UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO- UFTM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL

BÁRBARA SOUZA SILVA BARBASSA

DESAFIOS E AVANÇOS NA DEGRADAÇÃO BIOLÓGICA DE PLÁSTICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA INTEGRATIVA

Uberaba

2024

BÁRBARA SOUZA SILVA BARBASSA

DESAFIOS E AVANÇOS NA DEGRADAÇÃO BIOLÓGICA DE PLÁSTICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA INTEGRATIVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.
Orientadora: Prof. Dra. Mônica Hitomi Okura

Uberaba

2024

Catalogação na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Barbassa, Bárbara Souza Silva
B184d Desafios e avanços na degradação biológica de plásticos: uma revisão sistemática integrativa / Bárbara Souza Silva Barbassa. -- 2024.
79 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2024
Orientadora: Profa. Dra. Monica Hitomi Okura

1. Sustentabilidade. 2. Polímeros. 3. Biodegradação. I. Okura, Monica Hitomi. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 502.131.1

Mirtes Soares – Bibliotecária - CRB-6/2181

BÁRBARA SOUZA DA SILVA BARBASSA

DESAFIOS E AVANÇOS NA DEGRADAÇÃO BIOLÓGICA DE PLÁSTICOS: REVISÃO SISTEMATICA INTEGRATIVA

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 27 de novembro de 2024.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Monica Hitomi Okura
Orientadora - UFTM

Profa. Dra. Beatriz Gaydeczka
Membro Titular - UFTM

Prof. Dr. Pablo Inocêncio Monteiro
Membro Titular - IFTM

Documento assinado eletronicamente por **MONICA HITOMI OKURA**, **Professor do Magistério Superior**, em 27/11/2024, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 e no art. 34 da Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024.

Documento assinado eletronicamente por **BEATRIZ GAYDECZKA**, **Professor do Magistério Superior**, em 27/11/2024, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 e no art. 34 da Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024.

Documento assinado eletronicamente por **PABLO INOCÊNCIO MONTEIRO**, **Usuário Externo**, em 28/11/2024, às 08:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 e no art. 34 da Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1270295** e o código CRC **B156F0C0**.

Dedico este trabalho aos meus amados filhos, Manuela e Miguel, que são minha fonte constante de inspiração e força, e ao meu querido pai, cuja ausência é sentida a cada passo. Sua presença e seus ensinamentos

continuam a iluminar meu caminho,onde quer que esteja.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu forças para seguir em frente permitindo que eu alcançasse esta conquista, sustentando-me nos momentos mais desafiadores. Aos meus filhos, Manuela e Miguel, que são meu motivo maior de inspiração e perseverança; ao meu marido, Albano, que me apoiou ao longo de toda esta jornada, à minha mãe, por todo o carinho e ensinamentos que carrego comigo; e à minha querida avó Archanja, cuja sabedoria e força são um exemplo para minha vida; e aos amigos, que estiveram ao meu lado, incentivando e acreditando em mim em cada etapa, dando me ânimo e coragem. De forma especial, deixo meu agradecimento à minha orientadora, que, com dedicação e paciência, guiou me e apoiou em meio aos desafios que enfrentamos. A cada um de vocês, minha eterna gratidão.

“A possibilidade de realizarmos um sonho é o que torna a vida interessante. ”

Paulo Coelho

RESUMO

Atualmente, os polímeros são amplamente utilizados em diversos setores, incluindo o de consumo e o industrial, fazendo parte essencial do cotidiano da vida humana. Desde o início do século XX, pesquisas que envolvem materiais poliméricos, tanto sintéticos quanto naturais, expandiram o conhecimento acerca de suas propriedades, impulsionando avanços tecnológicos e revelando uma ampla gama de aplicações deste tipo de material. Contudo, o elevado consumo de polímeros sintéticos, gera grandes quantidades de resíduos, com baixas taxas de reciclagem e significativo impacto ambiental. Iniciativas globais e a promoção de práticas sustentáveis, buscam soluções para mitigar esses efeitos, destacando a importância da educação ambiental e do desenvolvimento de materiais biodegradáveis. A biodegradação de plásticos se apresenta como uma alternativa promissora, com pesquisas voltadas à aceleração de sua decomposição, visando a redução da poluição e o incentivo à sustentabilidade. O presente trabalho aborda os desafios e avanços na degradação biológica de plásticos por meio de uma revisão sistemática integrativa, analisando técnicas, métodos relacionados à ação de microrganismos e enzimas específicas no espaço temporal de 2015 a 2023. Os dados foram coletados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science,* as palavras-chave utilizadas foram "Degradation", "Plastic" e "Microbial" em estudos realizados nos países, China, Estados Unidos e Brasil. A pesquisa incluiu uma busca por patentes depositadas no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Revelando um crescente interesse acadêmico e tecnológico por soluções sustentáveis, evidenciando o potencial de bactérias, fungos e leveduras na decomposição de polímeros amplamente utilizados, como PET, PE e PS. Os estudos analisados também indicam que consórcios microbianos e enzimas favorecem a despolimerização e mineralização dos resíduos. No entanto, desafios para a aplicação prática da biodegradação persistem, como a necessidade de pré-tratamentos e adaptação dos processos em larga escala. Por outro lado, o uso de plásticos biodegradáveis, que se decompõem mais rapidamente, aliado à ação microbiana, mostra-se também como uma abordagem promissora, promovendo a redução da poluição e uma maior circularidade econômica. O estudo então conclui que investimentos em pesquisa e políticas públicas são essenciais para transformar o manejo de resíduos e fomentar o desenvolvimento de tecnologias biotecnológicas viáveis.

Palavras-chave: polímeros; biodegradação; sustentabilidade; microrganismos; reciclagem de plásticos.

ABSTRACT

Currently, polymers are widely used in various sectors, including consumer and industrial applications, playing an essential role in everyday human life. Since the early 20th century, research involving polymeric materials, both synthetic and natural, has expanded knowledge about their properties, driving technological advancements and revealing a wide range of applications for this type of material. However, the high consumption of synthetic polymers generates large amounts of waste, with low recycling rates and significant environmental impact. Global initiatives and the promotion of sustainable practices seek solutions to mitigate these effects, highlighting the importance of environmental education and the development of biodegradable materials. The biodegradation of plastics presents itself as a promising alternative, with research focused on accelerating their decomposition to reduce pollution and promote sustainability. This study addresses the challenges and advances in the biological degradation of plastics through a systematic integrative review, analyzing techniques and methods related to the action of microorganisms and specific enzymes within the time frame of 2015 to 2023. Data were collected from the Scopus and Web of Science databases, using the keywords "Degradation," "Plastic," and "Microbial" in studies conducted in China, the United States, and Brazil. The research also included a search for patents filed with the National Institute of Industrial Property (INPI). The findings reveal a growing academic and technological interest in sustainable solutions, highlighting the potential of bacteria, fungi, and yeasts in the decomposition of widely used polymers such as PET, PE, and PS. The analyzed studies also indicate that microbial consortia and enzymes promote the depolymerization and mineralization of waste. However, challenges persist for the practical application of biodegradation, such as the need for pretreatments and process adaptation on a large scale. On the other hand, the use of biodegradable plastics, which decompose more rapidly when combined with microbial action, also proves to be a promising approach, promoting pollution reduction and greater economic circularity. The study concludes that investments in research and public policies are essential to transform waste management and foster the development of viable biotechnological technologies.

Keywords: polymers; biodegradation; sustainability; microorganisms; plastic recycling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Três formas de representar a estrutura do polietileno: (a) um modelo sólido tridimensional, (b) um modelo tridimensional de "espaço", e (c) um modelo simples bidimensional……..... 21

Figura 2 - Representações esquemáticas de cadeias poliméricas (a) lineares, (b) ramificadas, (c) reticuladas e (d) em rede (tridimensionais) …… 23

Figura 3 - Imagem do site do Portal da Capes, exemplificando a realização das buscas pelas bases de dados, Scopus e Web of Science …..... 30

Figura 4 - Representação da pesquisa de patentes realizada no portal do INPI..... 31

Figura 5 - Fluxograma representativo da metodologia da pesquisa …….. 32

Figura 6 - Número de publicações encontradas que abordam a degradação biológica de plásticos nas bases de dados Scopus e Web of Science entre o período de 2015 a 2023 ….. 35

Figura 7 - Os países que mais publicaram sobre o tema “Degradation and Plastic and Microbial” nas bases de dados Scopus e Web of Science entre o período de 2015 a 2023 ……..... 36

Figura 8 - Os países que mais publicaram sobre o tema “Degradation and Plastic and Microbial” nas bases de dados Scopus e Web of Science entre o período de 2015 a 2023 ……..... 38

Figura 9 - Levantamento estatístico dos plásticos cuja degradação biológica mais estudada …….. 52

Figura 10 - Levantamento estatístico dos microrganismos mais envolvidos nos estudos 62

Figura 11 - Levantamento estatístico dos tipos de enzimas mais encontrados nos estudos…….. 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Levantamento dos trabalhos científicos, identificando o tipo de polímero, os microrganismos envolvidos, país de origem, ano de publicação e seus principais resultados 40

Tabela 2 - Levantamento das patentes analisadas 67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
COP26	Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MPs	Microplásticos
ONU	Organização das Nações Unidas
PCL	Policaprolactona
PBAT	Polibutileno adipato-co-tereftalato
PBS	Polibutileno succinato
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEA	Poliéster amídico
PEF	Polietileno furanoato
PEN	Polietileno naftalato
PET	Polietileno tereftalato
PLA	Ácido polilático
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano

PVC	Policloreto de vinila
PVOH	Álcool polivinílico
UN	Nações Unidas

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 16

2 **REFERENCIAL TEÓRICO** 21

2.1 POLÍMEROS 21

2.2 BIOPLÁSTICOS 25

2.3 DEGRADAÇÃO DE PLÁSTICOS 26

2.4 EDUCAÇÃO AMBIENTAL 28

3 METODOLOGIA 29

3.1 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO 30

3.2 CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO 30

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 35

5 CONCLUSÃO 77

7 REFERÊNCIAS 78

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os polímeros estão presentes em diversos aspectos da vida cotidiana, sendo utilizados desde a fabricação de utensílios domésticos e embalagens até a produção de materiais industriais, como tubulações e revestimentos de cabos elétricos. A pesquisa científica sobre polímeros teve início no começo do século XX, impulsionada pelo crescimento das indústrias de plásticos e borrachas. A estrutura e a química dos polímeros, inicialmente pouco compreendidas, foram formalizadas por Hermann Staudinger na década de 1920, quando ele propôs que os polímeros eram constituídos por grandes cadeias moleculares, as macromoléculas, unidas por ligações covalentes. Essa ideia, inicialmente recebida com ceticismo pela comunidade científica, consolidou-se após a descoberta dos processos de síntese de polímeros artificiais, como o nylon, em 1935, o que possibilitou diversos avanços tecnológicos e industriais. Desde então, os polímeros vêm desempenhando um papel crucial na vida contemporânea (Morawetz, 2014; Hess; Walker, 2021; Askeland; Wright, 2016).

