando os solventes padrão, tanto na intensidade da absorção quanto na sua inclinação, sendo ainda maior para a ciprofloxacina. Brito e colaboradores utilizaram o teste F e o teste t de Student para comparar a variação e a média das inclinações, e ambos comprovaram que existe, sim, um efeito de matriz importante, o que confirma os resultados visuais da Figura 3. Os pesquisadores frisaram a que, quando se analisam amostras complexas que têm pouca concentração de um ou mais analitos, é muito importante verificar se existe esse efeito de matriz, para termos certeza de que os resultados estão corretos e evitar erros na análise.<sup>12</sup>

Para verificar a exatidão do procedimento, Brito e colaboradores efetuaram várias análises da mesma porção de uma mesma amostra uniforme em condições reguladas anteriormente. Em seguida, foram calculados os desvios-padrão relativos, conforme apresentado na Tabela 4. Os resultados indicam que o método é estatisticamente exato, pois, como estabelecido no Manual de Garantia da Qualidade Analítica, métodos com desvios padrão relativos de até 20% cumprem o requisito de precisão ideal.<sup>12,15</sup>

**Figura 2.** Cromatogramas das amostras em branco, ou seja, sem antibióticos (a) e das amostras fortificadas com o analito a 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  (b). Extraído da referência 12.



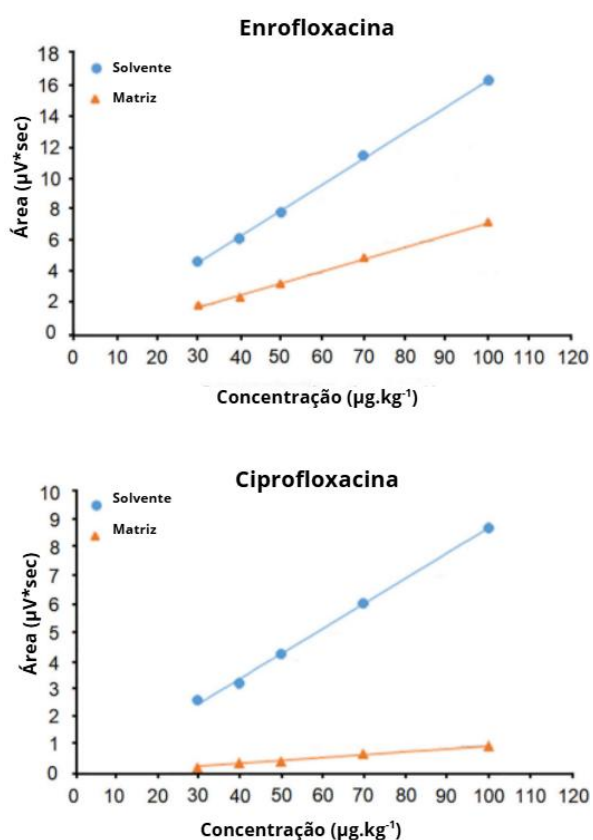
**Tabela 5.** Dados estatísticos obtidos durante a validação do método nas concentrações de 30, 60 e 100  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ . Extraído da referência 12.

Analito	Recuperação (%)		
	30 $\mu\text{g kg}^{-1}$	60 $\mu\text{g kg}^{-1}$	100 $\mu\text{g kg}^{-1}$
Enrofloxacina	123.1	110.24	108.28
Ciprofloxacina	90.78	105.05	86.49
<b>Desvio padrão relativo da repetibilidade (%)</b>			
Enrofloxacina	3.75	3.73	4.64
Ciprofloxacina	5.24	11.83	6.46
<b>Desvio padrão relativo da reprodutibilidade (%)</b>			
Enrofloxacina	9.35	8.06	3.82
Ciprofloxacina	11.73	9.04	4.32

A exatidão de um método expressa o grau de proximidade entre o resultado obtido no ensaio e o valor real da concentração do analito presente na amostra. Brito e colaboradores determinaram que a exatidão do método estabelecido por eles variou entre 86% e 123%, aproximadamente, como mostra a Tabela 5. Segundo a RDC nº 166, que controla os limites aceitáveis de precisão para amostras homogêneas, a recuperação deve ficar entre 70% e 130%. Assim, o método mostrou uma precisão dentro do esperado, seguindo os critérios para concentrações de 30, 60 e 100  $\mu\text{g kg}^{-1}$ .<sup>12,16</sup>

O limite de detecção (LD) indica a menor quantidade da substância que conseguimos identificar, mesmo que não possamos medi-la com exatidão, durante uma análise. Por sua vez, o limite de quantificação (LQ) corresponde à menor quantidade do analito que pode ser determinada com precisão e confiabilidade. Os dados da Tabela 6 mostram os resultados obtidos por Brito e colaboradores. Curiosamente, os valores de LD e LQ para a ciprofloxacina foram quase três vezes maiores que os encontrados para a enrofloxacina.

