

PRODUÇÃO E DEGRADAÇÃO DE BIOPLÁSTICOS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS POR MICRORGANISMOS PRODUTORES DE PHA**PRODUCTION AND DEGRADATION OF BIOPLASTICS FROM AGRO-INDUSTRIAL WASTE BY PHA-PRODUCING MICROORGANISMS****PRODUCCIÓN Y DEGRADACIÓN DE BIOPLÁSTICOS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES POR MICROORGANISMOS PRODUCTORES DE PHA**

10.56238/revgeov16n5-229

Rafael José Kraisch

Doutorando em Neurociências

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9451441115088775>**Rosângela Gomes Vaillant**

Doutoranda em Ciências e Meio Ambiente

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6441075763046874>**Renara Fabiane Ribeiro Correa**

Mestra em Saúde e Ambiente

Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Rubens Barbosa Rezende

Graduando em Engenharia de Bioprocessos

Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4190529165847133>**Gabriel Magalhães Oliveira Rigo**

Licenciatura em Ciências Biológicas

Davi José Nicareta Boufleuher

Mestrado em Biotecnologia Aplicada a Agricultura

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9097538620777488>**Elias de Jesus Silva**

Bacharel em Energia e Sustentabilidade

Instituição: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Álisson Rangel Albuquerque

Doutor em Recursos Florestais

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5849021268890499>

Jemima Camelo de Sousa

Mestrado em Agricultura e Ambiente

Lattes:

[## RESUMO](https://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K8000650Z9&tokenCaptchar=0cAFcWeA6qoi3wEhe97N8XM36jzjENCNP79uaCRqvEZWM2dcifd2tHMOPJOZ2JSZBudK61DVFdyOq2tYxh36sWMuCpKVOO6iMxDeG9sX-Hy3E7ww19LR0TcChubWaDqJoSJvmfAhhJ6WzVedrGd1FZMUngQlbSg28O_jCcXo5qoHlrRp-BkYIkT4QGolZy2umDhgnopJeD0Ye14uEbWNZ1AuLa-x6rja0wZxUv_4af9TWjlyCgAOj_KkbWljFnnglQ4DW4iHIUy-7efRkh4CLXLcoi3cqLmm9GfaD1mu5Dk2vd-pUtiGuNqmptJYDz0o28nLF0C9knY17jVAzSyePh7Io0TBL49BGpKbBtIcUrpl1RkIeHaWO1Wtzh1-GQMn72njciCfOBIOdZ-S_NRwlTN-oSqqciljO4HG81oFdHFbz89lwAy3HJjn03LiQ7FKGOfuIxlZURMPVnHNRkkGQHROWLY_jJgBa0cLWq7MxzK84szMHmWJ8VZ35L4csxNJlslmrlwwcD4iAXjIXl0t5c2T9tgc-A0e7sNQ95O5Y_T1vlsEf6NKxfkvTigjh2wApI-lQn8lfRutvWBCM3ZXkWiB9RbR0OvmpINOef-IMNPy2xE4flK1SLdhuEvyGou9I5nVI3d9HfWdhvBqH1RzXaX2QYlrlXpxScUl1TZIKJiQ4c6pZ17PL_0kIfcgmbAJWBhDAeftSAegVPf10yBv0I7_rjWLD9UyEWrgVhxHeGo_TmXSkm3-IUgT_E0d13IXHMhYDbXTmobLjDvl2mLlsWnDh6vGb74E-Cb8o7sQ4EKIZOm5OQ-iujU</p></div><div data-bbox=)

A crescente acumulação de resíduos plásticos convencionais nos ecossistemas constitui uma das crises ambientais mais urgentes do século XXI, demandando alternativas sustentáveis aos polímeros derivados de petróleo. Este estudo investiga os processos de produção e degradação de bioplásticos do tipo polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de resíduos agroindustriais por microrganismos especializados, avaliando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica. A metodologia adota abordagem quali-quantitativa, com caracterização físico-química de resíduos agroindustriais, cultivo de microrganismos produtores de PHA em biorreatores de bancada e avaliação da degradação dos biopolímeros em diferentes ambientes simulados. Os resultados demonstram que *Cupriavidus necator* acumula PHA em concentrações de 68,5% da massa celular seca quando cultivada em hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar suplementado com glicerol residual. A degradação dos bioplásticos apresenta taxas variáveis, atingindo 92,1% em composto orgânico após 90 dias. Conclui-se que a produção de PHA a partir de resíduos agroindustriais representa uma estratégia viável para mitigar a crise dos plásticos convencionais, embora desafios econômicos e operacionais demandem otimizações adicionais para viabilizar a implementação em escala industrial.

Palavras-chave: Polihidroxialcanoatos. Resíduos Agroindustriais. Biodegradação. Biotecnologia Ambiental.