Os polímeros sintéticos começaram a se destacar a partir de 1907, com o desenvolvimento da resina fenol-formaldeído, também conhecida como baquelite. Este material é utilizado até os dias atuais na fabricação de alças de panelas, botões de eletrodomésticos, rolamentos e como isolante, o que se deve principalmente devido à sua elevada resistência ao calor, dureza, baixa deformabilidade e baixa condutividade elétrica (Callister; Rethwisch, 2014). Desde então, os polímeros sintéticos se mantêm presentes tanto na produção quanto no consumo de produtos, onde a manufatura e a grande empregabilidade deste tipo de material também geram grandes quantidades de resíduos. Em especial os polímeros sintéticos com grande conformabilidade a partir do calor, conhecidos como plásticos, geram anualmente uma das maiores parcelas de resíduos não reciclados. A produção global de resíduos plásticos é alarmante, totalizando aproximadamente 6,3 bilhões de toneladas geradas até 2015, das quais apenas 9% foram recicladas (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Em comparação, materiais como papel e metais apresentam taxas de reciclagem significativamente mais elevadas, variando entre 40% e 60%. O plástico compõe cerca de 10% do total de resíduos sólidos globais e tem um impacto ambiental severo, com estimativas de que entre 5 e 13 milhões de toneladas de resíduos plásticos chegam

aos oceanos anualmente. A reciclagem de plásticos é um processo complexo, o que resulta em baixas taxas de reutilização e uma elevada acumulação em aterros e no meio ambiente. Diante desse cenário, o desenvolvimento de soluções eficazes para a reciclagem de plásticos é essencial, pois pode aumentar significativamente as taxas de reaproveitamento e, consequentemente, reduzir o acúmulo de resíduos plásticos (Brasil, 1999).

Em uma matéria feita pela Ciência: Jornal da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Barradas (2021) comunga que cada vez mais utilizamos materiais que tem em sua composição o plástico, e como ele faz parte do nosso cotidiano: “O celular ou computador que você está usando agora, a roupa que está vestindo, a embalagem da tele-entrega de comida que pediu ontem, a garrafa em que tomar água todos os dias, o painel do carro que usa para se locomover”. Sendo um tipo de material com muitas funcionalidades devido às suas características, os plásticos têm uma ampla gama de aplicações, podendo ser utilizados em produtos simples até equipamentos com tecnologia avançada. A alta versatilidade deste polímero fez com que ele fosse difundido mundialmente. Devido à sua produção e aplicação exaustiva, veio então, a grande problemática deste material, que é o acúmulo deste nos meios terrestres e aquáticos, aliado à sua longa durabilidade (Bissoli, 2021, p.13).

A crise ambiental decorrente da grande acumulação dos resíduos plásticos tem se intensificado de forma preocupante, principalmente devido ao consumo excessivo de recursos naturais e ao descarte inadequado destes materiais, que têm baixos valores de degradabilidade no meio ambiente. Governos em todo o mundo, em colaboração com instituições civis e acadêmicas, têm buscado enfrentar esse desafio em fóruns internacionais, como, por exemplo, as Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP), onde são debatidas alternativas para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover práticas mais sustentáveis. Sendo assim, a educação ambiental, tanto em espaços formais quanto informais, tem se destacado como uma ferramenta crucial para conscientizar a população sobre a importância do consumo responsável e da reciclagem, além de fomentar pesquisas voltadas à degradação dos plásticos (Conferencia das Nações Unidas, 2021). Essas iniciativas buscam não apenas mitigar os danos ambientais, mas também promover o

desenvolvimento de novos materiais biodegradáveis e acelerar os processos de decomposição desses resíduos no ambiente natural.

Os polímeros sintéticos advindos do petróleo, em função de uma combinação de fatores bióticos e abióticos, possuem baixa degradabilidade natural e, por este motivo, vem se acumulando cada vez mais no meio ambiente. Além disso, estes plásticos, ao se deteriorarem e se dividirem em partes menores, até o ponto de serem chamados de microplásticos (MPs) aumentam sua superfície de contato, culminando em uma maior contaminação do solo. Indo além, a produção destes tipos de materiais aumentou, o que, segundo Oliveira; Sousa (2019), intensificou a necessidade de consumo de produtos e serviços pela população, em resposta, as indústrias, para suprir esse aumento na demanda, causaram vários impactos ambientais devido aos métodos de produção insustentáveis adotados ao longo do tempo.

A degradação biológica de polímeros surge como uma alternativa promissora para a redução dos impactos ambientais causados pelo acúmulo de resíduos plásticos. Esse processo envolve a ação de microrganismos, como bactérias e fungos, que têm a capacidade de decompor determinados tipos de plásticos em condições adequadas (Abbasi, 2021). Pesquisas recentes demonstram que a introdução de polímeros biodegradáveis e a adaptação de plásticos convencionais, aumentando a sua susceptibilidade à degradação biológica, podem reduzir significativamente a quantidade de resíduos plásticos que se acumulam no meio ambiente (Luyt; Malik, 2019). Dessa forma, a aceleração da decomposição desses materiais oferece uma rota para diminuição dos índices de poluição, especialmente em ecossistemas marinhos e terrestres, onde a presença de plásticos é particularmente alta. Assim, o avanço na compreensão e aplicação da biodegradação dos plásticos pode ser uma ferramenta crucial no combate à crise de resíduos plásticos e na promoção de práticas mais sustentáveis.

Entre as diversas ações propostas por segmentos civis, autoridades e instituições acadêmicas, destaca-se o encontro de líderes internacionais na Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas COP26 (2021), organizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) e realizada em Glasgow, com o objetivo de firmar compromissos para a redução do uso de combustíveis fósseis e a promoção de práticas mais sustentáveis. Observa-se, também, um aumento

significativo no incentivo, por meio das mídias e redes sociais, de hábitos de consumo que respeitem o meio ambiente, com ênfase na priorização de produtos recicláveis. A educação ambiental, por sua vez, tem conquistado maior relevância tanto nos espaços formais de ensino quanto em ambientes extracurriculares, desempenhando um papel fundamental na conscientização sobre a sustentabilidade. Ademais, observa-se um crescimento substancial nas pesquisas acadêmicas e experimentos científicos que visam acelerar a degradação de materiais na natureza, com destaque para o plástico, cujo impacto ambiental é amplamente reconhecido (Drzyzga; Prieto, 2018).

Diversos trabalhos na literatura que utilizam revisões bibliográficas para contextualizar a relevância e o estado atual da pesquisa sobre a degradação biológica de polímeros. Zrimec *et al*. (2020), por exemplo, utiliza grandes bases de dados ambientais para identificar enzimas degradadoras de plásticos em microbiomas ao redor do mundo, correlacionando a presença dessas enzimas com as tendências globais de poluição por plásticos. Esse estudo oferece uma visão abrangente sobre a viabilidade da degradação biológica de plásticos em diferentes regiões e ecossistemas. Por outro lado, Lear *et al*. (2022) realiza uma análise sistemática da literatura para avaliar criticamente as evidências sobre a biodegradação de polímeros, destacando a eficácia limitada de microrganismos na degradação de plásticos comuns, como polietileno e polipropileno, enfatizando a necessidade de mais estudos para confirmar a viabilidade dessas soluções em escala global. Abbasi *et al*. (2021), por sua vez, foca em estudos experimentais, revisando trabalhos que investigam a ação de diversas espécies microbianas na degradação de plásticos e comparando a eficácia desses processos em diferentes condições ambientais, além de destacar a importância de pré-tratamentos nos polímeros para melhorar a biodegradabilidade.

Embora todos esses estudos adotem critérios rigorosos de inclusão e exclusão para selecionar artigos relevantes, nenhum deles oferece uma análise abrangente sobre a evolução histórica da pesquisa nessa área, ou sobre como o investimento em biodegradação de plásticos tem variado ao longo dos anos em diferentes regiões geográficas.Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a realizar uma pesquisa bibliográfica para identificar e analisar estudos que investigam a degradação microbiana de plásticos, descrevendo suas principais características e descobertas.

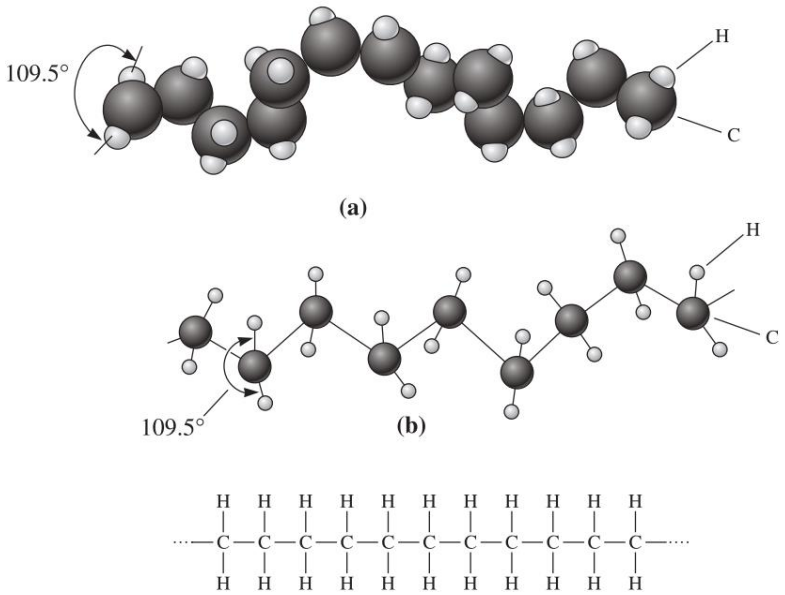
Considerando a importância dos plásticos em setores como o ambiental, biomédico, agrícola, veterinário e industrial, este estudo examina artigos de bases de dados científicas com o intuito de compreender as técnicas e métodos aplicados, além de identificar as tecnologias já patenteadas. Além disso, busca-se discutir como esses processos contribuem para a Educação Ambiental e para a construção de um planeta mais sustentável, promovendo soluções inovadoras para a problemática do acúmulo de plásticos no meio ambiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 POLÍMEROS

Polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de unidades menores chamados monômeros, unidas por ligações covalentes, como representado, de três maneiras diferentes, pela estrutura do polietileno (Figura 1). Eles podem ser naturais, como o algodão e a borracha, ou sintéticos, como os plásticos derivados do petróleo. Os polímeros possuem propriedades versáteis, como flexibilidade e resistência, o que permite seu uso em uma ampla gama de aplicações, desde embalagens até dispositivos tecnológicos. Sua composição e estrutura molecular influenciam diretamente suas características físicas, como durabilidade e biodegradabilidade, tornando-os essenciais, mas também um desafio ambiental devido à sua lenta degradação no ambiente (Askeland; Wright, 2016; Callister; Rethwisch, 2014).

Figura 1 - Três formas de representar a estrutura do polietileno: (a) um modelo sólido tridimensional, (b) um modelo tridimensional de "espaço", e (c) um modelo simples bidimensional.



Fonte: Askeland; Wright, 2016.

