



Processos Promissores e Sustentáveis na Reciclagem de Tereftalato de polietileno (PET) por Enzimas Microbianas

Promising and Sustainable Processes in the Recycling of Materials Using Microbial Enzymes

Gabriela Oliveira da Silva

Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Recife-PE, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7430-5861>

Mariana da Silva Calado Lourenço

Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Recife-PE, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4169-5238>

Bruna Glória Alves Dantas

Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Recife-PE, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4650-7945>

Jessica de Oliveira Rocha

Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Recife-PE, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7430-5861>

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Escola de Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco-UNICAP, Universidade de Pernambuco- UPE. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0842-779X>

Galba Maria de Campos-Takaki

Escola de Tecnologia e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais- CEMACBIOS, MCTI/ Universidade Católica de Pernambuco -UNICAP. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Resumo: A poluição por plásticos constitui um problema ambiental global que demanda soluções sustentáveis baseadas na economia circular, com destaque para o politereftalato de etileno (PET), amplamente utilizado e de baixa biodegradabilidade, o que favorece o acúmulo no ambiente. Os métodos convencionais de reciclagem, especialmente o mecânico, apresentam limitações como degradação do material e presença de contaminantes, incentivando o desenvolvimento de alternativas mais eficientes. Nesse contexto, processos biotecnológicos baseados em enzimas microbianas destacam-se por promoverem a degradação do PET em condições mais brandas, eficientes, com menor consumo energético e possibilidade de conversão em monômeros reutilizáveis, como ácido tereftálico e etilenoglicol. Enzimas como PETases e cutinases apresentam potencial de hidrolisar ligações éster do polímero, embora a elevada cristalinidade da estrutura aromática e a baixa mobilidade das cadeias dificultem a ação enzimática, exigindo pré-tratamentos e otimização das condições reacionais. A eficiência desses processos é influenciada por fatores como área superficial e presença de aditivos. Além disso, a integração entre processos mecânicos, químicos e biológicos amplia a eficiência da reciclagem, permitindo maior recuperação de materiais e redução de impactos ambientais. A sustentabilidade dessas abordagens depende ainda de aspectos como logística, avaliação do ciclo de vida e regulamentações que garantam segurança e qualidade dos materiais reciclados. Dessa forma, o uso de enzimas microbianas configura-se como uma alternativa promissora para a reciclagem sustentável de polímeros, contribuindo para o avanço da economia circular e da redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: reciclagem; biocatalisador; PET; sustentabilidade; biodegradação .

Abstract: Plastic pollution constitutes a global environmental problem that demands sustainable solutions based on the circular economy, with emphasis on polyethylene terephthalate (PET), which is widely used and has low biodegradability, favoring its accumulation in the environment. Conventional recycling methods, especially mechanical recycling, present limitations such as material degradation and the presence of contaminants, encouraging the development of more efficient alternatives. In this context, biotechnological processes based on microbial enzymes stand out because they promote PET degradation under milder and more efficient conditions, with lower energy consumption and the possibility of conversion into reusable monomers, such as terephthalic acid and ethylene glycol. Enzymes such as PETases and cutinases have the potential to hydrolyze the ester bonds of the polymer, although the high crystallinity of the aromatic structure and the low mobility of the chains hinder enzymatic action, requiring pretreatments and optimization of reaction conditions. The efficiency of these processes is influenced by factors such as surface area and the presence of additives. In addition, the integration of mechanical, chemical, and biological processes increases recycling efficiency, allowing greater material recovery and reduced environmental impacts. The sustainability of these approaches also depends on aspects such as logistics, life cycle assessment, and regulations that ensure the safety and quality of recycled materials. Thus, the use of microbial enzymes represents a promising alternative for the sustainable recycling of polymers, contributing to the advancement of the circular economy and the reduction of environmental impacts.

Keywords: recycling; biocatalyst; PET; sustainability; biodegradation.

INTRODUÇÃO

A poluição marinha por plásticos tem se consolidado como uma das mais graves problemáticas ambientais da atualidade, assumindo dimensões globais e exigindo respostas coordenadas entre países, setores produtivos e a comunidade científica. Nesse contexto, as discussões em torno de um acordo global juridicamente vinculante para o enfrentamento da poluição plástica evidenciam a urgência de soluções estruturais e sustentáveis, capazes de atuar desde a produção até a destinação final dos materiais (Fernandes, 2024).

A intensificação da produção de materiais poliméricos, em especial as embalagens plásticas como o tereftalato de polietileno (PET), tem consolidado esses materiais como elementos indispensáveis à dinâmica econômica contemporânea. Contudo, o avanço tem sido acompanhado por desafios significativos relacionados à gestão de resíduos, sobretudo em países em desenvolvimento como o Brasil, onde a cadeia de reciclagem ainda apresenta limitações estruturais, tecnológicas e sociais. Nesse contexto, a economia circular emerge como uma estratégia essencial para promover a sustentabilidade, ao integrar aspectos ambientais, econômicos e sociais na gestão de materiais pós-consumo (Guerra *et al.*, 2025).

A economia circular propõe a manutenção dos materiais em ciclos produtivos pelo maior tempo possível, reduzindo a extração de recursos naturais e minimizando a geração de resíduos. A reciclagem de embalagens plásticas, especialmente o

PET, assume, portanto, papel estratégico, não apenas pelo seu elevado volume de consumo, mas também pelo potencial de reinserção em cadeias produtivas. Entretanto, os métodos convencionais de reciclagem, como os processos mecânicos, apresentam limitações relacionadas à degradação da qualidade do material e à presença de contaminantes, comprometendo a eficiência e a sustentabilidade do sistema (Guerra *et al.*, 2025; Dos Santos *et al.*, 2026).

