



APLICAÇÃO DE PROTEASES MICROBIANAS NO MANEJO ENZIMÁTICO DE RESÍDUOS RADIOGRÁFICOS PARA RECUPERAÇÃO DE PRATA

Rafael Franco Pires

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis Da
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)

Bruna Willig Kopplin

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis da
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) e bolsista da CAPES

Juliano Backes Scherer

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis da
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) e bolsista da CAPES

Rodrigo Almeida de Lima

Graduando do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da
Fronteira Sul (UFFS)

Daniel Joner Daroit

Professor Associado da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)

daniel.daroit@uffs.edu.br

1. Introdução

A demanda por tecnologias sustentáveis e eficientes tem impulsionado o uso de biocatalisadores na indústria e na remediação ambiental. Essa tendência acompanha o aumento da preocupação com os impactos ambientais gerados por processos industriais convencionais, especialmente aqueles que envolvem o uso de reagentes tóxicos ou a geração de resíduos perigosos contaminantes. A recuperação de metais nobres, como a prata, é um dos processos que mais geram preocupação nesse contexto, pois seu reaproveitamento tradicional costuma envolver substâncias químicas agressivas como cianeto ou hipoclorito, com risco de contaminação de recursos hídricos e do solo (Shankar; More; Laxman, 2010).

Estudos como os de Al-Abdalall e Al-Khaldi (2016) demonstraram que a prata contida em filmes radiográficos, associada a uma matriz de gelatina, pôde ser recuperada por meio de métodos enzimáticos, apresentando menor impacto ambiental em comparação aos processos convencionais utilizados para remoção da prata desses filmes radiográficos. Desta forma as proteases microbianas se destacam por sua eficiência catalítica, especificidade e possibilidade de reutilização nesse processo de separação da prata de filmes radiográficos (Moraes, 2025; Silva, 2024).



2. Metodologia

Trata-se de uma revisão narrativa (não exaustiva) de literatura, que buscou explorar a aplicação de proteases microbianas na recuperação de prata a partir de filmes radiográficos. A busca foi realizada na base de dados Scopus, Scielo e Biblioteca da Universidade Federal da Fronteira Sul, abrangendo publicações sem restrição de período, com a finalidade de mapear a literatura existente sobre o tema. Os descritores (keywords) utilizados, combinados com operadores booleanos, foram: “microbial proteases” AND ("silver recovery" OR "radiographic film" OR "x-ray film") AND ("degellatinization" OR "enzymatic hydrolysis").

3. Resultados e discussão

A pesquisa, conforme mencionado no trabalho de Moraes (2025), detalhou a notável capacidade da protease bruta de *Bacillus* sp. *CL14*, uma enzima obtida de forma eficiente utilizando subprodutos agroindustriais de baixo custo como fonte de nutrientes, a protease foi altamente eficaz na remoção da matriz orgânica gelatinosa de filmes radiográficos em um curto período de até 4 a 8 minutos, especialmente quando utilizada em sua forma concentrada. O uso da enzima ativa resultou em um desempenho mais eficaz do que o observado nos grupos controle. Ainda, a protease manteve sua funcionalidade por no mínimo cinco ciclos de reaplicação, demonstrando sua estabilidade e potencial de reutilização.

Os resultados demonstram a eficácia do processo e seu potencial para reaproveitamento, caracterizando uma abordagem sustentável para a recuperação de metais nobres, como a prata, que é tradicionalmente extraída por meio de técnicas prejudiciais ao ambiente. (Shankar; More; Laxman, 2010). A degradação da gelatina também foi correlacionada à forte capacidade hidrolítica da enzima, já comprovada em outros modelos, como a hidrólise de proteínas animais (Hoffmann, 2024).

Comparando com outros estudos, foi possível perceber que nem todas as proteases apresentaram o mesmo desempenho. A protease de *Bacillus cereus* estudada por Thomas et al. (2021), por exemplo, precisou de duas horas a 80 °C para remover toda a gelatina. Já a de *Bacillus brevis*, relatada por Qamar et al. (2020), atuou em 40



minutos a uma temperatura menor, de 40 °C. Outras enzimas conseguiram agir de forma mais rápida a de *Bacillus subtilis* A4 atuou em 15 minutos (Keshapaga et al., 2023), enquanto a de *Purpureocillium lilacinum* conseguiu remover a gelatina em apenas 6 minutos (Cavello et al., 2013). Mesmo com essas variações, a protease de *Bacillus* sp. CL14 foi uma das que apresentou os melhores resultados em termos de tempo e simplicidade de preparo.

Outro ponto importante observado foi o reuso da enzima. No estudo de Moraes (2025), a mesma protease foi reutilizada por cinco ciclos, mantendo sua atividade, embora o tempo necessário para remover a gelatina tenha aumentado a cada novo uso. Isso também foi observado por Hamza (2017), que relatou que uma enzima de *Bacillus* sp. levou 40 minutos para agir no primeiro ciclo e quase o triplo do tempo no quarto. De forma semelhante, Cavello et al. (2013) perceberam que a mesma protease foi menos eficiente nos últimos ciclos. Essa perda de desempenho pode ter sido causada por alterações na estrutura da enzima ou por acúmulo de substâncias geradas durante o processo, como explicaram Masui et al. (1999) e Shankar et al. (2010).