Os plásticos são fabricados a partir da polimerização de componentes encontrados em matérias primas naturais, como o petróleo e o gás natural. A polimerização é um processo químico no qual moléculas pequenas, chamadas de monômeros, chamadas monômeros, são unidas por ligações covalentes, formando macromoléculas em cadeias, conhecidas como polímeros. De acordo com Geyer; Jambeck e Law (2017), esse processo químico ocorre basicamente de três maneiras diferentes.

a) adição (Polimerização de Cadeia): Na polimerização de cadeia as ligações duplas dos monômeros são quebradas por algum tipo de iniciador, possibilitando que estes se liguem;
b) condensação (Polimerização em Etapas): Na condensação, os monômeros se ligam entre si pela eliminação de pequenas moléculas, até que se formam as cadeias poliméricas de comprimento desejado;

c) copolimerização: Por outro lado, existe a possibilidade de dois ou mais tipos de monômeros, formando assim um polímero, processo este que é chamado de copolimerização.

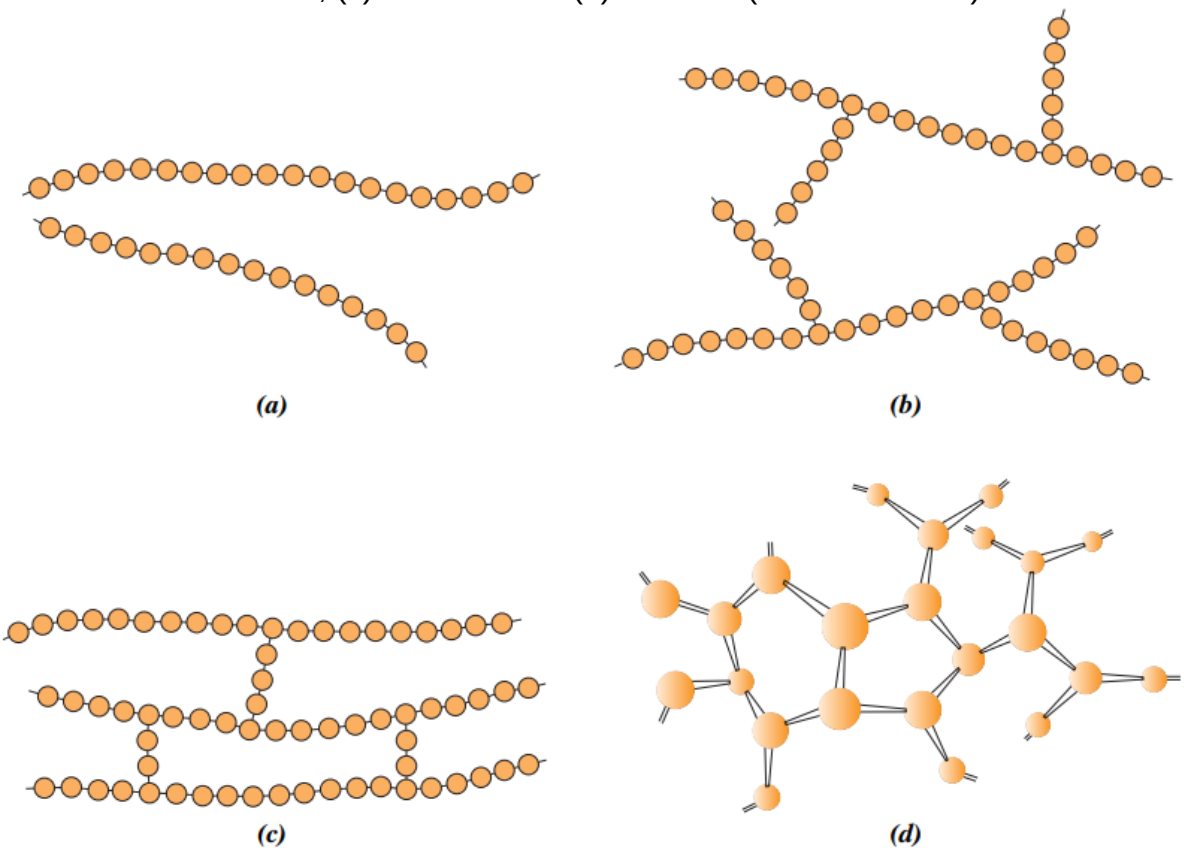
Existem vários aspectos na produção de polímeros que são controlados pelo método de polimerização e tratamentos pós-polimerização. Dessa forma, são necessárias formas de classificar estes tipos de materiais, e a primeira forma com que isso pode ser feito é a partir de sua origem. De acordo com a sua origem podem ser classificados como (Rabello, 2023; Canevarolo Jr., 2002).

d) naturais: aqueles encontrados normalmente na natureza, como por exemplo, a celulose, a borracha natural e proteínas;
e) sintéticos: polímeros produzidos em laboratório, sendo base principalmente de muitos materiais plásticos, como por exemplo, o polietileno, usado em embalagens, e o polipropileno, usado em produtos de consumo.

Além disso, os polímeros podem ser classificados de acordo com a estrutura de sua cadeia polimérica principal Rabello (2023); Canevarolo Jr. (2002). Assim, as cadeias poliméricas de um único polímero analisado, podem ser classificadas como – (ilustrado) na Figura 2 (Askeland; Wright, 2016; Callister; Rethwisch, 2014; Rabello, 2023; Canevarolo Jr., 2002):

f) lineares: cadeias caracterizadas por serem longas e contínuas, o que emprega aos polímeros de cadeias lineares uma boa flexibilidade e resistência à tração;
g) ramificadas: polímeros com cadeias ramificadas apresentam cadeias ligadas a uma cadeia principal, conferindo-lhes altos valores de capacidade térmica e deformabilidade;
h) reticuladas: polímeros formados por uma estrutura tridimensional, onde as cadeias poliméricas estão entrelaçadas e conectadas, também conferindo a este tipo de polímero altos valores de capacidade térmica e deformabilidade.

Figura 2 - Representações esquemáticas de cadeias poliméricas (a) lineares, (b) ramificadas, (c) reticuladas e (d) em rede (tridimensionais).



Fonte: Callister; Rethwisch, 2014.

2.2 BIOPLÁSTICOS

A crescente preocupação com o impacto ambiental causado pelo acúmulo de plásticos no meio ambiente tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis, capazes de mitigar esses efeitos negativos. Nesse contexto, os bioplásticos surgem como uma solução promissora, pois são produzidos a partir de fontes renováveis, como plantas, óleos vegetais e resíduos agrícolas, ao contrário dos plásticos convencionais, que são derivados de petróleo (Coppola *et al*., 2021).

Os bioplásticos apresentam um ciclo de vida que pode contribuir na redução das emissões de CO_2, uma vez que o carbono utilizado em sua produção provém de fontes renováveis. Essas fontes, como as plantas, absorvem dióxido de carbono da atmosfera durante o processo de crescimento, contribuindo para um balanço de carbono mais favorável quando comparado aos plásticos derivados de combustíveis fósseis (Gironi; Piemonte, 2011). Além disso, dependendo de sua composição, muitos bioplásticos são biodegradáveis. Isso significa que, em condições ambientais adequadas — como a presença de solo, água ou microrganismos —, eles podem se decompor naturalmente, ao contrário dos plásticos petroquímicos que persistem no meio ambiente por longos períodos (Emadian; Onay; Demirel, 2017).

Entre os benefícios adicionais dos bioplásticos estão a redução da dependência de combustíveis fósseis e a promoção da sustentabilidade, dado que esses materiais podem ser produzidos a partir de resíduos agrícolas ou subprodutos de outras indústrias, inserindo-se em um contexto de economia circular. Essa abordagem pode auxiliar na diminuição da pressão sobre recursos não renováveis e contribuir para a segurança energética em escala global (Melnyk *et al.,* 2019).

Entretanto, os bioplásticos também enfrentam uma série de desafios que dificultam sua adoção em larga escala. Um dos principais obstáculos é o custo de produção, que tende a ser mais elevado do que o dos plásticos derivados de petróleo. Esse aumento de custos decorre, em grande parte, da complexidade dos processos de produção e da infraestrutura limitada para o desenvolvimento desses materiais. Consequentemente, essa questão impacta diretamente na competitividade dos bioplásticos no mercado global.

Além do custo, outro fator limitante é o desempenho físico dos bioplásticos. Em comparaçãoaos plásticos convencionais, muitos biopolímeros apresentam propriedades mecânicas inferiores, como menor resistência térmica e fragilidade. Essas características tornam os bioplásticos inadequados para certas aplicações industriais que requerem materiais com maior durabilidade e resistência (Ibrahim *et al*., 2021). Dessa forma, embora os bioplásticos ofereçam vantagens ambientais importantes, sua implementação ainda exige avanços tecnológicos e econômicos para superar essas limitações e possibilitar uma adoção mais ampla.

Em síntese, os bioplásticos representam uma alternativa viável e ambientalmente favorável aos plásticos convencionais, com potencial de contribuir para a redução das emissões de carbono e da poluição plástica. No entanto, para que possam se consolidar como uma solução amplamente utilizada, ainda é necessário resolver desafios econômicos e técnicos relacionados à sua produção e desempenho.

2.3 DEGRADAÇÃO DE PLÁSTICOS

Um dos maiores focos da pesquisa em polímeros sintéticos atualmente é a relação de sua produção, propriedades e produção de resíduos. Em geral, o material tem uma taxa de degradação natural bem baixa, sendo assim necessárias intervenções para aumentá-la ou diminuir os impactos dos acúmulos de resíduos. Assim, com o objetivo de mitigar os impactos ambientais do acúmulo de resíduos plásticos, algumas formas de degradação de plásticos podem ser empregadas (Saalwächter, 2022; Fotopoulou; Karapanagioti, 2017; Faravelli et al., 2001; Singh; Sharma, 2008; Niki, 1972; Sun et al., 2022):

a) foto-oxidação: A exposição à luz ultravioleta (UV) causa a quebra das ligações químicas no polímero, resultando na formação de radicais livres. Este processo é frequentemente combinado com oxidação, o que leva à formação de grupos funcionais como cetonas, ésteres e ácidos. Polímeros como polietileno (PE) e polipropileno (PP) são mais suscetíveis a esse tipo de degradação, especialmente quando expostos à luz solar;

b) degradação térmica: Quando expostos ao calor, os plásticos sofrem decomposição térmica, que pode resultar na formação de produtos voláteis e na quebra das cadeias poliméricas. Este processo é amplamente utilizado em métodos de recuperação de energia e produtos químicos de resíduos plásticos, como no caso do poliestireno (PS);
c) degradação biológica: Envolve o uso de microrganismos que degradam os plásticos por meio de reações enzimáticas. Este processo é mais eficiente quando o plástico já passou por alguma forma de pré-degradação (como foto-oxidação), facilitando a ação microbiana. Plásticos como polietileno tereftalato (PET) e polietileno (PE) podem ser biodegradáveis em condições ambientais específicas;
d) degradação por oxidação térmica: Combinando calor e oxigênio, as cadeias poliméricas são quebradas devido à reação entre o oxigênio e as ligações químicas do polímero. Este processo ocorre em plásticos que possuem elevada exposição ao calor e oxigênio, como no caso de polímeros termoplásticos usados em altas temperaturas;
e) degradação mecânica: Envolve o uso de força física para quebrar o plástico em pedaços menores, o que aumenta a área superficial disponível para os processos de degradação fotoquímica ou biológica. Polímeros como PE e poliuretano termoplástico (TPU) têm uma degradação acelerada quando submetidos a abrasão mecânica combinada com radiação UV.