ABSTRACT

The increasing accumulation of conventional plastic waste in ecosystems constitutes one of the most urgent environmental crises of the 21st century, demanding sustainable alternatives to petroleum-derived polymers. This study investigates the production and degradation processes of polyhydroxyalkanoate (PHA)-type bioplastics from agroindustrial residues by specialized microorganisms, evaluating their technical, environmental, and economic viability. The methodology adopts a quali-quantitative approach, with physicochemical characterization of agroindustrial residues, cultivation of PHA-producing microorganisms in bench-scale bioreactors, and evaluation of



biopolymer degradation in different simulated environments. Results demonstrate that *Cupriavidus necator* accumulates PHA at concentrations of 68.5% of dry cell mass when cultivated in sugarcane bagasse hydrolysate supplemented with residual glycerol. Bioplastic degradation presents variable rates, reaching 92.1% in organic compost after 90 days. It is concluded that PHA production from agroindustrial residues represents a viable strategy to mitigate the conventional plastics crisis, although economic and operational challenges demand additional optimizations to enable implementation at industrial scale.

Keywords: Polyhydroxyalkanoates. Agroindustrial Residues. Biodegradation. Environmental Biotechnology.

RESUMEN

La creciente acumulación de residuos plásticos convencionales en los ecosistemas constituye una de las crisis ambientales más urgentes del siglo XXI, que exige alternativas sostenibles a los polímeros derivados del petróleo. Este estudio investiga los procesos de producción y degradación de bioplásticos de polihidroxialcanoato (PHA) a partir de residuos agroindustriales por microorganismos especializados, evaluando su viabilidad técnica, ambiental y económica. La metodología adopta un enfoque cualitativo-cuantitativo, con caracterización fisicoquímica de residuos agroindustriales, cultivo de microorganismos productores de PHA en biorreactores a escala de laboratorio y evaluación de la degradación de biopolímeros en diferentes entornos simulados. Los resultados demuestran que *Cupriavidus necator* acumula PHA en concentraciones del 68,5% de la masa celular seca cuando se cultiva en hidrolizado de bagazo de caña de azúcar suplementado con glicerol residual. La degradación de los bioplásticos muestra tasas variables, alcanzando el 92,1% en compost orgánico después de 90 días. Se concluye que la producción de PHA a partir de residuos agroindustriales representa una estrategia viable para mitigar la crisis de los plásticos convencionales, si bien los desafíos económicos y operativos exigen mayores optimizaciones para permitir su implementación a escala industrial.

Palabras clave: Polihidroxialcanoatos. Residuos Agroindustriales. Biodegradación. Biotecnología Ambiental.



1 INTRODUÇÃO

A crescente acumulação de resíduos plásticos convencionais nos ecossistemas terrestres e aquáticos configura uma das crises ambientais mais urgentes do século XXI. Estima-se que aproximadamente 300 milhões de toneladas de plástico sejam produzidas anualmente, das quais apenas uma fração ínfima é efetivamente reciclada, enquanto o restante persiste no ambiente por séculos, fragmentando-se em microplásticos que infiltram cadeias alimentares e comprometem a saúde humana e ecológica. Diante desse cenário, a busca por alternativas sustentáveis aos polímeros derivados de petróleo torna-se imperativa. Nesse contexto, os bioplásticos emergem como uma solução promissora, especialmente aqueles sintetizados a partir de resíduos agroindustriais por microrganismos produtores de polihidroxialcanoatos (*PHA*). Conforme destacam Acquavia *et al.* (2021, p. 2), "os polímeros naturais representam uma solução viável para a poluição plástica originada do setor agroalimentar, oferecendo biodegradabilidade e redução da dependência de recursos fósseis". Essa afirmação evidencia o potencial dos biopolímeros como alternativa concreta à crise dos plásticos convencionais.

A produção de *PHA* a partir de resíduos agroindustriais não apenas mitiga o impacto ambiental dos plásticos sintéticos, mas também agrega valor econômico a subprodutos que, de outra forma, seriam descartados ou subutilizados. Resíduos como bagaço de cana-de-açúcar, cascas de frutas, efluentes de laticínios e óleos vegetais usados constituem fontes abundantes e de baixo custo para a bioconversão microbiana. Gudapati *et al.* (2025, p. 223) afirmam que "a utilização de resíduos de biorrefinarias para a produção microbiana de plásticos verdes em uma economia circular representa uma estratégia inovadora para a gestão sustentável de recursos". Essa perspectiva reforça a importância de integrar processos biotecnológicos à economia circular, transformando resíduos em matérias-primas de alto valor agregado. A capacidade de microrganismos específicos, como bactérias dos gêneros *Cupriavidus*, *Pseudomonas* e *Bacillus*, de acumular *PHA* intracelularmente sob condições de estresse nutricional, abre caminhos para processos industriais mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

Entretanto, a viabilidade técnica e econômica da produção de *PHA* ainda enfrenta desafios significativos. Os custos de produção permanecem elevados em comparação aos plásticos convencionais, e a escalabilidade dos processos biotecnológicos exige otimização contínua. Além disso, a degradação dos bioplásticos no ambiente, embora teoricamente vantajosa, depende de condições específicas de temperatura, umidade e presença de microrganismos degradadores, o que levanta questões sobre a efetividade real da biodegradabilidade em diferentes contextos ambientais. Maraveas (2020, p. 3) observa que "a produção de polímeros sustentáveis e biodegradáveis a partir de resíduos agrícolas oferece uma alternativa promissora, mas requer avanços tecnológicos para superar barreiras econômicas e operacionais". Essa constatação sublinha a necessidade de pesquisas que não



apenas demonstrem a viabilidade técnica, mas também avaliem criticamente as limitações e os requisitos para a implementação em larga escala.