Diante dessas limitações, abordagens inovadoras baseadas na biotecnologia verde têm ganhado destaque, especialmente aquelas que envolvem o uso de microrganismos e enzimas na degradação e transformação de polímeros. As enzimas microbianas atuam como biocatalisadores com elevada especificidade, capazes de promover a quebra de cadeias poliméricas complexas em condições mais brandas de temperatura e pressão, reduzindo o consumo energético e os impactos ambientais. Além disso, esses processos possibilitam a conversão de resíduos plásticos em produtos de maior valor agregado, alinhando-se aos princípios da economia circular (Do Nascimento *et al.*, 2026; Intasian *et al.*, 2021).

A degradação biológica de plásticos, embora promissora, envolve desafios significativos, como a recalcitrância estrutural dos polímeros sintéticos, a necessidade de pré-tratamentos para aumentar a acessibilidade do substrato e a eficiência limitada de algumas enzimas em condições industriais. Avanços recentes vêm sendo observados na identificação de novas enzimas, no desenvolvimento de consórcios microbianos e na aplicação de técnicas de engenharia metabólica e enzimática, ampliando o potencial desses processos para aplicações em larga escala (Tamoore *et al.*, 2021; Oyewole *et al.*, 2022; Barbassa *et al.*, 2024).

O desenvolvimento de biopolímeros e materiais compostáveis tem contribuído para a diversificação das estratégias sustentáveis, promovendo alternativas que facilitam a biodegradação e a reintegração dos materiais ao meio ambiente ou aos ciclos produtivos (Dos Santos *et al.*, 2026). No entanto, a efetividade dessas soluções depende da integração entre inovação tecnológica, políticas públicas e conscientização social, especialmente no que se refere à coleta seletiva, logística reversa e valorização dos agentes envolvidos na cadeia da reciclagem.

Portanto, os processos baseados no uso de enzimas microbianas configuram-se como uma alternativa promissora e estratégica para a reciclagem sustentável de materiais, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais dos resíduos plásticos e para a consolidação de uma economia circular mais eficiente. Nesse contexto, abordagens serão conduzidas destacando: (i) Caracterização do tereftalato de polietileno (PET); (ii) O desafio da poluição plástica; (iii) Estrutura do PET; (iv) Enzimas microbianas; (v) Processos biotecnológicos; (vi) Integração de processos; (vii) Avaliação de sustentabilidade; (viii) Aspectos regulatórios; (ix) Economia circular; e (x) Perspectivas futuras.

METODOLOGIA

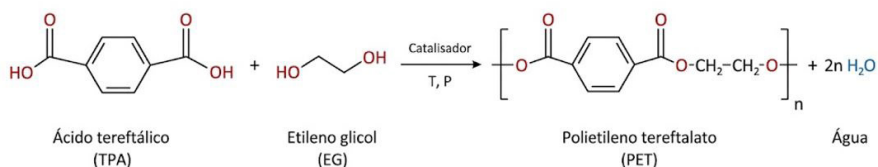
A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo exploratório, de abordagem qualitativa, desenvolvido por meio de revisão bibliográfica. A coleta de dados foi realizada em bases acadêmicas como Google Acadêmico, Web of Science, Scopus e SciELO, considerando publicações no período de 2021 a 2026.

A análise dos dados foi conduzida de forma interpretativa e descritiva, buscando identificar avanços, limitações e tendências tecnológicas na área estudada, permitindo a construção de uma visão integrada e fundamentada sobre o estado da arte do tema.

Caracterização do Polietileno Tereftalato (PET) como Material-Alvo na Reciclagem

O polietileno tereftalato (PET) é um poliéster termoplástico largamente utilizado e considerado um dos principais materiais no foco da reciclagem enzimática, devido à sua característica de baixa biodegradabilidade e ao grande volume globalmente produzido (Nisticò, R., 2020). Trata-se de um polímero sintético derivado de fontes petroquímicas, formado pela reação de policondensação entre o etilenglicol semicristalino (EG) e o ácido tereftálico (TPA) (Figura 1), resultando em cadeias lineares unidas por ligações éster (Taniguchi *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2023).

Figura 1 – Síntese do PET a partir do ácido tereftálico (TPA) e etileno glicol (EG).



Fonte: Autoria própria (2026).

No que se refere à estrutura, o PET é classificado como um poliéster semicristalino, apresentando regiões cristalinas e amorfas. A presença simultânea de regiões cristalinas e amorfas é determinante para suas propriedades físico-químicas e também para sua suscetibilidade à degradação. A fase cristalina do polímero confere elevada resistência mecânica e estabilidade térmica, enquanto a fase amorfa apresenta maior acessibilidade a agentes químicos e biológicos, incluindo enzimas (Wei; Zimmermann, 2017; Sonnendecker *et al.*, 2022).

A temperatura de transição vítrea (T_g) do PET situa-se em torno de 65–80 °C, enquanto sua temperatura de fusão varia entre 250–280 °C, o que evidencia a elevada estabilidade térmica, favorecendo ampla aplicação em diversos produtos, especialmente em embalagens plásticas. Esse comportamento está diretamente ligado à presença de estruturas aromáticas rígidas na cadeia polimérica, provenientes do ácido tereftálico (Zhu *et al.*, 2023).

A estrutura química do PET é caracterizada por uma cadeia principal aromática interligada por grupos éster, o que confere ao material elevada resistência química e baixa biodegradabilidade (Wei; Zimmermann, 2017). Essa característica estrutural dificulta a ação de microrganismos e enzimas, contribuindo para sua persistência ambiental (Taniguchi *et al.*, 2019).

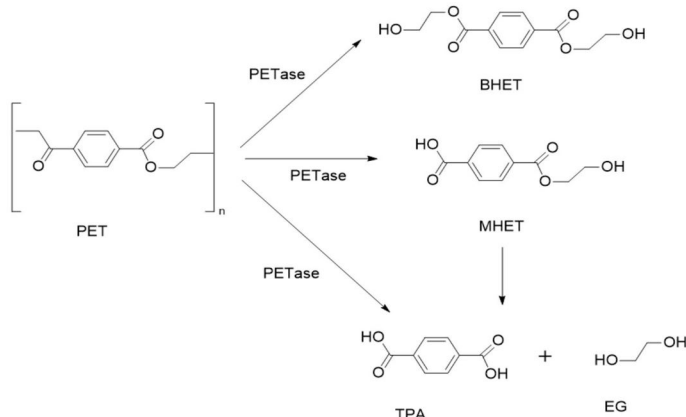
Nesse cenário, processos químicos e enzimáticos têm sido amplamente discutidos como alternativas eficientes e sustentáveis à reciclagem mecânica convencional (Clark; Shaver, 2023).