Segundo Pathak (2017), a biodegradação de polímeros por microrganismos envolve a alteração das propriedades químicas e físicas do material, pela quebra das cadeias poliméricas em moléculas menores, a absorção de tais moléculas e, por fim, culminando na produção de subprodutos como CO_2 e CH_4 . Esse processo pode ser realizado tanto em condições aeróbicas quanto anaeróbicas e é eficaz para polímeros naturais, como amido e celulose, e alguns sintéticos, como policaprolactona, desde que sua composição permita o ataque microbiano. A biodegradação com a ajuda de enzimas microbianas é uma abordagem promissora para reduzir o impacto ambiental dos plásticos.

2.4 EDUCAÇÃO AMBIENTAL

No contexto apresentado, a Educação Ambiental deve ser reconhecida como fundamental para enfrentar as crises ambientais e impulsionar o debate sobre novas formas de produção, utilização e reciclagem de produtos essenciais à vida cotidiana, mas que geram grandes quantidades de resíduos. Nesse sentido, a reflexão sobre a Educação Ambiental torna-se uma dimensão indispensável no debate sobre a sustentabilidade, compreendida como um sistema integrado que abrange os aspectos sociais, ambientais, econômicos, políticos, tecnológicos e ecológicos (Pelicioni; Castro, 2005).

A Educação Ambiental desempenha um papel central no enfrentamento dos desafios da sustentabilidade, ajudando a formar cidadãos conscientes e engajados com a preservação do meio ambiente. Ela promove o desenvolvimento de sociedades mais equilibradas e resilientes, ao considerar as particularidades culturais e históricas de cada região. O governo federal, por meio dos artigos 1º e 2º da Lei 9.795, de 27 de abril de 1999, estabelece diretrizes que reforçam a importância da educação ambiental como ferramenta para promover a conscientização e a responsabilidade ambiental:

> Art. 1o Entendem-se por educação ambiental os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade.
> Art. 2o A educação ambiental é um componente essencial e permanente da educação nacional, devendo estar presente, de forma articulada, em todos os níveis e modalidades do processo educativo, em caráter formal e não-formal (Brasil, 1999).

Entre as inúmeras ações propostas por diversos segmentos da sociedade civil, autoridades e instituições acadêmicas, destacamos o encontro de diferentes líderes mundiais na COP26, organizada pela ONU e realizada em Glasgow, com o objetivo de firmar acordos para a redução do uso de combustíveis fósseis e a adoção de práticas mais sustentáveis. Observa-se um aumento no incentivo, por meio de diversas mídias e redes sociais, para a adoção de hábitos e o consumo de produtos que respeitem o meio ambiente, com prioridade para aqueles recicláveis (Hamid *et*

al., 2017). Além disso, a educação ambiental tem ganhado maior destaque tanto nos espaços formais quanto nos contextos extraescolares. Também foi possível verificar o crescimento de estudos, experimentos e produções acadêmicas que buscam acelerar processos de degradação de materiais na natureza, com o plástico sendo um dos principais focos de investigação (Zhang *et al*., 2021).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa tem como principal objetivo um levantamento de artigos e patentes com o intuito de observar e analisar a evolução da pesquisa em degradação biológica de plásticos nos últimos 8 anos, entre 2015 a 2023. Para tanto, a abordagem utilizada foi mista, método qualiquantitativo, conforme descrita por Sandelowski (2000), a qual integra a coleta e análise de dados qualitativos e quantitativos, assim temos a construção dos dados de forma numérica e classificatória, e análise desses dados de forma estatística, o que subsidia a pesquisa quantitativa. Realizamos também a construção de dados caracterizando a pesquisa e posteriormente a análise de forma descritiva. Assim, após a filtragem por critérios de inclusão e exclusão específicos os quais serão descritos posteriormente.

Os dados utilizados foram coletados por meio de buscas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, amplamente reconhecidas por sua relevância internacional e pela vasta quantidade de trabalhos científicos que abrigam. Com o objetivo de garantir a atualidade do levantamento, as buscas foram inicialmente refinadas para incluir apenas trabalhos científicos publicados entre os anos de 2015 e 2023. As palavras-chave utilizadas foram "Degradation", "Plastic" e "Microbial", aplicadas de forma conjunta, utilizando o operador booleano "AND", de modo a restringir a pesquisa a trabalhos diretamente relacionados à biodegradação de polímeros.

Atualmente, entre os maiores geradores de resíduos plásticos estão os Estados Unidos da América (EUA) e a China, o que os coloca como foco principal de pesquisas voltadas para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do acúmulo de plásticos (Geyer; Jambeck; Law, 2020). Além disso, o Brasil também é um grande produtor de resíduos plásticos, e, devido à sua relevância geográfica, política, econômica e social, torna-se um objeto essencial de investigação para a presente

pesquisa (Pincelli *et al.* 2021). Com base nessas considerações, foram selecionados apenas trabalhos científicos publicados nos EUA, China e Brasil.

3.1 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO

Os critérios de inclusão da seleção dos estudos a serem investigados foram artigos e análises, encontrados nas duas bases de dados pesquisadas, Web of Science e Scopus, que fossem filtradas a partir das palavras chaves e período de tempos elencados e que a partir da leitura do título e resumo primeiramente e posteriormente a leitura aprofundada dos artigos que estivessem de acordo com os objetivos deste trabalho que abordam especificamente a degradação biológica e o tema sustentabilidade, que possam contribuir com a pesquisa.

3.2 CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

Como critérios de exclusão utilizamos documentos que não fossem artigos ou análises (a exemplo de teses, dissertações, capítulos de livros, …); artigos duplicados, estudos que não fossem realizados nos países selecionados para pesquisa, China, EUA e Brasil. Além disso, para confirmação desses critérios de inclusão, muitos trabalhos foram lidos na íntegra. Esse procedimento reduziu o número de trabalhos incluídos no presente estudo.

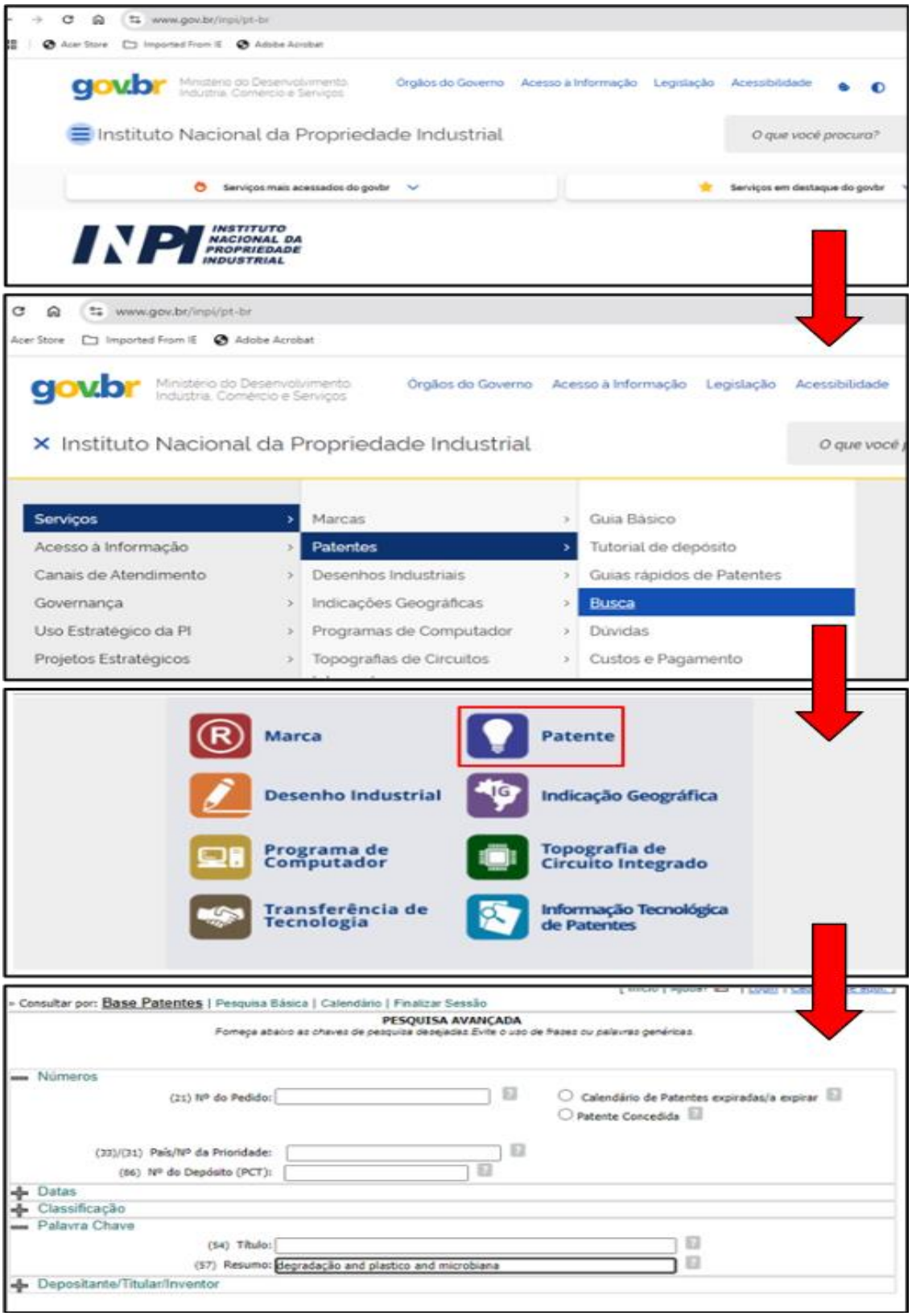
Além da análise de trabalhos científicos, a presente pesquisa incluiu uma busca por patentes depositadas no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), com o objetivo de verificar a existência de inovações tecnológicas relacionadas à degradação biológica de plásticos no Brasil. Conforme representado esquematicamente na Figura 4, a pesquisa por patentes foi realizada na base de dados do INPI, inicialmente utilizando as palavras-chave: "Degradação AND Plástico" e "*Degradation* AND *Plastic*". Ademais, o período de busca foi delimitado entre os anos de 2015 e 2023. Essa busca resultou em um total de 41 patentes. Após a leitura dos resumos e a aplicação dos critérios de inclusão previamente descritos, 37

patentes foram descartadas, resultando em uma seleção final de 4 patentes para análise futura.

Figura 3 - Imagem do site do Portal da Capes, exemplificando a realização das buscas pelas bases de dados, *Scopus* e *Web of Science*.