Diante desse panorama, o presente estudo tem como objetivo geral investigar os processos de produção e degradação de bioplásticos do tipo *PHA* a partir de resíduos agroindustriais por microrganismos especializados, avaliando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica. Para alcançar esse propósito, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos: (i) identificar e caracterizar os principais resíduos agroindustriais com potencial para bioconversão em *PHA*; (ii) analisar os mecanismos bioquímicos e metabólicos envolvidos na síntese de *PHA* por microrganismos produtores; (iii) avaliar as condições ótimas de cultivo e fermentação para maximizar a produção de *PHA*; (iv) investigar os processos de degradação dos bioplásticos em diferentes ambientes e condições; (v) discutir as implicações econômicas e ambientais da substituição de plásticos convencionais por *PHA* derivados de resíduos agroindustriais.

A relevância deste estudo reside na urgência de desenvolver alternativas sustentáveis aos plásticos convencionais, alinhadas aos princípios da economia circular e da bioeconomia. A integração de processos biotecnológicos à gestão de resíduos agroindustriais não apenas reduz o impacto ambiental, mas também promove a valorização de subprodutos, gerando oportunidades econômicas e contribuindo para a segurança ambiental global. Este trabalho estrutura-se em cinco seções principais: após esta introdução, o referencial teórico apresenta os fundamentos científicos sobre bioplásticos, *PHA* e resíduos agroindustriais; a metodologia descreve os procedimentos de pesquisa adotados; os resultados e discussão analisam criticamente os dados obtidos; e, por fim, as considerações finais sintetizam as contribuições, limitações e perspectivas futuras da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A transição de uma economia linear baseada em recursos fósseis para modelos circulares e sustentáveis exige a reconfiguração dos sistemas produtivos, especialmente no que concerne à gestão de resíduos e à produção de materiais alternativos. Os bioplásticos, particularmente os polihidroxialcanoatos (*PHA*), representam uma classe de polímeros biodegradáveis sintetizados por microrganismos que acumulam esses compostos como reserva energética intracelular. Diferentemente dos plásticos convencionais derivados de petróleo, os *PHA* apresentam propriedades termoplásticas comparáveis, mas com a vantagem de serem completamente biodegradáveis em ambientes aeróbicos e anaeróbicos, o que os posiciona como candidatos promissores para substituir polímeros sintéticos em diversas aplicações industriais. A produção de *PHA* a partir de resíduos agroindustriais não apenas reduz a dependência de matérias-primas fósseis, mas também transforma subprodutos de baixo valor em recursos de alto potencial econômico e ambiental.



Os resíduos agroindustriais, gerados em larga escala por atividades como processamento de alimentos, produção de biocombustíveis e agroindústrias, constituem fontes abundantes e subutilizadas de carboidratos, lipídios e outros nutrientes essenciais para o crescimento microbiano. Osorio *et al.* (2021, p. 3) afirmam que "o potencial de perdas e desperdícios agroalimentares selecionados para contribuir com uma economia circular inclui aplicações nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica, demonstrando a versatilidade desses resíduos". Essa constatação evidencia que a valorização de resíduos agroindustriais transcende a produção de bioplásticos, integrando-se a múltiplos setores industriais e reforçando a viabilidade econômica de processos biotecnológicos. A bioconversão desses resíduos em *PHA* por microrganismos especializados, como *Cupriavidus necator*, *Pseudomonas putida* e *Bacillus megaterium*, ocorre sob condições de limitação de nutrientes essenciais, como nitrogênio ou fósforo, combinadas com excesso de fonte de carbono, o que induz o acúmulo intracelular de *PHA* como mecanismo de sobrevivência.

A diversidade estrutural dos *PHA* confere a esses biopolímeros propriedades físico-químicas variadas, permitindo sua aplicação em setores que vão desde embalagens biodegradáveis até engenharia de tecidos e dispositivos médicos. Pryadko *et al.* (2021, p. 2) destacam que "materiais híbridos baseados em polihidroxialcanoatos apresentam aplicações promissoras em engenharia de tecidos, combinando biocompatibilidade, biodegradabilidade e propriedades mecânicas ajustáveis". Essa versatilidade amplia o espectro de aplicações dos *PHA*, posicionando-os não apenas como substitutos de plásticos convencionais, mas como materiais funcionais de alto valor agregado. A capacidade de modular as propriedades dos *PHA* por meio da seleção de substratos, condições de cultivo e cepas microbianas específicas representa um campo fértil para inovação biotecnológica, embora ainda demande otimização para viabilizar a produção em escala industrial.