Propriedades do Polietileno Tereftalato (PET) e Influência na Reciclabilidade

No contexto da reciclagem enzimática, a estrutura do PET representa um desafio significativo. A elevada cristalinidade limita o acesso das enzimas às cadeias poliméricas, restringindo a hidrólise principalmente às regiões amorfas. Além disso, a baixa mobilidade das cadeias poliméricas em temperaturas inferiores à T_g reduz a eficiência catalítica (Sonnendecker *et al.*, 2022).

Avanços recentes têm demonstrado que enzimas como PETases e cutinases são capazes de hidrolisar o PET, promovendo a clivagem das ligações éster e gerando monômeros como TPA e EG, passíveis de reutilização em novos ciclos produtivos (Austin *et al.*, 2018; Tournier *et al.*, 2020), conforme ilustrado na Figura 2. Estudos de engenharia enzimática têm ampliado significativamente a eficiência desses biocatalisadores, aproximando a viabilidade industrial do processo (Lu *et al.*, 2022).

Figura 2 – Esquema representativo da degradação enzimática do poli(tereftalato de etileno) (PET), evidenciando a formação de intermediários como BHET e MHET e a geração final de TPA e EG.



Fonte: Adaptado de Austin *et al.* (2018) e Tournier *et al.* (2020).

Além disso, fatores como o grau de cristalinidade, a área superficial e a presença de aditivos influenciam diretamente a eficiência da degradação enzimática.

Dentre esses aditivos, destacam-se as poliamidas, como o nylon, amplamente utilizadas em garrafas de PET devido à sua elevada eficiência como barreira ao oxigênio (Ahmadi *et al.*, 2021). Adicionalmente, estratégias de pré-tratamento, como a redução da cristalinidade e a modificação da superfície do material, têm sido amplamente investigadas com o objetivo de aumentar a taxa de conversão enzimática (Zhu *et al.*, 2023).

Dessa forma, a caracterização detalhada do PET, incluindo composição química, morfologia, propriedades térmicas e estruturais, é essencial para o desenvolvimento de processos sustentáveis baseados em enzimas microbianas, permitindo a otimização tanto dos biocatalisadores quanto das condições operacionais.

Enzimas Microbianas Aplicadas à Degradação de Materiais Poliméricos com Ênfase no PET

O campo da biotecnologia voltado para a sustentabilidade ambiental tem avançado significativamente através do desenvolvimento de processos enzimáticos para a reciclagem de polímeros sintéticos, superando as limitações dos métodos mecânicos e químicos tradicionais (Acosta e Alper, 2023). As enzimas são macromoléculas proteicas que atuam como biocatalisadores altamente especializados, capazes de reduzir a energia de ativação de reações químicas sob condições brandas de temperatura e pH (Aguiar, 2023). A obtenção desses catalisadores ocorre majoritariamente por meio de microrganismos, como bactérias e fungos, que podem ser explorados tanto em sua forma selvagem quanto otimizados via engenharia genética para produção em larga escala (Bucioli, 2024).

A aplicação dessas enzimas na degradação de materiais como o polietileno tereftalato (PET) é um dos pilares da economia circular moderna (Tournier *et al.*, 2023). O PET, embora seja um poliéster com ligações éster teoricamente hidrolisáveis, apresenta alta recalcitrância devido à sua elevada massa molecular, hidrofobicidade e organização estrutural semicristalina (Liu *et al.*, 2022; Bucioli, 2024). No entanto, a descoberta de hidrolases bacterianas e fúngicas capazes de realizar a despolimerização biológica abriu caminho para a recuperação de monômeros de alta pureza que podem ser reinseridos na produção de novos plásticos sem perda de qualidade (Sonnendecker *et al.*, 2022; Acosta e Alper, 2023).

Dentre as enzimas identificadas, as cutinases surgem como os biocatalisadores mais eficientes para a clivagem do PET (Anbalagan *et al.*, 2022). A cutinase é uma enzima hidrolítica (EC 3.1.1.74) produzida por fungos e bactérias. O mecanismo de ação dessas enzimas envolve uma tríade catalítica altamente conservada, onde a serina realiza o ataque nucleofílico ao carbono da ligação éster do polímero (Liu *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2024). Estudos de mecânica quântica e molecular indicam que a eficiência de hidrolases como a PETase reside na conformação do sítio ativo e na interação de pontes de hidrogênio, permitindo superar barreiras energéticas específicas na degradação do polímero (Aboelnga e Kalyanamoorthy, 2022). A PETase é uma hidrolase capaz de degradar o plástico tereftalato de polietileno (PET),

fragmentando-o em monômeros pela bactéria *Ideonella sakaiensis*, descoberta em 2016, no Japão, pelo grupo de pesquisadores: Shosuke Yoshida (Kyoto Institute of Technology), Kohei Oda (Kyoto Institute of Technology) e Kenji Miyamoto (Keio University).

A Leaf-Branch Compost Cutinase (LCC), isolada de um metagenoma de compostagem vegetal por Sulaiman *et al.* (2012), é considerada a enzima de referência para aplicações industriais devido à sua robustez térmica (Sulaiman *et al.*, 2012). A importância da LCC foi potencializada pelo desenvolvimento da variante LCC-ICCG, que através do design racional e da mutagênese de sítio-alvo, alcançou a capacidade de degradar 90% de resíduos de PET em menos de 10 horas a 72 °C (Tournier *et al.*, 2020).