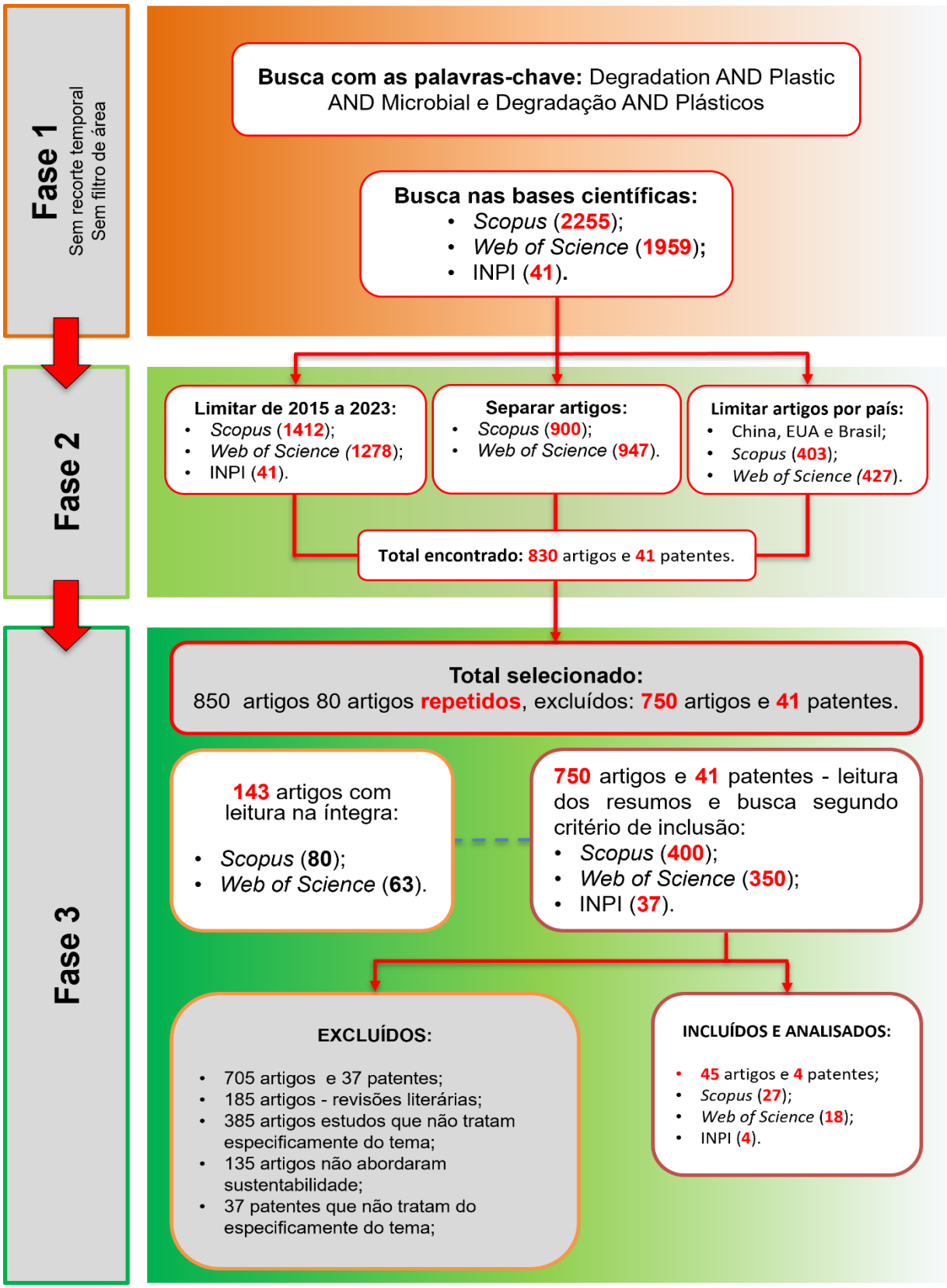
Fonte: Brasil, 2021.

Figura 4 - Representação da pesquisa de patentes realizada no portal do INPI.



Fonte**:** INPI, 2024.

Figura 5 - Fluxograma representativo da metodologia da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os trabalhos acadêmicos selecionados foram analisados qualitativamente por meio da leitura integral dos textos, estabelecendo conexões entre o conteúdo dos artigos e as particularidades da localidade e do contexto geopolítico contemporâneo. A análise qualitativa buscou identificar aspectos específicos relacionados às condições regionais e suas implicações no tema em estudo, as informações de cada trabalho foram sistematizadas com as seguintes retiradas dos estudos como: nome do artigo, tipo de polímero utilizado, tipo de microrganismo empregado, país de realização do estudo, ano, principais resultados. Paralelamente, a análise quantitativa foi conduzida utilizando o método da meta-análise. Foram seguidos rigorosos critérios de inclusão, os artigos foram filtrados a partir das palavras chaves e período de tempos, leitura do título e resumo primeiramente e posteriormente a leitura aprofundada de acordo com os objetivos deste trabalho, que abordam especificamente a degradação biológica e o tema sustentabilidade e os critérios de exclusão que excluíram os documentos que não fossem artigos ou análises, artigos duplicados, estudos que não fossem realizados nos países: China, EUA e Brasil. Realizado durante a seleção dos artigos e patentes, assegurando a validade científica e a relevância das fontes para os objetivos desta pesquisa. Segundo Shelby e Vaske (2008), a meta-análise é uma técnica quantitativa que permite sintetizar os resultados de múltiplos estudos de forma sistemática, com enfoque estatístico. Esse método possibilita uma integração dos dados provenientes de diferentes pesquisas, proporcionando maior precisão, robustez e confiabilidade aos resultados obtidos, ao permitir a comparação direta dos achados. Dessa forma, a meta-análise contribui para uma compreensão mais abrangente e fundamentada do tema investigado, oferecendo conclusões que podem ser generalizadas com maior segurança.

Para a análise quantitativa, os dados coletados foram organizados em uma planilha do Microsoft Excel, contendo as informações de cada trabalho: nome do artigo, tipo de polímero utilizado, tipo de microrganismo empregado, país de realização do estudo, ano, principais resultados. Além das seguintes informações para cada patente: nome da patente, microrganismo envolvido, ano e principais características da invenção.

Dessa forma, o processo metodológico utilizado garantiu a seleção criteriosa de fontes de alta qualidade e relevância, fundamentando os achados e discussões com base em uma ampla revisão de literatura e análise de inovações tecnológicas no campo da degradação de plásticos por microrganismos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

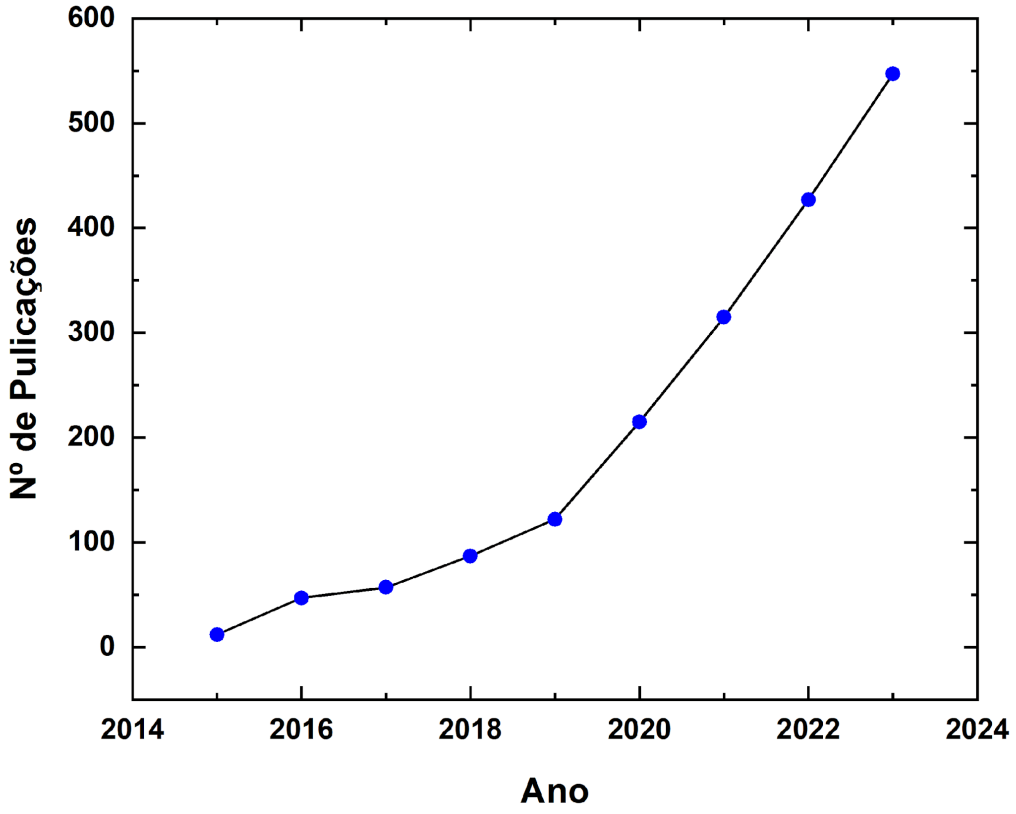
Os resultados foram obtidos a partir da busca nas bases de dados *Scopus e Web of Science* que sem filtros adicionais, resultou na identificação de 2.255 trabalhos na base de dados *Scopus* e 1.959 na *Web of Science*. Após a aplicação do filtro temporal, restringindo as publicações ao período entre 2015 e 2023, o número de artigos encontrados foi reduzido para 1.429 na *Scopus* e 1.247 na *Web of Science*. Posteriormente, a busca foi refinada para incluir apenas trabalhos completos, excluindo resumos, pôsteres de conferências, notas técnicas, entre outros tipos de publicações não integrais. Após essa etapa, o número de trabalhos selecionados foi reduzido para 900 na *Scopus* e 947 na *Web of Science*.

Com base nessas considerações, foram selecionados apenas trabalhos científicos publicados nos EUA, China e Brasil. A aplicação deste critério resultou na redução do número de estudos encontrados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* para 403 e 427, respectivamente, totalizando 830 trabalhos para análise posterior. Após a eliminação de duplicações entre as bases de dados, o número de artigos elegíveis foi reduzido para 750. O procedimento de busca e refinamento adotado neste estudo está representado esquematicamente na Figura 3. Os 750 trabalhos foram submetidos à leitura de seus respectivos resumos com o objetivo de verificar a presença dos seguintes critérios: foram analisados 45 artigos e 4 patentes.

Conforme discutido anteriormente, o consumo exacerbado de plásticos e a consequente geração de resíduos acarretam sérias implicações ambientais em escala global. Apesar das vastas aplicabilidades e utilidades que os polímeros sintéticos apresentam no contexto moderno, o descarte e o tratamento inadequados de seus resíduos exigem reconsideração urgente. Os métodos tradicionais de eliminação, como aterros e incineração, revelam-se insuficientes para atender às demandas

ambientais, sendo imperativo o desenvolvimento e a implementação de alternativas mais sustentáveis, capazes de mitigar os impactos desses materiais no meio ambiente. Dessa forma, a busca por soluções inovadoras, como a reciclagem avançada, a biodegradação e o uso de plásticos compostáveis, tem se intensificado, reforçando a necessidade de repensar a relação entre desenvolvimento tecnológico e sustentabilidade ambiental (Luyt; Malik, 2019).