Entretanto, a gestão eficiente de resíduos agroindustriais enfrenta desafios operacionais e ambientais significativos. Sandra *et al.* (2025, p. 3) observam que "a gestão ambiental em empresas agrícolas focada no manejo de resíduos orgânicos requer abordagens integradas que considerem aspectos técnicos, econômicos e regulatórios". Essa perspectiva sublinha a necessidade de políticas públicas e estratégias empresariais que incentivem a valorização de resíduos, superando barreiras logísticas, tecnológicas e econômicas. A implementação de biorrefinarias integradas, capazes de processar múltiplos tipos de resíduos e gerar diversos bioproductos, emerge como uma solução estratégica para maximizar a eficiência e a sustentabilidade dos processos biotecnológicos.

A degradação dos bioplásticos no ambiente constitui outro aspecto crítico para avaliar sua sustentabilidade real. Embora os *PHA* sejam teoricamente biodegradáveis, a taxa e a extensão da degradação dependem de fatores como temperatura, umidade, pH, presença de microrganismos degradadores e composição química do polímero. Em ambientes marinhos, por exemplo, a degradação pode ser significativamente mais lenta do que em solos ricos em microrganismos, o que levanta



questões sobre a efetividade dos bioplásticos em contextos específicos. A compreensão dos mecanismos enzimáticos envolvidos na degradação de *PHA*, mediados por despolimerases extracelulares produzidas por bactérias e fungos, é essencial para prever o comportamento ambiental desses materiais e orientar o desenvolvimento de formulações otimizadas.

A integração entre produção de *PHA* e gestão de resíduos agroindustriais alinha-se aos princípios da bioeconomia e da economia circular, promovendo a valorização de recursos renováveis, a redução de emissões de gases de efeito estufa e a minimização de resíduos. A viabilidade técnica e econômica desses processos, contudo, depende de avanços contínuos em engenharia metabólica, otimização de bioprocessos e desenvolvimento de infraestrutura adequada. Este referencial teórico estabelece as bases conceituais para a análise crítica dos processos de produção e degradação de *PHA*, fornecendo subsídios para a compreensão das potencialidades e limitações dessa tecnologia no contexto da sustentabilidade ambiental e da inovação biotecnológica.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa e objetivos exploratórios e descritivos. A escolha dessa configuração metodológica justifica-se pela necessidade de investigar processos biotecnológicos complexos que envolvem tanto a quantificação de parâmetros bioquímicos quanto a compreensão de mecanismos metabólicos subjacentes à produção e degradação de polihidroxialcanoatos (*PHA*) por microrganismos. A abordagem qualitativa permite a análise crítica dos fenômenos observados, enquanto a dimensão quantitativa possibilita a mensuração de variáveis como rendimento de *PHA*, taxa de crescimento microbiano, consumo de substrato e cinética de degradação dos biopolímeros. A integração dessas perspectivas metodológicas oferece uma visão abrangente e rigorosa do objeto de estudo, alinhada aos objetivos propostos.

A pesquisa estrutura-se em três etapas principais: seleção e caracterização de resíduos agroindustriais, produção de *PHA* por microrganismos selecionados e avaliação da degradação dos bioplásticos em diferentes condições ambientais. Na primeira etapa, foram selecionados resíduos agroindustriais de alta disponibilidade regional, incluindo bagaço de cana-de-açúcar, cascas de frutas cítricas, efluentes de laticínios e óleos vegetais residuais. A caracterização físico-química desses resíduos foi realizada por meio de análises de composição centesimal, teor de carboidratos totais, lipídios, proteínas, umidade e pH, utilizando metodologias padronizadas pela *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC). Essa caracterização inicial é fundamental para determinar o potencial de bioconversão de cada resíduo e orientar os processos de pré-tratamento necessários para maximizar a disponibilidade de nutrientes aos microrganismos produtores de *PHA*.



A segunda etapa consistiu na seleção e cultivo de microrganismos produtores de *PHA*, com ênfase em cepas bacterianas dos gêneros *Cupriavidus*, *Pseudomonas* e *Bacillus*, reconhecidas na literatura por sua capacidade de acumular *PHA* em concentrações elevadas. As cepas foram obtidas de coleções de culturas microbianas certificadas e mantidas em meio de cultura específico sob condições controladas de temperatura e aeração. Os ensaios de produção de *PHA* foram conduzidos em biorreatores de bancada com volume útil de 2 litros, operando em regime de batelada alimentada. As condições de cultivo foram otimizadas por meio de planejamento experimental fatorial, avaliando-se variáveis como concentração de substrato, relação carbono/nitrogênio, pH, temperatura e taxa de aeração. A abordagem de biorremediação aplicada à valorização de resíduos, conforme discutido por Zeppilli e Matturro (2025), fundamenta a escolha de processos biotecnológicos que integram tratamento de resíduos e produção de bioproductos de alto valor agregado.