Na atualidade, o avanço tecnológico sugere o uso de plataformas de triagem de alto rendimento (high-throughput screening) e evolução direcionada para criar variantes ainda mais estáveis e tolerantes à inibição por produtos (Groseclose *et al.*, 2024). Além da reciclagem em “ciclo fechado”, a biotecnologia enzimática permite o upcycling, onde os produtos da degradação do PET são convertidos em compostos de maior valor agregado (Acosta e Alper, 2023; Costa e Baú, 2025). Portanto, a integração de engenharia de proteínas com processos de biorremediação representa a estratégia mais promissora para mitigar a crise global da poluição por plásticos de forma sustentável (Acosta e Alper, 2023).

Processos Biotecnológicos Aplicados à Biodegradação de Materiais Poliméricos

Os processos biotecnológicos aplicados à biodegradação de materiais poliméricos têm se consolidado como uma alternativa promissora frente às limitações dos métodos convencionais de reciclagem. Esses processos utilizam microrganismos, enzimas e metabólitos bioativos para promover a quebra de cadeias poliméricas complexas, resultando em compostos de menor massa molecular ou até em sua mineralização completa. Essa abordagem apresenta vantagens como menor impacto ambiental, menor consumo energético e maior especificidade na degradação de determinados polímeros.

A degradação microbiana de polímeros ocorre por meio da ação de bactérias e fungos capazes de colonizar superfícies poliméricas e secretar enzimas extracelulares. Segundo Mohan *et al.* (2011), esse processo envolve etapas como adesão microbiana, formação de biofilmes, secreção enzimática e assimilação dos produtos gerados. No caso de polímeros sintéticos, como o polietileno tereftalato (PET), a resistência estrutural e a alta cristalinidade dificultam a biodegradação, exigindo condições específicas ou pré-tratamentos para aumentar a acessibilidade do substrato.

Nesse contexto, estudos recentes têm destacado o papel de enzimas específicas, como cutinases, esterases e PETases, capazes de hidrolisar ligações éster presentes em polímeros como o PET. García (2022) e Oda e Wlodawer (2024) demonstram avanços no desenvolvimento de processos enzimáticos para

reciclagem desse material, incluindo a otimização de enzimas para atuação em condições industriais, como temperaturas elevadas e diferentes faixas de pH. Esses processos permitem a recuperação de monômeros de alta pureza, possibilitando a reinserção do material na cadeia produtiva.

Além disso, revisões sistemáticas, como a de Benavides Fernández *et al.* (2022), evidenciam a diversidade de microrganismos com potencial degradador de polímeros, incluindo bactérias dos gêneros *Ideonella* e *Pseudomonas*, bem como fungos filamentosos. Priya, Dutta e Daverey (2022) complementam que comunidades microbianas consorciadas apresentam maior eficiência na degradação, devido à atuação sinérgica de diferentes espécies e enzimas.

Outro aspecto relevante é o uso de biossurfactantes no aumento da biodisponibilidade de compostos hidrofóbicos. Maciel *et al.* (2024) demonstraram que biossurfactantes produzidos por *Curvularia lunata* podem auxiliar na descontaminação de solos com óleo automotivo, indicando potencial aplicação em processos de biodegradação de resíduos poliméricos contaminados, ao facilitar o acesso dos microrganismos aos substratos.

Paralelamente, o desenvolvimento de materiais biodegradáveis, como filmes à base de amido de mandioca e resíduos agroindustriais, representa uma estratégia complementar à biodegradação. Do Nascimento *et al.* (2026) destacam que a formulação desses materiais influencia diretamente suas propriedades mecânicas e sua solubilidade em água, fatores que impactam sua degradação no ambiente.

Dessa forma, os processos biotecnológicos aplicados à biodegradação de materiais poliméricos abrangem desde a utilização de microrganismos e enzimas específicas até o desenvolvimento de novos materiais com maior suscetibilidade à degradação. Embora ainda existam desafios relacionados à escalabilidade, eficiência e custos, os avanços recentes indicam um caminho promissor para a integração dessas tecnologias em sistemas sustentáveis de gestão de resíduos, alinhados aos princípios da economia circular.

Integração de Processos Mecânicos, Químicos e Biológicos na Reciclagem de Polímeros

A integração de processos mecânicos, químicos e biológicos na reciclagem representa uma estratégia promissora para aumentar a eficiência da recuperação de materiais, especialmente no caso dos polímeros. Essa abordagem combina diferentes tecnologias com o objetivo de superar limitações individuais de cada método, como perda de qualidade do material, presença de contaminantes, baixa seletividade e dificuldade de degradação de polímeros mais resistentes.

A reciclagem mecânica é uma das rotas mais utilizadas industrialmente, envolvendo etapas como triagem, lavagem, moagem, separação, extrusão e reprocessamento. No caso do PET, Bezeraj *et al.* (2025) destacam que a eficiência desse processo depende diretamente da qualidade do material de entrada, pois contaminantes, misturas poliméricas, resíduos orgânicos e aditivos podem comprometer as propriedades finais do produto reciclado. Assim, embora seja

uma alternativa consolidada e economicamente viável, a reciclagem mecânica exige controle rigoroso da matéria-prima e tecnologias adequadas de separação e descontaminação.

Os processos químicos, por sua vez, permitem a conversão dos polímeros em monômeros, oligômeros ou outros compostos de interesse, possibilitando maior recuperação de valor quando comparados à simples transformação física do material. Esses processos podem incluir hidrólise, glicólise, metanólise, pirólise e solvolise, sendo especialmente importantes para resíduos plásticos contaminados, mistos ou degradados, que apresentam baixa viabilidade para reciclagem mecânica. A etapa química pode atuar como complemento ao processamento mecânico, promovendo a quebra controlada das cadeias poliméricas e favorecendo a obtenção de matérias-primas secundárias.

A incorporação de processos biológicos amplia ainda mais as possibilidades de reciclagem sustentável. Esses processos utilizam microrganismos, enzimas ou metabólitos biológicos capazes de atuar na degradação, transformação ou recuperação de compostos presentes nos resíduos. Gomes *et al.* (2013) demonstram a relevância das cutinases heterólogas produzidas por *E. coli* e de formulações enzimáticas aprimoradas para aplicação na degradação de plásticos, evidenciando o potencial das enzimas como agentes específicos e ambientalmente mais seguros para romper ligações químicas presentes em determinados polímeros.