Figura 6 - Número de publicações encontradas que abordam a degradação biológica de plásticos nas bases de dados *Scopus e Web of Science* entre o período de 2015 a 2023, na fase 1 da análise dos dados

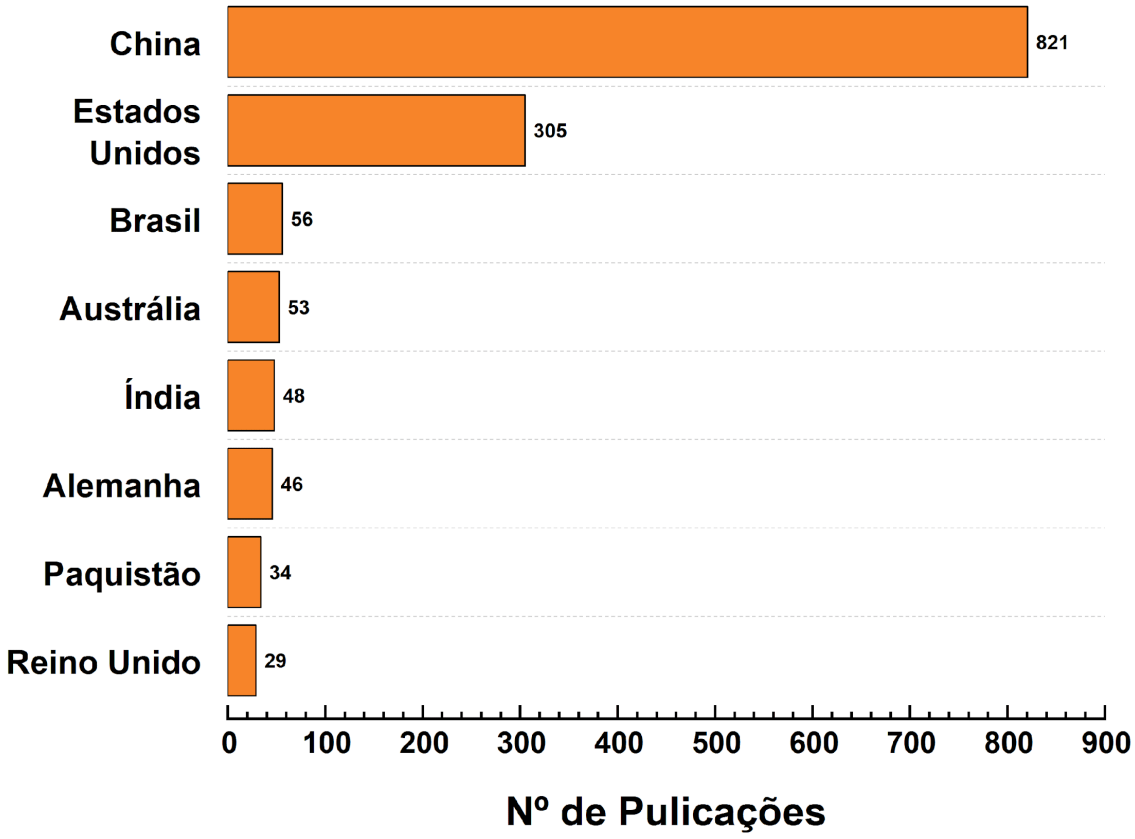


Fonte**:** Elaborado pela autora, 2024

A primeira etapa deste estudo é focada na meta-análise de dados primários relativos aos estudos selecionados, abrangendo, por exemplo, a quantidade de artigos publicados anualmente entre os anos de 2015 e 2023. A Figura 6 exibe os resultados obtidos ao agrupar os artigos conforme o ano de publicação, levando em conta publicações oriundas dos três países incluídos na investigação, dentro do período estipulado. Observa-se um aumento exponencial na quantidade anual de estudos

voltados para a degradação biológica de plásticos, sugerindo uma atenção crescente a esse tema ao longo dos anos. Esse crescimento no número de publicações não apenas evidencia o aumento do interesse acadêmico na área, mas também sinaliza o considerável potencial da degradação de polímeros por meio da ação de microrganismos, reforçando a relevância da biotecnologia como alternativa promissora para a mitigação dos impactos ambientais gerados por resíduos plásticos.

Figura 7 - Os países que mais publicaram sobre o tema “Degradation and Plastic and Microbial” nas bases de dados Scopus e Web of Science entre o período de 2015 a 2023, na fase 1 da análise dos dados



Fonte**:** Elaborado pela autora, 2024

Por outro lado, ao agrupar os dados extraídos das plataformas Scopus e Web of Science, no período de 2015 a 2023, e analisar a produção científica dos oito países com maior número de publicações sobre o tema pesquisado, verifica-se uma liderança

dividida entre a China e os Estados Unidos. A Figura 7 ilustra essa predominância, destacando que ambos os países lideram o ranking de produção científica relacionada à biodegradação de polímeros. Observa-se, ainda, que a China supera os Estados Unidos em aproximadamente 173%, consolidando-se como a principal contribuidora nessa área de pesquisa entre 2015 e 2023, evidenciando o crescente esforço científico do país em soluções sustentáveis para a gestão de resíduos plásticos.

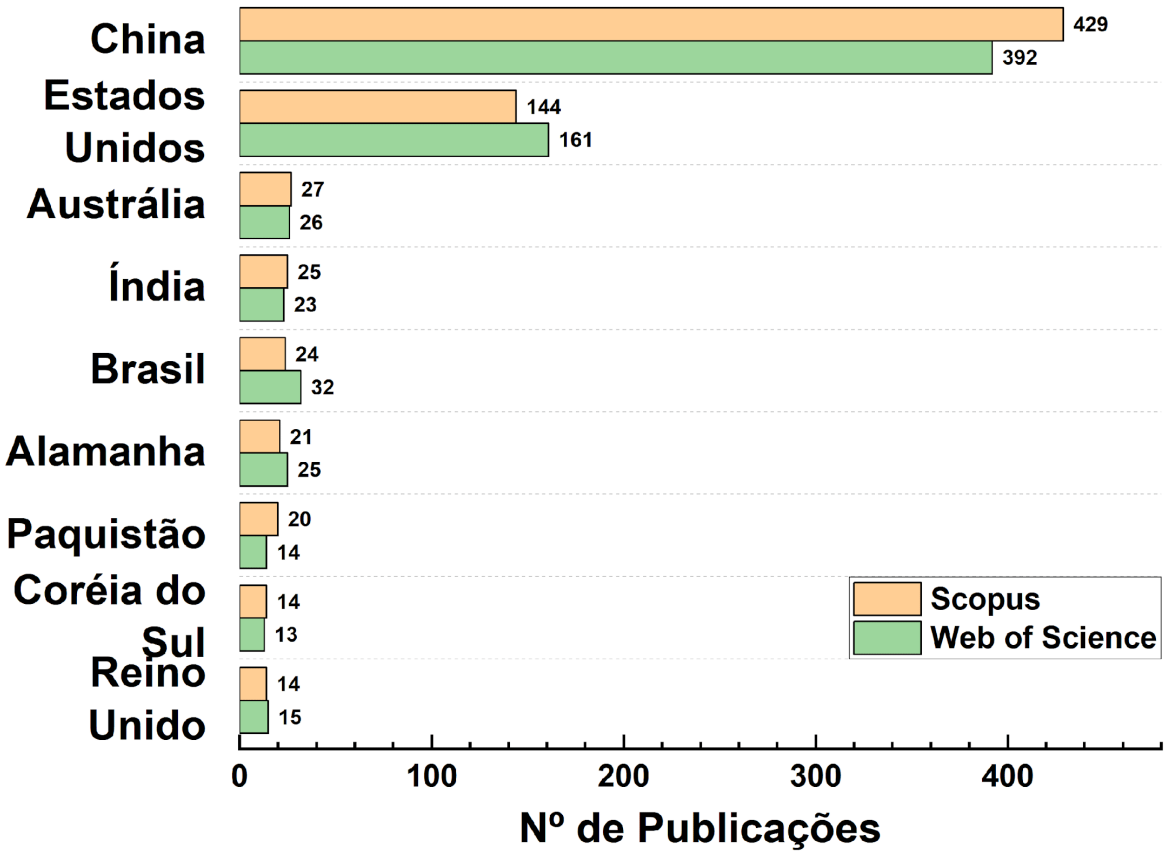
Estudos corroboram esse panorama Jiang *et al*. (2020) destaca que "A China é o maior produtor e consumidor de plásticos do mundo, representando quase um terço do fluxo global total". Da mesma forma, Chen *et al*. (2019) reiteram que "Como o maior produtor e consumidor de plásticos, a China também é o maior reciclador de resíduos plásticos". Esses dados indicam que o país não apenas lidera a pesquisa em biodegradação, mas também assume um papel proativo na reciclagem e gerenciamento de resíduos, reforçando sua posição como ator-chave em práticas de sustentabilidade ambiental.

Ademais, ao agrupar o número de trabalhos científicos por país e separar essa produção entre as bases de dados utilizadas, observa-se que a predominância da produção científica chinesa permanece evidente. A Figura 8 ilustra, ainda, a variação na produção científica dos países entre as diferentes bases de dados, revelando uma discrepância significativa entre os principais países produtores. Essa variação é especialmente notável entre os países líderes em publicações, indicando que o volume e a abrangência das pesquisas podem ser influenciados pela plataforma de indexação considerada. Essa diferenciação entre as bases de dados sugere uma possível especialização ou preferência de publicação dos países, o que pode impactar a visibilidade e o alcance global destes trabalhos.

Acompanhando a China na liderança da produção científica sobre biodegradação de polímeros, encontram-se os Estados Unidos, que também figuram entre os maiores produtores e consumidores de plástico em nível mundial. Conforme aponta Kan *et al*. (2023), os Estados Unidos ocupam a posição de segundo maior produtor e consumidor global de plásticos, além de serem o principal gerador de resíduos plásticos no planeta. Esse dado ressalta o impacto significativo dos EUA na questão dos resíduos e reforça a importância de seu papel na busca por soluções inovadoras e sustentáveis para a gestão de resíduos plásticos, incluindo o avanço na

pesquisa sobre biodegradação de polímeros e tecnologias de reciclagem. Essa contribuição científica, ao lado da liderança chinesa, evidencia o compromisso das duas nações com o enfrentamento dos desafios ambientais decorrentes do uso massivo de plásticos.

Figura 8 - Os países que mais publicaram sobre o tema “Degradation and Plastic and Microbial” nas bases de dados Scopus e Web of Science entre período de 2015 a 2023, na fase 2 da análise dos dados



Fonte**:** Elaborado pela autora, 2024

Em conformidade com a revisão realizada, a maioria dos estudos analisados apresenta resultados promissores na busca por alternativas sustentáveis que utilizam microrganismos para a degradação de polímeros. Diversas espécies bacterianas e fúngicas demonstraram a capacidade de degradar, de forma eficaz, polímeros naturais e sintéticos, o que potencialmente reduz os riscos ambientais e promove um uso mais sustentável do plástico (Pathak *et al*., 2017). Nesse contexto, a aplicação de

microrganismos e enzimas surge como uma abordagem promissora, possibilitando a quebra das cadeias poliméricas em subprodutos que podem ser metabolizados e reintegrados ao ambiente de maneira segura.

Grande parte dos estudos analisados avaliaram os processos de degradação de plásticos por microrganismos utilizando uma variedade de técnicas analíticas avançadas, como Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), para caracterizar os efeitos da degradação e os produtos resultantes. Essas técnicas possibilitaram uma análise detalhada das alterações físicas e químicas nas superfícies dos filmes plásticos, incluindo a formação de fissuras, buracos e a quebra de ligações estéricas, o que confirma as atividades degradadoras dos microrganismos. A aplicação dessas metodologias contribui para o entendimento do processo de biodegradação, fornecendo informações fundamentais para o desenvolvimento desta tecnologia.