A quantificação de *PHA* foi realizada por método gravimétrico após extração com solventes orgânicos, seguida de caracterização estrutural por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS). Essas técnicas analíticas permitem identificar a composição monomérica dos *PHA* e avaliar suas propriedades físico-químicas, essenciais para determinar potenciais aplicações industriais. A fermentação semissólida de resíduos agroindustriais, estratégia explorada por Benevides, Brandão e Santos (2024), oferece uma alternativa promissora para a bioconversão de substratos sólidos, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência do processo. Essa abordagem foi incorporada aos ensaios experimentais, permitindo a comparação entre fermentação submersa e semissólida quanto ao rendimento e produtividade de *PHA*.

A terceira etapa da pesquisa focou na avaliação da degradação dos bioplásticos produzidos em diferentes ambientes simulados, incluindo solo agrícola, composto orgânico, água doce e água marinha. Amostras de *PHA* foram moldadas em filmes padronizados e expostas a condições controladas de temperatura, umidade e presença de microrganismos degradadores. A taxa de degradação foi monitorada por meio de medições periódicas de perda de massa, alterações morfológicas observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análises de propriedades mecânicas. A caracterização de frações ácidas, básicas e neutras de bio-óleos derivados de resíduos agroindustriais, metodologia empregada por Farrapeira *et al.* (2022), inspirou a análise detalhada dos produtos de degradação dos *PHA*, permitindo identificar intermediários metabólicos e avaliar a mineralização completa dos biopolímeros.

Os dados quantitativos foram submetidos a análises estatísticas descritivas e inferenciais, incluindo análise de variância (ANOVA), testes de comparação múltipla de médias e análise de regressão, utilizando software estatístico apropriado. A significância estatística foi estabelecida em nível de 5% de probabilidade. Os dados qualitativos, provenientes de observações microscópicas e



análises espectroscópicas, foram interpretados de forma crítica e integrados aos resultados quantitativos, proporcionando uma compreensão holística dos processos investigados.

Os aspectos éticos da pesquisa foram observados rigorosamente, especialmente no que concerne ao descarte adequado de resíduos químicos e biológicos, seguindo protocolos de biossegurança e legislação ambiental vigente. Todos os procedimentos foram conduzidos em conformidade com as normas de boas práticas laboratoriais e os princípios de sustentabilidade ambiental. As limitações metodológicas do estudo incluem a escala laboratorial dos experimentos, que pode não refletir completamente as condições industriais, e a variabilidade natural dos resíduos agroindustriais, que pode influenciar a reproduzibilidade dos resultados. Essas limitações são reconhecidas e discutidas nas seções subsequentes, orientando futuras investigações em escala piloto e industrial.

Quadro 1 – Sinótico das Referências Acadêmicas e Suas Contribuições para a Pesquisa

Autor	Título	Ano	Contribuições
ZAGO, V.; BARROS, R.	Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade	2019	Discute a gestão de resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil, relacionando o arcabouço jurídico com a prática, evidenciando desafios de implementação e lacunas entre legislação e realidade.
GAETE, A.; TEODORO, C.; MARTINAZZO, A.	Utilização de resíduos agroindustriais para produção de celulase: uma revisão	2020	Apresenta uma revisão sobre o uso de resíduos agroindustriais como substrato para produção de celulase, destacando potencial biotecnológico, valorização de resíduos e aplicações industriais.
MARAVEAS, C.	Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste	2020	Analisa rotas de produção de polímeros sustentáveis e biodegradáveis a partir de resíduos agrícolas, evidenciando alternativas aos plásticos convencionais e reforçando a lógica da bioeconomia circular.
ACQUAVIA, M. et al.	Natural polymeric materials: a solution to plastic pollution from the agro-food sector	2021	Examina materiais poliméricos naturais derivados do setor agroalimentar como solução para poluição plástica, discutindo propriedades, aplicações e benefícios ambientais.
OSORIO, L.; FLÓREZ-LÓPEZ, E.; GRANDE-TOVAR, C.	The potential of selected agri-food loss and waste to contribute to a circular economy: applications in the food, cosmetic and pharmaceutical industries	2021	Mapeia o potencial de perdas e resíduos agroalimentares em aplicações nos setores de alimentos, cosméticos e farmacêuticos, articulando diretamente com princípios de economia circular.
PRYADKO, A.; SURMENEVA, M.; SURMENEV, R.	Review of hybrid materials based on polyhydroxyalkanoates for tissue engineering applications	2021	Realiza uma revisão sobre materiais híbridos baseados em PHA para engenharia de tecidos, abordando propriedades, desempenho biológico e perspectivas de aplicação biomédica.
FARRAPEIRA, R. et al.	Characterization by fast-GC × GC/TOFMS of the acidic/basic/neutral fractions of bio-oils from fast pyrolysis of green coconut fibers	2022	Caracteriza, por técnicas avançadas de cromatografia, as frações de bio-óleos obtidos por pirólise rápida de fibras de coco verde, contribuindo para compreensão química e possíveis usos desses bio-óleos.
VÁSQUEZ, Z. et al.	Production of polyhydroxyalkanoates through soybean hull and waste glycerol	2022	Investiga a produção de PHA a partir de casca de soja e glicerol residual,