**Figura 3.** Efeito de matriz na análise do milho contaminado. Extraído da referência 12.



Por último, a determinação da robustez do método de análise dos antibióticos revelou que ele não se mostrou imune a mudanças na força do tampão fosfato salino, na temperatura da coluna ou no tempo de homogeneização no vórtex, considerando que o desvio padrão da diferença dos fatores ( $S_{\text{factor}}$ ) excedeu o desvio padrão da consistência dentro do laboratório ( $S_{\text{repro}}$ ). Logo, é crucial que esses elementos sejam mantidos sob atenção constante durante a execução da análise.

**Tabela 6.** Limite de detecção (LD) e quantificação (LQ) do método. Extraído da referência 12.

Analito	LD ( $\mu\text{g.kg}^{-1}$ )	LQ ( $\mu\text{g.kg}^{-1}$ )
Ciprofloxacina	16.65	50.44
Enrofloxacina	6.57	19.92

## Conclusões

Apesar da existência de diferentes métodos destinados à detecção de antibióticos em plantas (ou em água contaminada), muitos desses não passam pelo processo de validação necessário para serem adotados como medidas de análise padrão na determinação desses medicamentos. O trabalho de Brito e colaboradores surge com a intenção de criar um método inovador para a análise de ciprofloxacina e enrofloxacina em amostras de milho, com a intenção de ser um método rápido e acessível, mas acima de tudo, um método devidamente validado de acordo com as regras da ANVISA.<sup>16</sup>

Os resultados obtidos pelos pesquisadores são muito satisfatórios e passaram por diversas análises estatísticas que comprovaram sua eficácia na determinação dos antibióticos, mesmo que este analito esteja em concentrações baixíssimas. No geral, o método foi validado com sucesso e se mostra reprodutível e repetível, além de eficaz, rápido e prático, sem um gasto exorbitante de reagentes e nem de perdas desnecessárias. Apesar disso, o método é suscetível a resultados ambíguos caso haja alguma mudança na força do tampão utilizado, na temperatura da coluna, ou até mesmo no tempo de homogeneização, diminuindo a confiança no teste, principalmente se as condições descritas não forem seguidas. Por fim, o método criado por Brito e colaboradores se mostra promissor, podendo ser utilizado em outras análises de diferentes tipos de medicamentos e outros tipos de plantas, não se limitando aos antibióticos analisados e nem a planta aqui utilizada, o milho.