Nesse contexto, estratégias para aprimorar a biodegradação de plásticos têm sido amplamente investigadas. Crystal Thew *et al.* (2024) ressaltam que a eficiência dos processos biológicos pode ser ampliada por meio de pré-tratamentos físicos e químicos, modificação de superfícies, aumento da área de contato, seleção de microrganismos eficientes e otimização das condições de reação. Dessa forma, a integração entre métodos torna-se essencial, pois o tratamento mecânico pode reduzir o tamanho das partículas, o tratamento químico pode alterar a estrutura superficial do polímero, e o tratamento biológico pode promover a degradação seletiva ou complementar do material.

Além dos polímeros, a integração de processos também se mostra relevante na recuperação de metais presentes em resíduos complexos, como placas de circuito impresso. Dino da Silva *et al.* (2026) abordam a biolixiviação de cobre por *Aspergillus tubingensis* UCP 1208 como alternativa sustentável, demonstrando que processos biológicos podem ser associados à recuperação de materiais de alto valor agregado. Esse exemplo reforça que a reciclagem integrada não se limita aos plásticos, podendo ser aplicada a diferentes fluxos de resíduos, especialmente aqueles com composição heterogênea.

A avaliação da eficiência desses processos requer métodos analíticos adequados para monitorar a degradação e a transformação dos materiais. Van der Zee (2011) destaca a importância de técnicas de acompanhamento da biodegradação de polímeros ambientalmente degradáveis, permitindo verificar perda de massa, alterações químicas, mineralização, produção de dióxido de carbono e modificações nas propriedades físicas. Esses métodos são fundamentais

para comprovar a efetividade dos processos integrados e garantir a segurança ambiental dos produtos gerados.

Portanto, a integração de processos mecânicos, químicos e biológicos na reciclagem permite uma abordagem mais completa e sustentável para o tratamento de resíduos. A combinação dessas rotas possibilita melhorar a qualidade do material reciclado, ampliar a recuperação de recursos, reduzir impactos ambientais e favorecer a economia circular. Contudo, sua aplicação exige planejamento técnico, controle de contaminantes, avaliação econômica e monitoramento ambiental, garantindo que a reciclagem integrada seja eficiente, segura e compatível com as demandas industriais e ambientais contemporâneas.

Avaliação da Sustentabilidade dos Processos de Reciclagem de Polietileno Tereftalato (PET)

A transição de um modelo econômico linear para uma economia circular é imperativa para mitigar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado do polietileno tereftalato (PET), material que pode levar até 800 anos para se decompor (VAZ JÚNIOR, 2024). A avaliação da sustentabilidade dos processos de reciclagem fundamenta-se primordialmente na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), técnica normatizada pela ISO 14044 que permite quantificar os impactos ambientais desde a extração da matéria-prima até a disposição final (Santos, 2022).

Complementarmente, a Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) busca uma visão transdisciplinar ao integrar dimensões sociais e econômicas ao desempenho ambiental (Martins e Bortoleto, 2024). Entre as rotas tecnológicas, a reciclagem mecânica permanece como a mais consolidada, apresentando reduções significativas no consumo de energia, que podem chegar a 70% ou 85% em relação à produção de resina virgem, além de mitigar substancialmente a emissão de gases de efeito estufa (Uekert *et al.*, 2023; Paula *et al.*, 2025).

Entretanto, a sustentabilidade desse processo enfrenta limitações ligadas à degradação térmica e mecânica do polímero a cada ciclo, fenômeno conhecido como *downcycling*, o que exige o uso de tecnologias “super-clean” para garantir a segurança no contato com alimentos (Pinter *et al.*, 2021). Diante desses desafios, a reciclagem química, que engloba rotas como glicólise e metanólise, surge como uma alternativa capaz de recuperar monômeros de alta pureza, permitindo que resíduos contaminados retornem à cadeia produtiva com qualidade equivalente ao material virgem (Vaz Júnior, 2024; Paula *et al.*, 2025).

Especificamente, a glicólise tem demonstrado o melhor desempenho econômico e ambiental entre as tecnologias químicas, com um potencial de aquecimento global de apenas 4,3 kg CO₂-eq/kg de PET reciclado (Uekert *et al.*, 2023; Paula *et al.*, 2025). Adicionalmente, rotas inovadoras como a reciclagem enzimática via hidrolases destacam-se pela alta seletividade, podendo reduzir a energia da cadeia de suprimentos em até 83%, enquanto a integração com a manufatura aditiva (impressão 3D) representa uma estratégia de upcycling que reduz os impactos ambientais em cerca de 12% ao substituir a resina virgem (Singh

et al., 2021; Teles *et al.*, 2025). A análise de emergência também revela que o uso de material reciclado reduz significativamente o suporte ambiental necessário em todas as etapas da cadeia produtiva (Bustamante *et al.*, 2022). No entanto, a sustentabilidade global do sistema é fortemente influenciada pela logística; estudos indicam que a coleta ineficiente e o transporte de longa distância podem comprometer os ganhos ambientais, evidenciando que a otimização dos circuitos de coleta e o aumento da taxa de adesão da população — atualmente em apenas 13% no contexto do Distrito Federal — são cruciais para viabilizar a circularidade (Santos, 2022).

Portanto, a sustentabilidade efetiva depende da sinergia entre processos tecnológicos avançados, como a pirólise e a dissolução em solventes de base biológica, e políticas públicas que incentivem modelos preventivos, como o uso de garrafas retornáveis, que podem reduzir em até 80% os impactos climáticos (Santos, 2022; Chaudhari *et al.*, 2023).

Aspectos Regulatórios e de Biossegurança na Reciclagem de Materiais

Os aspectos regulatórios e de biossegurança na reciclagem de materiais são fundamentais para garantir que os processos de reaproveitamento ocorram de forma segura, sustentável e em conformidade com as exigências legais. No caso dos materiais poliméricos, especialmente aqueles provenientes de embalagens plásticas alimentícias, a legislação assume papel essencial, pois esses resíduos podem conter contaminantes químicos, biológicos ou resíduos de uso anterior que comprometem sua reutilização, principalmente quando destinados ao contato com alimentos.