Os dados coletados manualmente dos artigos revisados foram organizados em uma planilha, a fim de extrair informações relevantes sobre o conteúdo de cada estudo e possibilitar a subsequente realização de análises estatísticas dos resultados obtidos. Na sistematização das informações, conforme apresentado na Tabela 1, foram considerados os seguintes elementos: Título do artigo; Tipo de polímero; Tipo de microrganismo; País; Ano e Principais Resultados. Essa estrutura permitiu uma categorização consistente e detalhada dos estudos, facilitando a análise comparativa entre eles e fornecendo uma base sólida para a interpretação dos dados e a identificação de padrões relevantes na literatura sobre a degradação microbiana de polímeros

Tabela 1 – Levantamento dos trabalhos científicos, identificando o tipo de polímero, os microrganismos envolvidos, país de origem, ano de publicação e seus principais resultados

Artigo	Autor	Polímero	Microrganismos	País	Ano	Principais Resultados
Biodegradation of polyethylene terephthalate (PET) by diverse marine bacteria in deep-sea sediments.	ZHAO, S., Liu, R., Wang, J., Lv, S., Zhang, B., Dong, C.; Shao, Z.	PET	*Marinobacter*, *Thalassospira*, *Nocardioides e Alcanivorax*	China	2023	O estudo mostrou que após 30 dias de incubação com o consórcio de bactérias resultou em uma perda de peso do PET entre 1.3% e 1.8%.
Two-Step Chemo-Microbial Degradation of Post-Consumer Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Enabled by a Biomass-Waste Catalyst.	SHINGWEKAR, D., Laster, H., Kemp, H.; Mellies, J. L.	PET	Consórcio bacteriano *Pseudomonas* e *Bacillus*	Estados Unidos	2023	O estudo combinou um processo químico e microbiano criando uma sinergia e a utilização de um catalisador sustentável na fase inicial de degradação obteve uma taxa de 92% de sucesso.
Novel putative polyethylene terephthalate (PET) plastic degrading enzymes from the environmental metagenome.	KARUNATILLAKA, I., Jaroszewski, L; Godzik, A.	PET	Novas Enzimas PETases	Estados Unidos	2022	O estudo sugere que há um grande número de enzimas degradadoras de PET ainda não caracterizadas na natureza.

A marine bacterial community capable of degrading poly (ethylene terephthalate) and polyethylene.	GAO, Rongrong; SUN, Chaomin.	PET e PE	*Exiguobacterium* sp., *Halomonas sp. e Ochrobactrum* sp.	China	2021	O estudo identificou que a uma comunidade bacteriana marinha é capaz de colonizar e degradar tanto o PET quanto o PE.
Environmental Consortium Containing Pseudomonas and Bacillus Species Synergistically Degrades Polyethylene Terephthalate Plastic.	ROBERTS, C., Edwards, S., Vague, M., León-Zayas, R., Scheffer, H., Chan, G.; Mellies, J. L.	PET	*Pseudomonas* e *Bacillus*	Estados Unidos	2020	O estudo demonstrou que um consórcio de bactérias comuns do solo tem potencial de degradar o PET de forma sinérgica.
Draft Genome Sequences of Five Environmental Bacterial Isolates That Degrade Polyethylene Terephthalate Plastic.	LÉON-ZAYAS, R., Roberts, C., Vague, M.; Mellies, J. L.	PET	*Pseudomonas* spp. *Bacillus* spp.	Estados Unidos	2019	O estudo mostra que a utilização de consórcios bacterianos é mais eficaz do que o uso das cepas isoladas.
Selection and evaluation of microorganisms for biodegradation of agricultural plastic film.	ZHANG, J., Chen, J., Jia, R., Dun, Z., Wang, B., Hu, X.; Wang, Y.	PET	*Bacillus amyloliquefaciens* HK1	China	2018	Os resultados indicam que a cepa possui um potencial promissor para a degradação de plásticos agrícolas.

Polyethylene Terephthalate Degradation by Microalga Chlorella vulgaris Along with Pretreatment.	FALAH, W., Chen, F. J., Zeb, B. S., Hayat, M. T., Mahmood, Q., Ebadi, A.; Li, E. Z.	PET	Microalga Chlorella vulgaris j	China	2020	O estudo mostrou que o uso de um tratamento combinado físico-químico inicial gerou grupos funcionais que facilitaram a degradação do PET pela Chlorella vulgaris.
Thermophilic whole-cell degradation of polyethyleneterephthalate using engineered Clostridium thermocellum.	YAN, F., Wei, R., Cui, Q., Bornscheuer, U. T.;Liu, Y. J.	PET	*Clostridium thermocellum*	China	2021	O estudo mostrou viabilidade em usar a cepa modificada como um chassi microbiano para a degradação de PET em temperaturas elevadas.
Degradation of polyethylene particles by Trichoderma harzianum and recombinant laccase cloned from the strain.	RUAN, Y., Hu, F., Zhao, J., Li, Y., Ling, J., Cao, J.;Zhang, L.	PE	Fungo *Trichoderma harzianum* e a Lacase recombinante	China	2023	O estudo sugere que a capacidade de degradação do PE pelo fungo está relacionada à produção de uma enzima oxidativa.
Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) through application of indigenousstrain Alcaligenes faecalis ISJ128.	DEVI, D., Gupta, K. K., Chandra, H., Sharma,	PE	Bacteria *Alcaligenes faecalis* ISJ128	Brasil	2023	O estudo mostra que a cepa foi altamente eficaz na degradação do polietileno, com uma redução significativa (10,40%) do filme em apenas 60 dias.

	K. K., Sagar, K., Mori, E.;Mishra, A. P.					
Polyethylene Degradation by a Rhodococcous Strain Isolated from Naturally Weathered Plastic Waste Enrichment.	Tao, X., Ouyang, H., Zhou, A., Wang, D., Matlock, H., Morgan, J. S; Zhou, J.	PE	Bacteria *Rhodococcus* A34	Estados Unidos	2023	O estudo mostrou que a cepa conseguiu reduzir o peso do PE em 1%, após 30 dias de incubação, possui potencial porém é relativamente baixa.
Unique Raoultella species isolated from petroleum contaminated soil degrades polystyrene and polyethylene.	YUAN, Y., Liu, P., Zheng, Y., Li, Q., Bian, J., Liang, Q.; Qi, Q.	PE e PS	Bacteria *Raoultella* sp. DY2415	China	2023	O estudo mostrou que após 60 dias de incubação, a cepa conseguiu reduzir o peso do filme de PE irradiado com UV em 8% e do PS em 2%.
Degradation of polyethylene by Klebsiella pneumoniae Mk-1 isolated from soil.	ZHANG, X., Feng, X., Lin, Y., Gou, H., Zhang, Y.; Yang, L.	PE	*Klebsiella pneumoniae* Mk-1	China	2023	No estudo foi observamos uma taxa de perda de peso de 2,21% em 30 dias. Além disso, foi identificado uma enzima semelhante à lacase, KpMco, que desempenha um papel crucial na degradação do PE.

Biodegradation of low-density polyethylene plastic waste by a constructed tri-culture yeast consortium from wood-feeding termite: Degradation mechanism and pathway.	ELSAMAHY, T., Sun, J., Elsilk, S. E.; Ali, S. S.	LDPE	Consórcio de Leveduras (*Sterigmatomyces halophilus* SSA1575, *Meyerozyma guilliermondii* SSA1547 e *Meyerozyma caribbica* SSA1654).	China	2023	O consórcio de leveduras mostrou uma redução significativa na resistência à tração (TS) do LDPE em 63,4% e uma redução na massa de 33,2% após 45 dias. Mostrando efeitos mais significativos em comparação às cepas individuais.
Biodegradability of polyethylene by efficient bacteria from the guts of plastic-eating waxworms and investigation of its degradation mechanism.	ALI, S. S., Elsamahy, T., Zhu, D.;Sun, J.	PE	*Citrobacter freundii* e *Bacillus*	China	2023	Este estudo demonstra que bactérias isoladas do intestino de larvas de Achroia grisella podem degradar polietileno de forma eficaz.
Microbial degradation of low-density polyethylene by Exiguobacterium sp. strain LM-IK2 isolated from plastic dumped soil.	MAROOF, L., Khan, I., Hassan, H., Azam, S.; Khan, W.	LDPE	*Exiguobacterium* sp. cepa LM-IK2	China	2022	A cepa foi isolada de solo contaminado por plástico, por 90 dias em um meio sem carbono, e mostrou potencial para degradar o PE.

Biodegradation of polyethylene mulching films by a co-culture of Acinetobacter sp. strain NyZ450 and Bacillus sp. strain NyZ451 isolated from Tenebrio molitor larvae.	YIN, Chao-Fan; XU, Ying; ZHOU, Ning-Yi.	PE	*Acinetobacter* sp. NyZ450 e *Bacillus* sp. NyZ451	China	2020	O estudo mostrou que o consórcio bacteriano conseguiu remover cerca de 18% do PE após 30 dias de incubação.
Isolation of a polyethylene degrading Paenibacillus sp. from a landfll in Brazil.	BARDAJÍ, Danae Kala Rodríguez; FURLAN, João Pedro Rueda; STEHLING, Eliana Guedes.	PE	*Paenibacillus* sp	Brasil	2019	Foi observado que as sacolas tratadas quimicamente apresentaram uma perda de peso de 30,8%, enquanto as sacolas não tratadas 11,6%, em três meses de incubação.
Microbial colonization and degradation of polyethylene and biodegradable plastic bags in temperate fine-grained organic-rich marine sediments.	NAUENDORF, A., Krause, S., Bigalke, N. K., Gorb, E. V., Gorb, S. N., Haeckel, M.; Treude, T.	PE e PBs (COMP)	"Microrganismos Marinhos aeróbicos e anaeróbio (Não Denominados)"	Estados Unidos	2016	O estudo mostrou que as sacolas COMP são mais propensas à colonização microbiana do que as de PE. Porém não houve sinais de degradação durante o experimento de 100 dias em sedimentos marinhos.

Degradation of low-density polyethylene by the bacterium Rhodococcus sp. C-2 isolated from seawater.	RONG, Z., Ding, Z. H., Wu, Y. H.; Xu, Xue Wue.	PE	Bactéria *Rhodococcus* sp. C-2.	China	2023	O estudo mostrou uma degradação física significativa, com uma perda de peso de 11,23% após 30 dias.
Polyethylene mulching film degrading bacteria within the plastisphere: Co-culture of plastic degrading strains screened by bacterial community succession.	WANG, P., Liu, J., Han, S., Wang, Y., Duan, Y., Liu, T.;Lin, Y.	PE	*Rhodanobacter*, *Rhodopseudomonas*, *Hyphomicrobium e Microbacterium*	China	2022	O estudo abordou que cultivar bactérias em conjunto (co-cultura) demonstra ser mais eficaz do que o uso de cepas isoladas.
Biodegradation of low-density polyethylene by Microbulbifer hydrolyticus IRE-31.	LI, Z., Wei, R., Gao, M., Ren, Y., Yu, B., Nie, K..; Liu, L	LDPE	*Microbulbifer hydrolyticus* IRE-31	China	2020	O estudo indica que foram evidenciadas alterações morfológicas na superfície do polímero, indicando a capacidade da bactéria de degradar LDPE.
Brazilian Cerrado soil reveals an untapped microbial potential forunpretreated polyethylene biodegradation.	PEIXOTO, Julianna; SILVA, Luciano P.; KRÜGER, Ricardo H.	PE	*Comamonas, Delftia e Stenotrophomonas*	Brasil	2017	O estudo revela que nos solos do Cerrado Brasileiro há um potencial microbiano inexplorado para degradar o PE.