Além disso, Bhavikatti et al. (2020) destacaram o potencial de escalonamento da produção de enzimas bacterianas para aplicação industrial. Mahmood et al. (2022) ainda acrescentaram que estratégias de imobilização das proteases podem aumentar sua estabilidade e reutilização, ampliando a viabilidade de uso contínuo em processos sustentáveis. Bernardo et al. (2019) e Callegaro, Welter e Daroit (2018) também relataram o uso de resíduos animais como matéria-prima para produção de peptídeos com atividades antioxidante, antidiabética e anti-hipertensiva. Silva et al. (2024) reforçaram essa abordagem ao utilizar resíduos agroindustriais para produzir proteases em cultivo sólido, integrando sustentabilidade e biotecnologia.

4. Considerações finais:

O uso de proteases bacterianas como estratégia para a remoção da camada de gelatina de filmes radiográficos demonstrou-se uma abordagem eficiente, segura e



ambientalmente favorável. A aplicação enzimática não apenas substituiu o uso de reagentes químicos agressivos tradicionalmente empregados nesse tipo de processo, como também possibilitou a recuperação do suporte plástico (PET) e a reutilização da enzima por múltiplos ciclos. Esses resultados indicaram a viabilidade técnica do método, especialmente considerando a simplicidade das condições operacionais e a produção do biocatalisador a partir de resíduos agroindustriais de baixo custo.

O trabalho também reforçou a importância de integrar biotecnologia e sustentabilidade em propostas voltadas ao manejo de resíduos do setor de saúde. A atuação da enzima de *Bacillus* sp. CL14 destacou-se tanto pelo desempenho na degelatinização quanto pela versatilidade em aplicações com subprodutos de origem animal. Nesse contexto, futuras investigações poderão contribuir com a otimização da recuperação da prata liberada, o aperfeiçoamento do reaproveitamento de materiais e a adaptação do processo para escalas maiores, ampliando seu potencial de uso industrial e ambiental.

O uso da protease bacteriana como estratégia enzimática para remoção da camada de gelatina dos filmes radiográficos demonstrou viabilidade, sustentabilidade ambiental e economia de processo. O biocatalisador não apenas eliminou o uso de reagentes tóxicos, mas também possibilitou a reutilização da enzima, reforçando sua aplicabilidade industrial. Estudos futuros podem aprofundar o aproveitamento da prata liberada, bem como explorar o escalonamento do processo.

Referências

- AL-ABDALALL, A. H.; AL-KHALDI, E. M. Recovery of Silver from used X-Ray Film using alkaline protease from *Bacillus subtilis*. **African Journal of Biotechnology**, v. 15, n. 26, p. 1380–1388, 2016.
- BERNARDO, B. da S. *et al.* Co-production of proteases and bioactive protein hydrolysates from bioprocessing of feather meal. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, 2019.
- BHAVIKATTI, J. S. *et al.* Statistical optimisation of protease production using a freshwater bacterium *Chryseobacterium cucumeris* SARJS-2 for multiple industrial applications. **3 Biotech**, v. 10, Artigo 279, 2020.
- CALLEGARO, K.; WELTER, N.; DAROIT, D. J. Feathers as bioresource: Microbial conversion into bioactive protein hydrolysates. **Process Biochemistry**, v. 75, p. 1-9, 2018.
- CAVELLO, I. A. *et al.* Enzymatic hydrolysis of gelatin layers of X-ray films and release of silver particles using keratinolytic serine proteases from *Purpureocillium lilacinum* LPS # 876. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 23, p. 1133-1139, 2013.



HAMZA, T. A. Isolation of protease producing bacteria from soil for polyester and silver recovery from waste X-ray film. **American Journal of BioScience**, v. 5, p. 74-79, 2017.

HOFFMANN, R. G. et al. Enzymatic processing of animal by-products: production of antioxidant hydrolysates with *Bacillus* sp. CL18 crude protease. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 21, p. 26737–26746, 2024.

KESHAPAGA, U. R. et al. Characterization of high-yield *Bacillus subtilis* cysteine protease for diverse industrial applications. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 54, p. 739-752, 2023.

MAHMOOD, M. S. et al. Expression and immobilization of trypsin-like domain of serine protease from *Pseudomonas aeruginosa* for improved stability and catalytic activity. **Proteins**, v. 90, p. 1425-1433, 2022.

MASUI, A. et al. Feasibility study for decomposition of gelatin layers on X-ray films by thermostable alkaline protease from alkaliphilic *Bacillus* sp. **Biotechnology Techniques**, V. 13, p. 813-815, 1999.

MORAES, G. P. **Produção e aplicação da protease bruta de *Bacillus* sp. CL14: abordagens para a valorização de subprodutos agroindustriais e recuperação de prata**. 2025. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos)– Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2025.

QAMAR, S. A. et al. Immobilization of alkaline protease from *Bacillus brevis* using Ca-alginate entrapment strategy for improved catalytic stability, silver recovery, and dehairing potentialities. **Catalysis Letters**, v. 150, p. 3572-3583, 2020.

SHANKAR, S.; MORE, S. V.; LAXMAN, R. S. Recovery of Silver from Waste X-Ray Film by Alkaline Protease from *Conidiobolus coronatus*. **Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology**, v. 6, n. 1, p. 60–69, 2010.

SILVA, C. B. et al. Production of bacterial protease via solid-state cultivation with agro-industrial by-products and eco-friendly perspectives of enzyme application. **Clean Technologies and Environmental Policy** (Internet), 2024.

THOMAS, N. N. et al. Isolation and characterization of a protease from *Bacillus* sp. **Materials Today: Proceedings**, v. 41, p. 685-691, 2021.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas bolsas de mestrado (DS-CAPES) concedidas a B. W. Kopplin e J. B. Scherer. À UFFS, pelo auxílio financeiro (PES-2023-0080).