A reciclagem de embalagens plásticas alimentícias exige controle rigoroso quanto à origem do material, rastreabilidade, eficiência dos processos de descontaminação e comprovação da segurança do produto reciclado. Conforme Silva e Paiva (2023), as legislações vigentes impactam diretamente a cadeia de reciclagem, pois estabelecem critérios técnicos para assegurar que o material reciclado não ofereça riscos à saúde humana nem ao meio ambiente. Dessa forma, a regulamentação contribui para a padronização dos processos e para a confiabilidade dos produtos obtidos a partir de resíduos plásticos.

No contexto dos biopolímeros e materiais sustentáveis, os marcos legais também são relevantes para orientar sua produção, aplicação e descarte. A adoção de matérias-primas renováveis e processos sustentáveis precisa estar alinhada às normas ambientais e sanitárias, garantindo que a inovação tecnológica não resulte em novos riscos ecológicos ou à saúde pública. Assim, a legislação atua como instrumento de controle e incentivo à economia circular, ao mesmo tempo em que estabelece limites para o uso seguro desses materiais.

Além disso, materiais reciclados destinados a aplicações sensíveis, como embalagens para contato com alimentos, devem passar por tecnologias eficientes de descontaminação. Sepúlveda-Carter *et al.* (2025) destacam que os regulamentos

aplicáveis ao poliestireno reciclado para contato alimentar exigem avaliação criteriosa das tecnologias empregadas, considerando a remoção de contaminantes e a segurança do material final. Esse controle é essencial para evitar migração de substâncias indesejáveis para os alimentos.

No âmbito da biossegurança, Yu *et al.* (2022) apontam a importância do desenvolvimento de materiais e processos capazes de reduzir riscos biológicos e químicos. Na reciclagem, isso envolve medidas de controle durante a coleta, triagem, processamento e transformação dos resíduos, prevenindo exposição ocupacional, contaminação cruzada e dispersão de agentes nocivos. Quando há uso de processos biotecnológicos, como enzimas ou microrganismos, torna-se indispensável avaliar a estabilidade, a segurança e os possíveis impactos ambientais desses agentes

Os materiais avançados, como compósitos sustentáveis, bionanocompósitos e nanomateriais, também exigem atenção regulatória específica. Srivastava (2026) e Chand *et al.* (2025) ressaltam que esses materiais apresentam grande potencial para reduzir impactos ambientais, porém demandam normas claras relacionadas à fabricação, aplicação, descarte, toxicidade, responsabilidade social e implicações éticas. Portanto, sua utilização deve ser acompanhada por avaliações de risco e padrões técnicos que assegurem proteção ambiental e segurança à saúde humana.

Assim, os aspectos regulatórios e de biossegurança constituem elementos indispensáveis para a consolidação de processos sustentáveis de reciclagem. Eles garantem que a recuperação de materiais, embora ambientalmente desejável, seja conduzida com controle técnico, responsabilidade sanitária e conformidade legal. Dessa forma, a reciclagem deixa de ser apenas uma estratégia de redução de resíduos e passa a integrar um modelo seguro de economia circular, no qual inovação, sustentabilidade e proteção à saúde caminham de forma conjunta.

Economia Circular do Polietileno Tereftalato (PET) na Reciclagem Sustentável

A economia circular aplicada ao polietileno tereftalato (PET) representa uma mudança paradigmática em relação ao modelo linear tradicional de produção e consumo, baseado em “extrair–produzir–descartar”. Nesse contexto, o PET, amplamente utilizado em embalagens, especialmente garrafas, destaca-se como um dos polímeros com maior potencial de inserção em cadeias produtivas, devido à sua reciclabilidade, estabilidade química e valor econômico agregado (Macedo *et al.*, 2020).

A transição para a economia circular no setor de plásticos envolve estratégias que visam prolongar o ciclo de vida dos materiais, reduzir a geração de resíduos e minimizar impactos ambientais. Conforme discutido por De Paula *et al.* (2025), os polímeros recicláveis, como o PET, desempenham papel central nesse processo, pois permitem múltiplos ciclos de reaproveitamento, seja por reciclagem mecânica, química ou por rotas emergentes como a biodegradação enzimática. Esses processos contribuem para a redução da dependência de matérias-primas fósseis e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

No âmbito técnico-científico, a análise da sustentabilidade da economia circular aplicada ao PET requer abordagens integradas que considerem aspectos ambientais, econômicos e sociais. Gracida-Alvarez *et al.* (2023) propõem um framework analítico que avalia o desempenho de sistemas circulares para plásticos, destacando que a eficiência da reciclagem do PET depende de fatores como infraestrutura de coleta, qualidade do material pós-consumo e viabilidade tecnológica dos processos de revalorização. Esses elementos são determinantes para garantir a circularidade efetiva e evitar perdas ao longo da cadeia.

Entretanto, apesar dos avanços, ainda existem desafios significativos relacionados à degradação e reciclagem do PET. Segundo Barbassa *et al.* (2024), a resistência estrutural dos plásticos sintéticos, incluindo o PET, dificulta sua degradação natural, o que impulsiona pesquisas voltadas ao uso de microrganismos e enzimas capazes de promover a quebra de suas cadeias poliméricas. Essas abordagens biotecnológicas surgem como alternativas promissoras para complementar os métodos tradicionais de reciclagem, especialmente em contextos onde a reciclagem mecânica apresenta limitações.

Adicionalmente, experiências em economia circular envolvendo outros polímeros, como o polietileno de alta densidade (HDPE), demonstram a viabilidade de modelos produtivos baseados na reciclagem e reintrodução de materiais no mercado. Valdivia *et al.* (2024) evidenciam que a aplicação de princípios circulares na reciclagem de plásticos pode gerar valor econômico e social, além de reduzir impactos ambientais, indicando que tais estratégias são plenamente adaptáveis ao contexto do PET.