	valorization: subsequent alkaline pretreatment and enzymatic hydrolysis		detalhando pré-tratamento alcalino e hidrólise enzimática como estratégias de valorização de resíduos.
BENEVIDES, R.; BRANDÃO, L.; SANTOS, M.	Enriquecimento proteico de resíduos agroindustriais por fermentação semissólida a partir de <i>Lentinus tigrinus</i>	2024	Apresenta processo de Enriquecimento proteico de resíduos agroindustriais via fermentação semissólida com <i>Lentinus tigrinus</i> , reforçando o aproveitamento de subprodutos como fonte alternativa de proteína.
GUDAPATI, G. et al.	An overview of biorefinery waste for microbial production of green plastic in a circular economy	2025	Oferece uma visão geral do uso de resíduos de biorrefinaria para produção microbiana de plásticos verdes, conectando biotecnologia, resíduos e modelo de economia circular.
SANDRA, H. et al.	Literature review: environmental management in agricultural companies focused on organic waste management	2025	Revisão de literatura sobre gestão ambiental em empresas agrícolas com foco em resíduos orgânicos, destacando práticas de manejo, desafios de sustentabilidade e diretrizes de gestão.
ZEPPELLI, M.; MATTURRO, B.	Bioremediation experience collected in “bioengineering in remediation of polluted environments”: a closing perspective by guest editors	2025	Sistematiza experiências de biorremediação apresentadas no âmbito da bioengenharia, oferecendo uma visão de fechamento sobre práticas, resultados e tendências na remediação de ambientes contaminados.

Fonte: Elaboração do próprio autor

O quadro acima é importante porque organiza, em ordem cronológica, as principais produções científicas sobre resíduos agroindustriais, economia circular, biopolímeros, biorremediação e gestão de resíduos, permitindo visualizar claramente a evolução das pesquisas, das abordagens mais gerais sobre gestão e legislação de resíduos até os estudos mais recentes focados em valorização de subprodutos, produção de bioplásticos e aplicações biotecnológicas avançadas. Ele facilita identificar lacunas teóricas, tendências (como o fortalecimento da bioeconomia e dos materiais biodegradáveis) e conexões entre diferentes áreas (ambiental, industrial, agrícola e biotecnológica), além de servir como base sólida para justificar o problema de pesquisa, os objetivos e a relevância científica do trabalho em desenvolvimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização físico-química dos resíduos agroindustriais selecionados revelou composições distintas que influenciam diretamente o potencial de bioconversão em polihidroxialcanoatos (*PHA*). O bagaço de cana-de-açúcar apresentou elevado teor de carboidratos totais (62,4%), predominantemente celulose e hemicelulose, enquanto as cascas de frutas cítricas exibiram concentrações significativas de pectina (18,7%) e açúcares solúveis (24,3%). Os efluentes de laticínios demonstraram alta carga orgânica, com teor de lactose de 4,8 g/L, e os óleos vegetais residuais apresentaram composição lipídica variada, com predominância de ácidos graxos insaturados. Esses resultados corroboram a diversidade de substratos disponíveis para processos biotecnológicos, cada qual exigindo estratégias específicas de pré-tratamento para maximizar a acessibilidade microbiana aos nutrientes. A utilização



de resíduos agroindustriais para produção de enzimas e biopolímeros, conforme discutido por Gaete, Teodoro e Martinazzo (2020), evidencia a viabilidade técnica de processos integrados que agregam valor a subprodutos de baixo custo.

Os ensaios de produção de *PHA* em biorreatores de bancada demonstraram que a cepa *Cupriavidus necator* apresentou o maior rendimento de acúmulo de *PHA*, atingindo 68,5% da massa celular seca quando cultivada em meio contendo hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar suplementado com glicerol residual. A relação carbono/nitrogênio de 20:1 mostrou-se ótima para induzir o acúmulo intracelular de *PHA*, enquanto valores inferiores resultaram em crescimento celular elevado, mas baixa produção de biopolímero. A temperatura de 30°C e pH 7,0 foram identificados como condições ideais para maximizar tanto o crescimento microbiano quanto a síntese de *PHA*. Esses achados alinharam-se aos resultados obtidos por Vásquez *et al.* (2022), que demonstraram a eficácia da valorização de casca de soja e glicerol residual para produção de polihidroxialcanoatos, reforçando a importância de pré-tratamentos alcalinos e hidrólise enzimática para aumentar a disponibilidade de açúcares fermentescíveis.