## Contribuições por Autor

O artigo 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 A agricultura brasileira, <https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor/a-agricultura-brasileira>, (accessed April 11, 2026).
- 2 Agropensa - Agricultura, <https://www.embrapa.br/agropensa/agro-em-dados/agricultura>, (accessed April 11, 2026).
- 3 Agropensa - Milho, <https://www.embrapa.br/agropensa/agro-em-dados/agricultura/milho>, (accessed April 11, 2026).
- 4 AGEITEC - Plantio, <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/plantio>, (accessed April 11, 2026).
- 5 O novo (e pujante) cliente dos agricultores brasileiros, <https://www.theagribiz.com/dentro-da-porteira/o-novo-e-pujante-cliente-dos-agricultores-brasileiros-o-proprio-brasil-milho/>, (accessed April 11, 2026).
- 6 M. Chaiben Neto, A. D. Robaina, M. X. Peiter, S. A. Rodrigues, Y. R. Flores, J. Bruning, J. G. D. Silva and L. D. Ferreira, Economic indicators for ethanol production from starch crops under different irrigation managements, *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, 2022, **26**, 640–648.
- 7 L. R. Alberton, C. F. Orlandini, T. M. Zampieri, A. Y. Nakamura, D. D. Gonçalves, R. Piau Júnior, M. M. Zaniolo, S. T. Cardim, O. Vidotto and J. L. Garcia, Eficácia do dipropionato de imidocarb, da enrofloxacin e do cloridrato de oxitetraciclina no tratamento de bovinos naturalmente infectados por *Anaplasma marginale*, *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.*, 2015, **67**, 1056–1062.
- 8 Fluoroquinolonas - Doenças infecciosas, <https://www.msmanuals.com/pt/profissional/doencas-s-infecciosas/bacterias-e-medicamentos-antibacterianos/fluoroquinolonas>, (accessed April 11, 2026).
- 9 C. Kambalapally, P. K. Suthar, P. Patale, S. Dhiman, V. Gupta, V. Thongire, D. Sarmah, A. Datta, K. Kalia and P. Bhattacharya, in *Treatments, Nutraceuticals, Supplements, and Herbal Medicine in Neurological Disorders*, Elsevier, 2023, pp. 979–992.
- 10 Enrofloxacin, <https://consultaremedios.com.br/enrofloxacin/bula>, (accessed April 11, 2026).
- 11 Ciprofloxacina, <https://www.einstein.br/n/vida-saudavel/ciprofloxacina-saiba-as-indicacoes-e-os-efeitos-colaterais-do-antibiotico>, (accessed April 12, 2026).
- 12 J. Brito, V. Bernardoni, T. Da Silva, L. Ramos, M. Gomes and D. De Assis, Development and Validation of a Rapid and Reliable HPLC-FLD Method for the Quantification of Ciprofloxacin and Enrofloxacin Residues in Zea mays, *J. Braz. Chem. Soc.*, DOI:10.21577/0103-5053.20210129.
- 13 M. P. Gomes, V. S. Richardi, E. M. Bicalho, D. C. Da Rocha, M. A. Navarro-Silva, P. Soffiatti, Q. S. Garcia and B. F. Sant’Anna-Santos, Effects of Ciprofloxacin and Roundup on seed germination and root development of maize, *Science of The Total Environment*, 2019, **651**, 2671–2678.
- 14 L. Migliore, S. Cozzolino and M. Fiori, Phytotoxicity to and uptake of enrofloxacin in crop plants, *Chemosphere*, 2003, **52**, 1233–1244.
- 15 Manual de Garantia da Qualidade Analítica, <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/legislacao-programas-nacionais-e-seguranca-dos-alimentos->

1/legislacao/legislacao-vinhos-e-bebidas, (accessed April 12, 2026).

- 16 NORMAS REGULATÓRIAS DA ANVISA, [https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=categorias&cod\\_modulo=310&menuOpen=true](https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=categorias&cod_modulo=310&menuOpen=true), (accessed April 12, 2026).

# Saneamento e precariedade urbana: uma análise crítica sobre o acesso à água e ao esgoto em assentamentos informais

DOI: 10.5281/zenodo.19916174

Iago Cezario de Souza <sup>a\*</sup>

This critical review addresses the problem of precarious access to water and sanitation in informal urban settlements, focusing on the implications for health, quality of life, and gender relations. The analysis highlights how the informality of these settlements translates into social vulnerability and greater exposure to infectious and parasitic diseases, especially for women and children. It argues that the absence of basic infrastructure compromises not only physical health but also mental well-being and the capacity for socioeconomic development of communities, such as the production of agroecological food. The discussion emphasizes the urgency of public policies that recognize local specificities and guarantee the human right to sanitation, promoting dignity and social justice in contexts of urban exclusion.

Esta resenha crítica aborda a problemática do acesso precário à água e ao esgotamento sanitário em ocupações urbanas informais, com foco nas implicações para a saúde, qualidade de vida e relações de gênero. A análise destaca como a informalidade dos assentamentos se traduz em vulnerabilidade social e maior exposição a doenças infecciosas e parasitárias, especialmente para mulheres e crianças. Argumenta-se que a ausência de infraestrutura básica compromete não apenas a saúde física, mas também o bem-estar mental e a capacidade de desenvolvimento socioeconômico das comunidades, como a produção de alimentos agroecológicos. A discussão enfatiza a urgência de políticas públicas que reconheçam as especificidades locais e garantam o direito humano ao saneamento, promovendo a dignidade e a justiça social em contextos de exclusão urbana.

*Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).*

*\*E-mail: iagocezario@gmail.com*

**Palavras-chave:** Saneamento básico; precariedade urbana; direito à água; justiça social.

Aceito em 13 de abril de 2026,

Aprovado em 26 de abril de 2026,

Publicado em 30 de abril de 2026.

## Introdução

O saneamento básico, compreendendo o acesso à água potável, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais, é um pilar fundamental para a saúde pública, a dignidade humana e o desenvolvimento socioeconômico. No Brasil, contudo, a urbanização acelerada e frequentemente desordenada resultou na proliferação de assentamentos informais, nos quais a ausência ou a precariedade desses serviços se manifesta de forma mais aguda.<sup>1</sup> Essa realidade não é meramente uma questão de infraestrutura; ela se entrelaça com complexas dinâmicas sociais, econômicas e políticas, expondo parcelas significativas da população a condições de vida insalubres e injustas.<sup>2</sup> A garantia do acesso universal ao saneamento é, portanto, um imperativo ético e um desafio persistente para as políticas públicas, especialmente em grandes centros urbanos.