Dessa forma, a economia circular do PET configura-se como uma abordagem estratégica para a gestão sustentável de resíduos plásticos, integrando inovação tecnológica, eficiência produtiva e responsabilidade ambiental. A consolidação desse modelo depende da articulação entre políticas públicas, avanços científicos e engajamento da sociedade, para a construção de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABOELNGA, M. M.; KALYAANAMOORTHY, S. **QM/MM Investigation to Identify the Hallmarks of Superior PET Biodegradation Activity of PETase over Cutinase.** ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 10, n. 48, p. 15857-15868, 2022.

ACOSTA, D. J.; ALPER, H. S. **Advances in enzymatic and organismal technologies for the recycling and upcycling of petroleum-derived plastic waste.** Current Opinion in Biotechnology, v. 84, 103021, 2023.

AGUIAR, A. P. **Prospecção de fungos filamentosos marinhos na biodegradação de microplástico.** 2023. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade de Ambientes Costeiros) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Vicente, 2023.

- AHMADI, A. *et al.* **Mitigation of the color generated during mechanical recycling of PET/MXD6 blends.** *Polymer Degradation and Stability*, [s. l.], 2021. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109748.
- ANBALAGAN, S. *et al.* **Hydrolytic degradation of polyethylene terephthalate by cutinase enzyme derived from fungal biomass—molecular characterization.** *Biointerface Research in Applied Chemistry*, v. 12, n. 1, p. 653-667, 2022.
- AUSTIN, H. P. *et al.* **Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase.** *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, [s. l.], 2018. DOI: 10.1073/pnas.1718804115.
- BARBASSA, Barbara Souza Silva. **Desafios e avanços na degradação biológica de plásticos: uma revisão sistemática integrativa.** 2024. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2024
- BENAVIDES FERNÁNDEZ, Cesar David *et al.* **Microbial degradation of polyethylene terephthalate: a systematic review.** *SN Applied Sciences*, v. 4, n. 10, p. 263, 2022.
- BEZERAJ, Erion *et al.* **State-of-the-art of industrial PET mechanical recycling: technologies, impact of contamination and guidelines for decision-making.** *RSC Sustainability*, v. 3, n. 5, p. 1996-2047, 2025.
- BUCIOLI, E. C. **Produção de enzima cutinase fúngica e avaliação na hidrólise do polietileno tereftalato.** 2024. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2024.
- BUSTAMANTE, G. *et al.* **Prioritizing Cleaner Production Actions towards Circularity: Combining LCA and Emergy in the PET Production Chain.** *Sustainability*, v. 14, n. 6821, 2022.
- CHAUDHARI, U. S. *et al.* **Environmental and economic analyses of chemical recycling via dissolution of waste polyethylene terephthalate.** Idaho National Laboratory, 2023.
- CLARK, R. A.; SHAVER, M. P. **Depolymerization within a circular plastics system.** *Chemical Reviews*, [s. l.], 2023. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00588.
- COSTA, C. B.; BAÚ, J. P. T. Microplásticos e educação ambiental: um relato de experiência para o ensino de química. **Intercursos Revista Científica**, v. 14, n. 8, p. 3990-4006, 2025.
- CRYSTAL THEW, Xue Er *et al.* Enhancing plastic biodegradation process: strategies and opportunities. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 44, n. 3, p. 477-494, 2024.
- DE PAULA, Everton Luiz *et al.* Polímeros recicláveis: impulsionando a economia circular sustentável. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 21, n. 66, p. 228-250, 2025.

DINO DA SILVA, Allem Karolyne *et al.* Biobleaching of copper from waste printed circuit boards by *Aspergillus tubingensis* UCP 1208: a sustainable alternative.

Environmental Technology, v. 47, n. 3, p. 449-460, 2026.

DO NASCIMENTO, Ana Verônica Silva *et al.* Meio Ambiente, Sustentabilidade E Biotecnologia Verde: A Importância Dos Bioplásticos E Das Enzimas Na Economia Circular. **Revista DCS**, v. 23, n. 86, p. e4259-e4259, 2026.

DO NASCIMENTO, Ilka Djanira Ferreira *et al.* **Biodegradable films based on passion fruit peel, cassava starch, and glycerol: influence of the formulation on the mechanical and water-soluble properties.** *Projeção e Docência*, v. 17, n. 1, p. e2612-e2612, 2026.

DOS SANTOS, Carlos Alves Gomes *et al.* **Economia circular e desenvolvimento sustentável: compostabilidade, biodegradação e inovação em biopolímeros e compósitos renováveis para aplicações estruturais, agrícolas e de embalagens.** *ARACÊ*, v. 8, n. 3, p. e12504-e12504, 2026.

FERNANDES, Lucas Salles Gazeta Vieira. **Desafios e perspectivas no enfrentamento da poluição marinha por plástico sob a ótica das negociações do Acordo Global Juridicamente Vinculante.** 2024. 175 f. : Dissertação (Mestrado em Direito) - Faculdade de Direito, Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Direito, Fortaleza, 2024

GARCÍA, José L. **Enzymatic recycling of polyethylene terephthalate through the lens of proprietary processes.** *Microbial Biotechnology*, v. 15, n. 11, p. 2699-2704, 2022.

GOMES, Daniela S. *et al.* Produção de cutinases heterólogas por *E. coli* e formulação enzimática aprimorada para aplicação na degradação de plásticos. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 16, n. 5, p. 3-3, 2013.

GRACIDA-ALVAREZ, Ulises R. *et al.* Circular economy sustainability analysis framework for plastics: application for poly (ethylene terephthalate) (PET). **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 2, p. 514–524, 2023.

GROSECLOSE, T. M. *et al.* A high-throughput screening platform for engineering poly(ethylene terephthalate) hydrolases. **ACS Catalysis**, v. 14, n. 19, p. 14622-14638, 2024.

GUERRA, Marcos Antonio *et al.* Economia Circular: avaliação dos aspectos sociais da cadeia de reciclagem de embalagens de PET no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 12, n. 31, p. 843-862, 2025.