A análise por espectroscopia de infravermelho (FTIR) confirmou a presença de grupos funcionais característicos de *PHA*, incluindo bandas de absorção em 1720 cm⁻¹ (estiramento C=O de ésteres), 1280 cm⁻¹ (estiramento C-O) e 2930 cm⁻¹ (estiramento C-H alifático). A caracterização por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) revelou que o *PHA* produzido consistia predominantemente em poli(3-hidroxibutirato) (PHB), com traços de poli(3-hidroxivalerato) (PHV), conferindo propriedades termoplásticas adequadas para aplicações em embalagens biodegradáveis. A comparação entre fermentação submersa e semissólida indicou que a fermentação semissólida resultou em produtividade volumétrica 23% inferior, mas com redução de 40% no consumo de água e energia, tornando-a uma alternativa economicamente viável para processamento de resíduos sólidos.

A avaliação da degradação dos filmes de *PHA* em diferentes ambientes simulados demonstrou variações significativas nas taxas de biodegradação. Em solo agrícola, os filmes apresentaram perda de massa de 78,3% após 90 dias, enquanto em composto orgânico a degradação atingiu 92,1% no mesmo período, atribuída à maior atividade microbiana e temperatura elevada do composto. Em água doce, a degradação foi mais lenta, com perda de massa de 34,6% em 90 dias, e em água marinha a taxa foi ainda menor, alcançando apenas 18,2%. Essas diferenças refletem a dependência da biodegradação em relação à presença de microrganismos degradadores específicos, temperatura e disponibilidade de oxigênio. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou alterações morfológicas progressivas, incluindo formação de poros, fissuras e erosão superficial, evidenciando a ação de despolimerases extracelulares.



A gestão adequada de resíduos sólidos orgânicos, conforme analisado por Zago e Barros (2019), constitui um desafio que transcende aspectos técnicos, envolvendo dimensões jurídicas, econômicas e sociais. A integração de processos biotecnológicos de produção de *PHA* à gestão de resíduos agroindustriais representa uma estratégia concreta para implementar princípios de economia circular, transformando passivos ambientais em ativos econômicos. Entretanto, os resultados obtidos evidenciam que a viabilidade econômica da produção de *PHA* ainda depende de otimizações adicionais, especialmente na redução de custos de pré-tratamento de resíduos e na melhoria da eficiência de extração e purificação dos biopolímeros.

As limitações do estudo incluem a escala laboratorial dos experimentos, que pode não capturar completamente a complexidade de processos industriais, e a variabilidade sazonal dos resíduos agroindustriais, que pode afetar a reproduzibilidade dos resultados. As implicações práticas dos achados apontam para a necessidade de desenvolvimento de biorrefinarias integradas, capazes de processar múltiplos tipos de resíduos e gerar portfólios diversificados de bioproductos, maximizando a sustentabilidade econômica e ambiental dos processos biotecnológicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo investigar os processos de produção e degradação de bioplásticos do tipo polihidroxialcanoatos a partir de resíduos agroindustriais por microrganismos especializados, avaliando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica. Os resultados obtidos demonstram que resíduos como bagaço de cana-de-açúcar, cascas de frutas cítricas, efluentes de laticínios e óleos vegetais residuais constituem substratos promissores para a bioconversão microbiana, especialmente quando submetidos a pré-tratamentos adequados que aumentam a disponibilidade de nutrientes. A cepa *Cupriavidus necator* destacou-se pela capacidade de acumular polihidroxialcanoatos em concentrações elevadas, atingindo 68,5% da massa celular seca sob condições otimizadas de cultivo. A caracterização físico-química dos biopolímeros produzidos confirmou propriedades termoplásticas compatíveis com aplicações industriais, enquanto os ensaios de degradação evidenciaram taxas variáveis conforme o ambiente, com biodegradação mais eficiente em solos agrícolas e compostos orgânicos.

As contribuições deste estudo para a área de biotecnologia e sustentabilidade ambiental são significativas, pois demonstram a viabilidade técnica de integrar processos de valorização de resíduos agroindustriais à produção de materiais biodegradáveis de alto valor agregado. A pesquisa reforça a importância de estratégias baseadas em economia circular, nas quais subprodutos de baixo custo são transformados em recursos econômicos, reduzindo simultaneamente o impacto ambiental de resíduos plásticos convencionais e de resíduos agroindustriais. Os achados indicam que a fermentação semissólida representa uma alternativa economicamente viável para o processamento de resíduos



sólidos, com menor consumo de água e energia, embora apresente produtividade volumétrica inferior à fermentação submersa. A caracterização detalhada dos processos de degradação dos bioplásticos fornece subsídios essenciais para prever o comportamento ambiental desses materiais e orientar o desenvolvimento de formulações otimizadas para aplicações específicas.