A exclusão do acesso formal aos serviços de saneamento em ocupações urbanas informais é um reflexo direto da segregação socioespacial inerente ao modelo de

desenvolvimento urbano brasileiro. Nessas áreas, a população, frequentemente de baixa renda, é compelida a desenvolver estratégias de sobrevivência que, embora demonstrem resiliência, expõem-nas a riscos sanitários e ambientais significativos.<sup>3</sup> A informalidade do assentamento, caracterizada pela ausência de reconhecimento legal e pela omissão do Estado, perpetua um ciclo de vulnerabilidade que afeta desproporcionalmente os grupos mais marginalizados, como mulheres e crianças, que assumem a maior parte do ônus da falta de infraestrutura.<sup>4</sup>

Nesse contexto, o trabalho de A. E. Arruda e L. Heller surge como uma contribuição valiosa para a compreensão das nuances do acesso à água e ao esgotamento sanitário em ocupações urbanas.<sup>5</sup> Ao focar na Ocupação Vitória, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), os autores oferecem uma análise microssocial que ilumina as percepções dos moradores sobre a associação entre a precariedade do saneamento e as condições de saúde, a qualidade de vida e as condições de saúde, a qualidade de vida e as relações de gênero. A relevância desse estudo reside na sua capacidade de

humanizar as estatísticas, revelando as experiências vividas e as estratégias cotidianas de uma população que luta pelo direito à cidade e à dignidade.

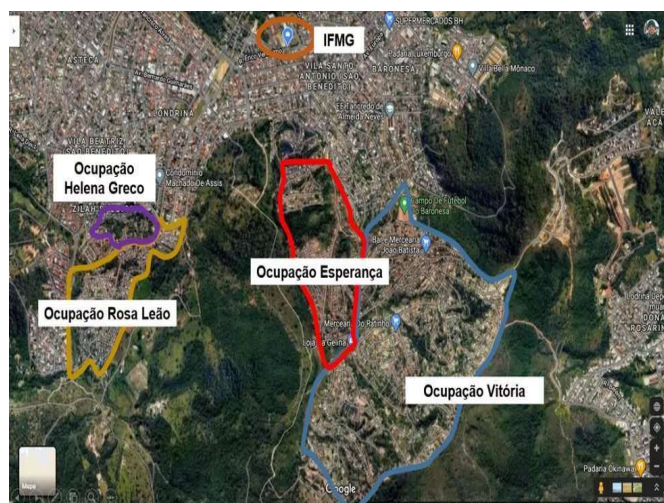
Esta resenha crítica busca aprofundar a discussão proposta por A. E. Arruda e L. Heller, expandindo as reflexões sobre as implicações sociais e políticas da informalidade urbana e da exclusão do saneamento. Serão exploradas as metodologias empregadas, os resultados obtidos e as conclusões apresentadas, com o objetivo de tecer novas perspectivas sobre a urgência de políticas públicas integradas que transcendam a mera provisão de infraestrutura, abordando as raízes da desigualdade e promovendo a justiça social em assentamentos informais.<sup>5</sup> A análise crítica visa, assim, contribuir para o debate sobre a universalização do saneamento como um direito humano fundamental e um motor para o desenvolvimento equitativo.

## Metodologia

A abordagem metodológica do trabalho de A. E. Arruda e L. Heller é fundamentalmente qualitativa, ancorada na pesquisa de campo e na perspectiva dos atores sociais envolvidos.<sup>5</sup> Os autores empregaram uma estratégia de imersão no cenário estudado, a Ocupação Vitória, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que é caracterizada por sua informalidade e vulnerabilidade socioeconômica.<sup>6</sup> Essa escolha metodológica é particularmente pertinente para investigar fenômenos sociais complexos, em que a compreensão aprofundada das experiências e percepções dos indivíduos é mais relevante do que a quantificação de dados.<sup>7</sup>

O método de pesquisa central utilizado pelos autores foi a observação participante, desenvolvida em duas etapas. A primeira, exploratória (segundo semestre de 2017 e primeiro semestre de 2018), focou na aproximação com movimentos sociais e lideranças comunitárias, além de visitas e observação em manifestações públicas. A segunda etapa (novembro de 2018 a março de 2019) aprofundou a observação participante em situações cotidianas da comunidade e na realização de entrevistas. A observação participante permitiu aos pesquisadores vivenciar e compreender as dinâmicas sociais, as estratégias de sobrevivência e os desafios enfrentados pelos moradores em seu contexto diário, fornecendo uma base rica para a análise qualitativa.<sup>8</sup>

**Figura 1.** Conjunto de quatro comunidades (Vitória, Esperança, Rosa Leão e Helena Greco) na zona norte de BH, representando um dos maiores assentamentos urbanos da América Latina. Extraído da referência 25.