INTASIAN, Pattarawan *et al.* Enzymes, in vivo biocatalysis, and metabolic engineering for enabling a circular economy and sustainability. **Chemical Reviews**, v. 121, n. 17, p. 10367-10451, 2021.

LIU, Y. *et al.* Catalytic features and thermal adaptation mechanisms of a deep sea bacterial cutinase-type poly(ethylene terephthalate) hydrolase. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 10, p. 865787, 2022.

- LU, H. *et al.* Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization. **Nature**, [s. l.], 2022. DOI: 10.1038/s41586-022-04599-z.
- MACEDO, Indira Maria Estolano *et al.* Reciclagem do polietileno tereftalato (PET) no fomento da economia circular. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 57704–57723, 2020.
- MACIEL, Carla do Couto Soares *et al.* Caracterização de biossurfactante por Curvularia lunata UFPEDA885 para descontaminação de solos por óleo automotivo. **Interfaces Científicas: Saúde e Ambiente**, v. 9, n. 3, p. 7-23, 2024.
- MARTINS, H. L. S.; BORTOLETO, A. P. **Sustentabilidade do ciclo de vida na prevenção de resíduo plástico e alimentar na cadeia produtiva do leite.** IBEAS, 2024.
- MOHAN, Krishna *et al.* Deterioração e degradação microbiana de materiais poliméricos. **Journal of Biochemical Technology**, v. 2, n. 4, p. 210-215, 2011.
- NISTICÒ, R. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. **Polymer Testing**, [s. l.], 2020. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106707.
- ODA, Kohei; WLODAWER, Alexander. **Desenvolvimento de abordagens baseadas em enzimas para reciclagem de PET em escala industrial.** Bioquímica, v. 63, n. 4, p. 369-401, 2024.
- OYEWOLE, Oluwafemi Adebayo *et al.* **Enzimas microbianas na reciclagem de resíduos.** In: **Interações ecológicas em enzimologia microbiana**. Singapura: Springer Nature Singapore, 2022. p. 189-213.
- PAULA, E. L. *et al.* Polímeros recicláveis: impulsionando a economia circular sustentável. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 21, n. 66, p. 228-250, 2025.
- PINTER, E. *et al.* Circularity study on PET bottle-to-bottle recycling. **Sustainability**, v. 13, n. 7370, 2021.
- PRIYA, Anshu; DUTTA, Kasturi; DAVEREY, Achlesh. A comprehensive biotechnological and molecular insight into plastic degradation by microbial community. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 97, n. 2, p. 381-390, 2022.
- SANTOS, C. L. **Avaliação da produção de garrafas PET de refrigerante e seu gerenciamento pós-consumo a partir do ciclo de vida no contexto do Distrito Federal.** Dissertação (Mestrado) – UnB, Brasília, 2022.
- SINGH, A. *et al.* **Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly(ethylene terephthalate).** Joule, v. 5, n. 9, p. 2479-2503, 2021.
- SONNENDECKER, C. *et al.* **Low-carbon footprint recycling of post-consumer PET plastic with a metagenomic polyester hydrolase.** ChemSusChem, v. 15, n. 9, e202101062, 2022.

SOUZA, C. G. S. *et al.* **Estudo do mecanismo de reação da degradação do PET da cutinase do *Fusarium oxysporum***. Belém: Even3, 2024.

SULAIMAN, S. *et al.* Isolation of a novel cutinase homolog with polyethylene terephthalate-degrading activity from leaf-branch compost by using a metagenomic approach. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 78, n. 5, p. 1556-1562, 2012.

TAMOOR, Muhammad *et al.* **Potential use of microbial enzymes for the conversion of plastic waste into value-added products: a viable solution**. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, p. 777727, 2021.

TANIGUCHI, I. *et al.* Biodegradation of PET: Current status and application aspects. **ACS Catalysis**, [s. l.], 2019. DOI: 10.1021/acscatal.8b05171.

TELES, B. A. S. *et al.* Environmental, Technical, and Circular Assessment of the Integration of Additive Manufacturing and Open-Loop Recycling of PET. **Sustainability**, v. 17, n. 10068, 2025.

TOURNIER, V. *et al.* An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, v. 580, p. 216-219, 2020.

TOURNIER, V. *et al.* Enzymes' Power for Plastics Degradation. **Chemical Reviews**, v. 123, n. 9, p. 5612-5701, 2023.

UEKERT, T. *et al.* Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, p. 965-978, 2023.

VALDIVIA, Ismael Barrera; MEDINA, Braulio Emanuel Millán; MENDOZA, Cristian Santos. Circular economy approach to recycling of high-density polyethylene (HDPE) for the production of pet products. **Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies**, v. 5, n. 2, p. e 24036, 2024.

VAN DER ZEE, Maarten. **Analytical methods for monitoring biodegradation processes of environmentally degradable polymers**. In: *Handbook of biodegradable polymers: isolation, synthesis, characterization and applications*. [S. l.]: [s. n.], 2011. p. 263-281.

VAZ JÚNIOR, S. **Reciclagem química de plásticos**. Brasília: Embrapa Agroenergia (Circular Técnica 17), 2024.

WEI, R.; ZIMMERMANN, W. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics. **Microbial Biotechnology**, [s. l.], 2017.

ZHU, B. *et al.* Degradação enzimática de substratos modelo de tereftalato de polietileno pela esterase E4. **Biology**, [s. l.], 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as Bolsas CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Processo nº 88887.214525/2025-00 de G.O.S., Processo nº 88882.462004/2019-01 de B.G.A.D., 88887.214530/2025-00 de M.S.C.L, Processo nº 88887.214521/2025-00 de J.O.R., a Bolsa da FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco), ao CNPq Bolsa de Produtividade em Pesquisa de G.M.C.T Processo nº 312241/2022-4, a Universidade Católica de Pernambuco pela disponibilização dos laboratórios do CEMACBIOS-UNICAP, pelo incentivo à pesquisa.