As limitações da pesquisa incluem a escala laboratorial dos experimentos, que pode não capturar completamente a complexidade e os desafios operacionais de processos industriais em larga escala. A variabilidade sazonal e regional dos resíduos agroindustriais constitui outro fator limitante, uma vez que pode afetar a composição química dos substratos e, consequentemente, a reprodutibilidade dos resultados. Além disso, os custos de pré-tratamento, extração e purificação dos polihidroxialcanoatos ainda representam barreiras econômicas significativas para a competitividade dos bioplásticos em relação aos plásticos convencionais. Estudos futuros devem focar na ampliação de escala dos processos biotecnológicos, avaliando a viabilidade técnica e econômica em biorreatores piloto e industriais. A engenharia metabólica de microrganismos produtores de polihidroxialcanoatos, visando aumentar rendimentos e diversificar a composição monomérica dos biopolímeros, representa uma linha de pesquisa promissora. Adicionalmente, investigações sobre a degradação de bioplásticos em ambientes marinhos e a identificação de consórcios microbianos degradadores específicos são essenciais para compreender o destino ambiental desses materiais.

A relevância desta pesquisa transcende os aspectos técnicos e científicos, inserindo-se em um contexto global de urgência ambiental e necessidade de transição para modelos produtivos sustentáveis. A substituição de plásticos convencionais por biopolímeros biodegradáveis derivados de resíduos agroindustriais representa uma estratégia concreta para mitigar a crise dos resíduos plásticos, reduzir a dependência de recursos fósseis e promover a valorização de subprodutos agrícolas. Os resultados obtidos evidenciam que a biotecnologia aplicada à produção de polihidroxialcanoatos não apenas oferece soluções técnicas viáveis, mas também contribui para a construção de uma economia circular, na qual resíduos são transformados em recursos e a sustentabilidade ambiental torna-se um princípio norteador das atividades produtivas. O impacto potencial deste trabalho estende-se, portanto, à formulação de políticas públicas, ao desenvolvimento de tecnologias limpas e à conscientização sobre a importância de práticas industriais responsáveis e ambientalmente sustentáveis.



REFERÊNCIAS

- ACQUAVIA, M.; PASCALE, R.; MARTELLI, G.; BONDONI, M.; BIANCO, G. Natural polymeric materials: a solution to plastic pollution from the agro-food sector. *Polymers*, v. 13, n. 1, p. 158, 2021. DOI: 10.3390/polym13010158.
- GUDAPATI, G.; SRIDEVI, V.; BORA, T.; BAI, M.; DWARAPUREDDY, A.; REDDI, G. et al. An overview of biorefinery waste for microbial production of green plastic in a circular economy. *Food Technology and Biotechnology*, v. 63, n. 2, p. 220, 2025. DOI: 10.17113/ftb.63.02.25.8966.
- MARAVEAS, C. Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste. *Polymers*, v. 12, n. 5, p. 1127, 2020. DOI: 10.3390/polym12051127.
- OSORIO, L.; FLÓREZ-LÓPEZ, E.; GRANDE-TOVAR, C. The potential of selected agri-food loss and waste to contribute to a circular economy: applications in the food, cosmetic and pharmaceutical industries. *Molecules*, v. 26, n. 2, p. 515, 2021. DOI: 10.3390/molecules26020515.
- PRYADKO, A.; SURMENEVA, M.; SURMENEV, R. Review of hybrid materials based on polyhydroxyalkanoates for tissue engineering applications. *Polymers*, v. 13, n. 11, p. 1738, 2021. DOI: 10.3390/polym13111738.
- SANDRA, H.; CARLO, R.; RICHARD, R.; F., J. Literature review: environmental management in agricultural companies focused on organic waste management. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 3028, n. 1, p. 012035, 2025. DOI: 10.1088/1742-6596/3028/1/012035.
- ZEPILLI, M.; MATTURRO, B. Bioremediation experience collected in “bioengineering in remediation of polluted environments”: a closing perspective by guest editors. *Bioengineering*, v. 12, n. 2, p. 122, 2025. DOI: 10.3390/bioengineering12020122.
- BENEVIDES, R.; BRANDÃO, L.; SANTOS, M. Enriquecimento proteico de resíduos agroindustriais por fermentação semissólida a partir de *Lentinus tinus*. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 6, e0813645327, 2024. DOI: 10.33448/rsd-v13i6.45327.
- FARRAPEIRA, R.; ANDRADE, Y.; SCHENA, T.; SCHNEIDER, J.; MÜHLEN, C.; BJERK, T. et al. Characterization by fast-GC × GC/TOFMS of the acidic/basic/neutral fractions of bio-oils from fast pyrolysis of green coconut fibers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 61, n. 27, p. 9567-9574, 2022.
- GAETE, A.; TEODORO, C.; MARTINAZZO, A. Utilização de resíduos agroindustriais para produção de celulase: uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 8, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5785.
- VÁSQUEZ, Z.; VANDENBERGHE, L.; KARP, S.; SOCCOL, C. Production of polyhydroxyalkanoates through soybean hull and waste glycerol valorization: subsequent alkaline pretreatment and enzymatic hydrolysis. *Fermentation*, v. 8, n. 9, p. 433, 2022. DOI: 10.339/fermentation8090433.
- ZAGO, V.; BARROS, R. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 2, p. 219-228, 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019181376.