**Figura 2.** Vista aérea da ocupação Vitória. Extraído da referência 5.



Complementarmente à observação, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com nove moradores da Ocupação Vitória, sendo oito mulheres e um homem, com idades entre 20 e 60 anos. A seleção dos participantes foi intencional, utilizando o método bola de neve, com informantes-chave incluindo lideranças comunitárias, integrantes de movimentos sociais e trabalhadores da Subsecretaria de Segurança Alimentar de Belo Horizonte (SUSAN).<sup>5</sup> Essa diversidade na seleção visou capturar percepções distintas sobre o território e suas problemáticas, enriquecendo a análise com a revelação de contradições e tensões inerentes ao fenômeno estudado.<sup>9</sup>

O roteiro das entrevistas foi elaborado a partir da experiência dos pesquisadores e de uma revisão da literatura,

abordando significados de viver em uma ocupação urbana e questões relacionadas ao direito humano à água e ao esgotamento sanitário, como disponibilidade, qualidade, segurança, acessibilidade física e financeira, e aceitabilidade. O foco foi dado aos efeitos da situação do saneamento sobre a saúde (enfermidades, qualidade de vida e relações de gênero).<sup>5</sup> Os dados coletados foram registrados em diário de campo e gravação sonora, e a análise foi realizada por meio da análise de interpretação de sentidos, após transcrição e leitura compreensiva do material.<sup>10</sup>

Para a elaboração desta resenha crítica, a metodologia empregada foi a análise documental e crítica. Inicialmente, procedeu-se à leitura do artigo de A. E. Arruda e L. Heller, com o objetivo de apreender sua estrutura argumentativa, os dados empíricos apresentados e as conclusões alcançadas. Esta etapa envolveu a identificação dos principais achados, das lacunas e das contribuições do estudo para o campo do saneamento e da saúde coletiva em contextos de informalidade urbana.

Em seguida, realizou-se uma análise comparativa e contextualizada, onde as informações do artigo foram confrontadas com o conhecimento prévio sobre o tema, incluindo a legislação brasileira sobre saneamento (como o Novo Marco Legal do Saneamento) e discussões acadêmicas mais amplas sobre justiça social, direito à cidade e determinantes sociais da saúde.<sup>11</sup> O objetivo foi não apenas resumir o conteúdo, mas também tecer novas perspectivas e opiniões relevantes buscando inovar na discussão.

Por fim, a construção desta resenha crítica culminou na síntese interpretativa e na proposição de novas perspectivas. Após a análise documental e comparativa, buscou-se transcender a descrição dos achados do artigo original, estabelecendo um diálogo crítico com a literatura existente e com o contexto socioeconômico e político atual do saneamento no Brasil. Este processo permitiu a formulação de opiniões e ideias relevantes, que enriquecem a discussão sobre a problemática do acesso à água e esgoto em ocupações informais, visando contribuir para o avanço do conhecimento e para a reflexão sobre políticas públicas mais eficazes e justas.

## Resultados e discussão

A análise da problemática do saneamento em ocupações urbanas informais revela um cenário de profunda iniquidade social e ambiental, onde a ausência de infraestrutura básica transcende a mera carência material para se configurar como uma violação de direitos humanos fundamentais.<sup>12</sup> A

informalidade desses assentamentos, frequentemente caracterizada por soluções precárias de abastecimento de água e esgotamento sanitário, não é um mero detalhe urbanístico, mas um reflexo da segregação socioespacial que marginaliza e expõe parcelas da população a riscos desproporcionais.<sup>13</sup> Essa realidade, longe de ser um acaso, é o resultado de um processo histórico de urbanização excludente e da falha contínua do Estado em garantir o acesso universal a serviços essenciais.

**Figura 3.** Poço cavado por moradores na ocupação Vitória. Extraído da referência 5.



Os impactos na saúde são uma das manifestações mais cruéis dessa exclusão. A correlação entre a precariedade do saneamento e a alta incidência de doenças infecciosas e parasitárias, como diarreias, giardíase e arboviroses, é uma constante em estudos epidemiológicos em áreas vulneráveis. A intermitência no fornecimento de água e a necessidade de armazenamento em condições inadequadas criam ambientes propícios para a proliferação de vetores, transformando a ausência de saneamento em um catalisador de crises de saúde pública.<sup>14</sup> Essa dinâmica reforça a compreensão de que a saúde não é um atributo individual, mas uma construção social profundamente influenciada pelas condições de vida e pelo acesso a serviços básicos.<sup>15</sup>

Para além da saúde física, a precariedade do saneamento impacta diretamente a qualidade de vida e o bem-estar psicossocial das comunidades. A impossibilidade de realizar atividades básicas de higiene, a restrição na produção de alimentos e o comprometimento de práticas culturais e identitárias são dimensões que corroem a dignidade humana.<sup>16</sup> Nesse contexto, são recorrentes quadros de estresse crônico, ansiedade e sentimentos de insegurança e constrangimento, especialmente associados à falta de privacidade, à incerteza no acesso à água e à exposição contínua a ambientes insalubres.

A capacidade de cultivar um quintal produtivo, por exemplo, pode estar intrinsecamente ligada ao acesso à água, ilustrando como o saneamento se conecta à autonomia, à resiliência e à saúde mental dos indivíduos, oferecendo um contraponto à lógica da escassez e da exclusão.<sup>17</sup>

**Figura 4.** Horta improvisada na ocupação de Vitória.

Extraído da referência 5.



A relação entre o acesso à água e a produção agroecológica em contextos de informalidade pode ser ainda mais aprofundada a partir do debate sobre o reuso hídrico, especialmente por meio da utilização de águas cinzas.<sup>20</sup> Em cenários de escassez, práticas como o reaproveitamento de águas provenientes de pias, chuveiros e lavanderias, quando realizadas com técnicas adequadas de filtragem e manejo, podem representar uma alternativa viável para a irrigação de hortas domésticas. Essa estratégia não apenas contribui para a segurança alimentar das famílias, mas também promove o uso mais eficiente dos recursos hídricos disponíveis, reduzindo a dependência de fontes externas e fortalecendo a autonomia comunitária.

Um aspecto crítico e frequentemente subestimado é a dimensão das relações de gênero no contexto da escassez hídrica. Em muitos assentamentos informais, as mulheres são as principais responsáveis pela gestão da água no ambiente doméstico, dedicando horas à coleta e ao transporte, muitas vezes com a ajuda de crianças.<sup>18</sup> Essa sobrecarga de trabalho não remunerado intensifica a desigualdade de gênero, limitando o acesso das mulheres à educação, ao trabalho formal e ao lazer, e perpetuando um ciclo de vulnerabilidade.<sup>19</sup> A falta de privacidade em instalações sanitárias inadequadas, como banheiros sem portas, também expõe as mulheres a situações de constrangimento e a riscos aumentados de infecções urinárias, com sérias implicações para a saúde reprodutiva.

A informalidade desses assentamentos não se traduz apenas na ausência de serviços, mas na negação do reconhecimento e do direito à cidade. A dificuldade de acesso a serviços públicos essenciais, como a atenção primária à saúde, devido à ausência de reconhecimento formal do território, é um exemplo contundente de como a invisibilidade legal se traduz em exclusão de direitos.<sup>21</sup> A omissão do poder público em garantir a universalização do saneamento transfere o ônus da provisão para os próprios moradores, que, em um esforço de autogestão e resiliência, desenvolvem soluções criativas, mas muitas vezes insalubres, para suprir suas necessidades básicas.<sup>22</sup>

Uma perspectiva crítica sobre essa realidade aponta para a necessidade de superar abordagens restritas à dimensão puramente infraestrutural do saneamento. A solução não reside apenas na instalação de tubulações e estações de tratamento; é fundamental integrar o saneamento com políticas habitacionais, de saúde e de desenvolvimento urbano.<sup>23</sup> Nesse sentido, ganham relevância alternativas baseadas no saneamento ecológico, como sistemas descentralizados de tratamento, incluindo bacias de evapotranspiração, fossas ecológicas e outras tecnologias sociais de baixo custo, que podem ser implementadas mesmo em territórios onde a rede formal ainda não está disponível. As bacias de evapotranspiração, por exemplo, consistem em sistemas fechados que utilizam camadas de materiais filtrantes (como brita, areia e solo) associadas a plantas de grande porte para promover a decomposição da matéria orgânica e a evaporação da água, evitando a contaminação do solo e de corpos hídricos.<sup>24</sup> Já as fossas ecológicas operam com processos naturais de separação e estabilização dos resíduos, reduzindo a carga poluente e permitindo, em alguns casos, o aproveitamento seguro de subprodutos.

Adicionalmente, é importante refletir sobre o papel do novo marco legal do saneamento (Lei nº 14.026/2020). A ênfase na atração da iniciativa privada para o setor, embora prometa investimentos, levanta preocupações significativas sobre a capacidade de atendimento às áreas mais vulneráveis, onde o retorno financeiro é menos atrativo.<sup>25</sup> A universalização do saneamento, sob essa ótica, corre o risco de se tornar uma meta inatingível para as populações mais marginalizadas, perpetuando as iniquidades em saúde e aprofundando a segregação socioespacial.<sup>26</sup> Este cenário exige uma vigilância constante e a defesa de políticas públicas que priorizem o direito social acima do lucro, garantindo que o saneamento seja um instrumento de justiça e equidade, e não de aprofundamento das desigualdades.

## Conclusões

A resenha crítica do trabalho de A. E. Arruda e L. Heller sobre o acesso à água e esgotos em ocupações urbanas na RMBH reforça a premissa de que o saneamento básico vai além da mera provisão de infraestrutura, configurando-se como um direito humano fundamental e um potente determinante social da saúde e da qualidade de vida.

A análise detalhada da Ocupação Vitória revela que a informalidade urbana não é apenas uma questão de irregularidade fundiária, mas um complexo fenômeno que gera vulnerabilidades multifacetadas, o que impacta diretamente a saúde física e mental, as relações de gênero e a capacidade de desenvolvimento socioeconômico das comunidades.<sup>27</sup> A ausência de serviços adequados força os moradores a estratégias de sobrevivência que, embora demonstrem resiliência, os expõem a riscos sanitários e ambientais inaceitáveis.

Uma das conclusões mais contundentes é a necessidade urgente de uma abordagem integrada e socialmente justa para as políticas de saneamento. A mera expansão da rede formal, sem considerar as especificidades e a participação ativa das comunidades informais, pode perpetuar a exclusão e aprofundar as iniquidades. O estudo destaca a importância de reconhecer as práticas culturais e identitárias dos moradores, como a produção agroecológica em quintais, e de integrar essas dimensões nas soluções propostas. Além disso, a vulnerabilidade das mulheres e crianças, que carregam o maior ônus da falta de saneamento, clama por políticas sensíveis ao gênero que promovam a equidade e o empoderamento dessas populações.

Em última análise, a resenha sublinha que a universalização do saneamento no Brasil não será alcançada sem uma profunda revisão do modelo de desenvolvimento urbano e das políticas públicas. O novo marco legal do saneamento, ao privilegiar a lógica de mercado, levanta sérias preocupações sobre a capacidade de atendimento às áreas mais vulneráveis, onde o retorno financeiro é menos atrativo. É importante que o Estado reassuma seu papel de garantidor de direitos, investindo em soluções que considerem as particularidades de cada território e promovam a participação social como princípio estruturante. Somente assim será possível transformar a realidade de milhões de brasileiros, garantindo-lhes o direito à cidade, à saúde e à dignidade. A pesquisa de A. E. Arruda e L. Heller serve como um poderoso lembrete de que a luta pelo saneamento é, intrinsecamente, uma luta por justiça social.

## 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. E. Maricato, Urbanismo na periferia do mundo globalizado: metrópoles brasileiras, *São Paulo Perspec.*, 2000, **14**, 21-33.
2. S. B. Sorenson, C. Morssink e P. A. Campos, Safe access to safe water in low income countries: water fetching in current times, *Soc. Sci. Med.*, 2011, **72**, 1522-1526.
3. A. E. Arruda e L. Heller, Acesso à água e esgotos em ocupação urbana na Região Metropolitana de Belo Horizonte: efeitos na saúde, qualidade de vida e relações de gênero, *Physis: Rev. Saúde Coletiva*, 2022, **32**, e320204.
4. R. R. Bittencourt, D. M. Nascimento e F. F. Goulart, Ocupações urbanas na região metropolitana de Belo Horizonte, *Práxis*, Belo Horizonte, 2016.
5. M. C. S. Minayo, Amostragem e saturação em pesquisa qualitativa: consensos e controvérsias, *Rev. Pesqui. Qualitativa*, 2017, **5**, 1-12.
6. M. Agier, Do direito à cidade ao fazer-cidade. O antropólogo, a margem e o centro, *Mana*, 2015, **21**, 483-498.

7. J. Van Velsen, Análise situacional e o método de estudo de caso detalhado, em *Antropologia das sociedades contemporâneas: método*, ed. B. Feldman-Bianco, Unesp, São Paulo, 1987, **11**, pp. 437-468.
8. R. Gomes, Análise de dados em pesquisas qualitativas, em *Pesquisa social: teoria método e criatividade*, ed. S. F. Deslandes et al., Vozes, Petrópolis, 2007, **7**, pp. 79-108.
9. P. M. Buss e A. Pellegrini Filho, Iniquidades em saúde no Brasil, nossa mais grave doença: comentários sobre o documento de referência e os trabalhos da Comissão Nacional sobre Determinantes Sociais da Saúde, *Cad. Saúde Pública*, 2006, **22**, 2005-2008.
10. N. B. Handam et al., Drinking water quality in Brazilian urban slums, *Rev. Ambient. Água*, 2020, **15**, e2532.
11. L. Heller, Relação entre saúde e saneamento na perspectiva do desenvolvimento, *Ciênc. Saúde Coletiva*, 1998, **3**, 73-84.
12. N. B. Handam et al., Drinking water quality in Brazilian urban slums, *Rev. Ambient. Água*, 2020, **15**, e2532.
13. R. B. Barata, Iniquidade e saúde: a determinação social do processo saúde-doença, *Rev. USP*, 2001, **51**, 138-145.
14. I. C. Johansen, R. L. Carmo e L. C. Alves, Desigualdade social intraurbana: implicações sobre a epidemia de dengue em Campinas, SP, em 2014, *Cad. Metrop.*, 2016, **18**, 421-440.
15. P. M. Buss, Promoção da saúde e qualidade de vida, *Ciênc. Saúde Coletiva*, 2000, **5**, 163-177.
16. M. C. S. Minayo, Z. M. A. Hartz e P. M. Buss, Qualidade de vida e saúde: um debate necessário, *Ciênc. Saúde Coletiva*, 2000, **5**, 7-18.
17. S. Silva, J. A. D. Lopes e L. Heller, The right to water: Impact on the quality of life of rural workers in a settlement of the Landless Workers Movement, Brazil, *PLoS ONE*, 2020, **15**, e0236281.
18. S. B. Sorenson, C. Morssink e P. A. Campos, Safe access to safe water in low income countries: water fetching in current times, *Soc. Sci. Med.*, 2011, **72**, 1522-1526.
19. K. C. Sahoo, K. R. Hulland e A. Caruso, Sanitation-related psychosocial stress: A grounded theory study of women across the life-course in Odisha, India, *Soc. Sci. Med.*, 2015, **13**, 80-89.
20. O. M. R. Campbell et al., Getting the basic rights the role of water, sanitation and hygiene in maternal and reproductive health: a conceptual framework, *Trop. Med. Int. Health*, 2015, **20**, 252-267.
21. PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, Relatório de acompanhamento dos objetivos de desenvolvimento sustentável de Belo Horizonte 2020, Belo Horizonte, 2020.
22. R. M. Oliveira e V. V. Valla, As condições e as experiências de vida de grupos populares no Rio de Janeiro: repensando a mobilização popular no controle do dengue, *Cad. Saúde Pública*, 2001, **17**, S77-S88.
23. R. Razzolini e W. M. R. Günther, Impactos na saúde das deficiências de acesso a água, *Saúde e Sociedade*, 2008, **17**, 21-32.
24. A. M. Aquino e R. L. Assis, Agricultura orgânica em áreas urbanas e periurbanas com base na agroecologia, *Ambiente. Soc.*, 2007, **10**, 137-150.
25. Luta por moradia: lei promove avanço na regularização das ocupações Izidora; cerca de 8 mil famílias vivem no local, *G1 Minas*, 22 de setembro de 2023, <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2023/09/22/luta-por-moradia-lei-promove-avanco-na-regularizacao-das-ocupacoes-izidora-cerca-de-8-mil-familias-vivem-no-local.ghtml>.
26. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 240

Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018,  
Brasília, 2019.

27. M. C. S. Minayo, Z. M. A. Hartz e P. M. Buss, Qualidade de vida e saúde: um debate necessário, *Ciênc. Saúde Coletiva*, 2000, **5**, 7-18.

 [protocolosemquimica@gmail.com](mailto:protocolosemquimica@gmail.com)

 [@protocolosemquimica](https://www.instagram.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.