Microbial biofilm formation and community structure on low-density polyethylene microparticles in lake water microcosm.	GONG, M., Yang, G., Zhuang, L.; Zeng, E. Y.	PE-MPs	Proteobacteria, Bacteroidetes e Firmicutes,	China	2019	O estudo mostrou que a pré-irradiação UV das partículas de polietileno de baixa densidade (LDPE) aumentou significativamente a colonização microbiana.
Degradation of polypropylene by fungi Coniochaeta hoffmannii and Pleurostoma richardsiae.	PORTER , R., Cernosa, A., Fernández-Sanmartín, P., Cortizas, A. M., Aranda, E., Luo, Y.; Gostinčar, C.	PP	Fungos *Coniochaeta hoffmannii e Pleurostoma richardsiae*	Estados Unidos	2023	O estudo identificou que os fungos apresentam potencial para a biodegradação do plástico, utilizando o PP como fonte única de carbono. Porém, as enzimas envolvidas na degradação não foram identificadas.
Biodegradation of additive-free polypropylene by bacterial consortia enriched from the ocean and from the gut of Tenebrio molitor larvae.	XIAN, Z. N., Yin, C. F., Zheng, L., Zhou, N. Y.; Xu, Y.	PP	Consórcio de bactérias (não denominado).	China	2023	O estudo mostrou que a utilização de consórcios bacterianos de diferentes origens abre novas oportunidades para a biodegradação do plástico.
A Deep-Sea Bacterium Is Capable of Degrading Polyurethane.	GUI, Z., Liu, G., Liu, X., Cai, R., Liu, R.; Sun, C.	PU	Bacillus velezensis GUIA	China	2023	O estudo identificou a enzima Oxr-1, encontrada na cepa, como responsável pela degradação eficiente do PU.

Degradation of Recalcitrant Polyurethane and Xenobiotic Additives by a Selected Landfill Microbial Community and Its Biodegradative Potential Revealed by Proximity Ligation-Based Metagenomic Analysis.	GAYTÁN, I., Sánchez-Reyes, A., Burelo, M., Vargas-Suárez, M., Liachko, I., Press, M.; Loza-Tavera, H.	PU	Consórcio de bactérias (não denominado).	Estados Unidos	2020	O estudo mostra que a comunidade microbiana tem potencial para degradar tanto o PU, usando uma combinação de mecanismos de hidrólise e oxidação.
Biodegradation of polyurethane by the microbial consortia enriched from landfll.	SU, T., Zhang, T., Liu, P., Bian, J., Zheng, Y., Yuan, Y.; Qi, Q.	PU	*Pseudomonas*, *sphingomonas*, *Cupriavidus*, *pigmentiphaga*, *Acinetobacter*, *Comamonas acidovorams*	China	2023	O estudo revelou que os consórcios microbianos foram capazes de degradar filmes de PU em apenas 48 horas, houve mudanças físicas e químicas significativas nos filmes de PU.
Degradation of commercial biodegradable plastics and temporal dynamics of associated bacterial communities in soils: A microcosm study.	MENG, K., Teng, Y., Ren, W., Wang, B.; Geissen, V	PBs; PLA e PBAT	Consórcio de bactérias (não denominado).	China	2023	A pesquisa identificou que a degradação dos plásticos ocorreu em dois estágios, um rápido durante os primeiros 30 dias, e outro de 360 dias. Essa descoberta é significativa, pois sugere que os componentes mais facilmente biodegradáveis, como o amido, são

						degradados primeiro, enquanto os polímeros mais resistentes, como PLA e PBAT, demoram mais para se degradar.
Microplastics removal in the aquatic environment via fungal pelletization.	WANG, H., Neal, B., White, B., Nelson, B., Lai, J., Long, B.; Dai, S. Y.	PS-MPs e PMMA	*Bjerkandera adusta (B. adusta), Phanerochaete chrysosporium (P. chrysosporium) e Aspergillus niger* (A. niger).	Estados Unidos	2023	O estudo constatou que as cepas fúngicas testadas foram capazes de formar pellets que agregaram microplásticos de maneira eficiente, removendo uma fração significativa dessas partículas do ambiente aquático.
Biodegradation of bisphenol-A polycarbonate plastic by Pseudoxanthomonas sp. strain NyZ600.	YUE, W., Yin, C. F., Sun, L., Zhang, J., Xu, Y.; Zhou, N. Y.	PC	*Pseudoxanthomonas* sp. NyZ600	China	2021	O estudo mostrou que a cepa degradou PC em um período de 30 dias, formando "pits de corrosão" na superfície e produzindo bisfenol A e 4-cumilfenol.

A polystyrene-degrading Acinetobacter bacterium isolated from the larvae of Tribolium castaneum.	WANG, Z., Xin, X., Shi, X.; Zhang, Y.	PS	Acinetobacter sp. AnTc-1.	China	2020	O estudo mostrou que a bactéria reduziu em 12,14% a massa do PS em 60 dias, abrindo portas para mais pesquisas sobre o uso de bactérias intestinais de insetos como fonte de microrganismos capazes de degradar plásticos resistentes.
Biodegradation of Polystyrene by Dark (Tenebrio obscurus) and Yellow (Tenebrio molitor) Mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae).	PENG, B. Y., Su, Y., Chen, Z., Chen, J., Zhou, X., Benbow, M. E.; Zhang, Y.	PS	Microorganismos da Larvas de *Tenebrio molitor* , *Coleoptera: Tenebrionidae*	Estados Unidos	2019	O estudo mostrou que T. obscurus possui uma capacidade superior de degradação de PS em comparação com T. molitor.
Degradation of polyvinyl chloride by a bacterial consortium enriched from the gut of Tenebrio molitor larvae.	XU, Y., Xian, Z. N., Yue, W., Yin, C. F.; Zhou, N. Y.	PVC	Consórcio bacterianas (não denominado)	China	2023	O consórcio bacteriano proveniente da microbiota intestinal das larvas de Tenebrio molitor demonstrou eficiência na biodegradação do PVC sem aditivos, reduzindo sua massa em 6,13% após 30 dias de incubação.

Biodegradation of PCL and PVC: Chaetomium globosum (ATCC 16021) activity.	VIVI, Viviane Karolina; MARTINS-FRANCHETTI, Sandra Mara; ATTILI-ANGELIS, Derlene	PCL e PVC	*Aspergillus brasiliensis* , *Penicillium funiculosum, Chaetomium globosum, Trichoderma virens e Paecilomyces variotii*	Brasil	2019	O estudo mostrou que após 28 dias de incubação, foi observada uma perda de massa de até 75% no PCL, enquanto no PVC não houve mudanças durante o mesmo período.
Enhancing microplastics biodegradation during composting using livestock manure biochar.	SUN, Y., Shaheen, S. M., Ali, E. F., Abdelrahman, H., Sarkar, B., Song, H.; Wang, Q.	PHA-MPs.	*Bacillus, Thermobacillus*, Firmicutes e Proteobacteria.	China	2022	O estudo mostrou que a adição de biochar de esterco de gado promoveu uma taxa de degradação de 71% em comparação à mistura sem adição do esterco durante o processo de compostagem.
Biodegradation of poly (vinyl alcohol) by an orychophragmus rhizosphere associated fungus Penicillium brevicompactum OVR 5, and its proposed PVA biodegradation pathway.	MOHAMED, H., Shah, A. M., Nazir, Y., Naz, T., Nosheen, S.; Song, Y.	PVA	Fungo *Penicillium brevicompactum* OVR-5.	China	2022	O estudo mostrou que o fungo apresentou uma taxa de remoção de 81% após 10 dias de incubação a 28 °C. Os resultados indicaram produção de enzimas, essenciais para a degradação do PVA.

Enhancing the biodegradation rate of poly(lactic acid) films and PLA bio-nanocomposites in simulated composting through bioaugmentation.	CASTRO-AGUIRRE, E., Auras, R., Selke, S., Rubino, M.; Marsh, T.	PLA e PBAT	*Geobacillus thermoleovorans*	Estados Unidos	2018	O estudo mostra que a bioaumentação com a adição da cepa reduziu significativamente o tempo de degradação e aumentou a produção de CO_2 nas fases iniciais de compostagem.
Biochemical and Structural Insights into Enzymatic Depolymerization of Polylactic Acid and Other Polyesters by Microbial Carboxylesterases.	HAJIGHASEMI, M., Nocek, B. P., Tchigvintsev, A., Brown, G., Flick, R., Xu, X.; Yakunin, A. F.	PLA	*Alcanivorax borkumensis e Rhodopseudomonas palustris*	Estados Unidos	2016	O estudo destaca avanços importantes na identificação e caracterização de enzimas microbianas e seu potencial biotecnológico para transformar resíduos plásticos em recursos reutilizáveis.
Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO_2 and microbial biomass.	ZUMSTEIN, M. T., Schintlmeister, A., Nelson, T. F., Baumgartner, R.,	PBAT	Fungo *Rhizopus oryzae*	Estados Unidos	2018	O estudo mostrou que o PBAT foi decomposto por microrganismos no solo, liberando CO_2 e incorporando o carbono do polímero na biomassa microbiana.

	Woebken, D., Wagner, M.; Sander, M.					
Psychrobacter species enrichment as potential microplastic degrader and the putative biodegradation mechanism in Shenzhen Bay sediment, China.	OU, D., Ni, Y., Li, W., He, W., Wang, L., Huang, H.; Pan, Z.	MPs	*Psychrobacter*	China	2024	O estudo mostrou uma degradação física significativa, com uma perda de peso de 11,23% após 30 dias.
Biodeterioration of Microplastics by Bacteria Isolated from Mangrove Sediment.	REN, Shu-Yan; NI, Hong-Gang.	PA; PBS; PCL; PE; PHA;PHB; PLA; PP; PS; PVA e PVC.	*Pseudomonas sp.*, *Pandoraea* sp. e *Dyella* sp.	China	2023	As cepas desempenham papéis significativos na biodegradação de diversos polímeros plásticos por meio da produção de enzimas específicas.
Microbial Consortia and Mixed Plastic Waste: Pangenomic Analysis Reveals Potential for Degradation of Multiple Plastic Types via Previously Identified PET Degrading Bacteria	EDWARDS, S., León-Zayas, R., Ditter, R., Laster, H., Sheehan, G.,	PET e outros.	Pseudomonas e Bacillus	China	2022	O artigo sugere que consórcios microbianos têm potencial para a biodegradação de diferentes tipos de plásticos, incluindo PET.

	Anderson, O.; Mellies, J. L.

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

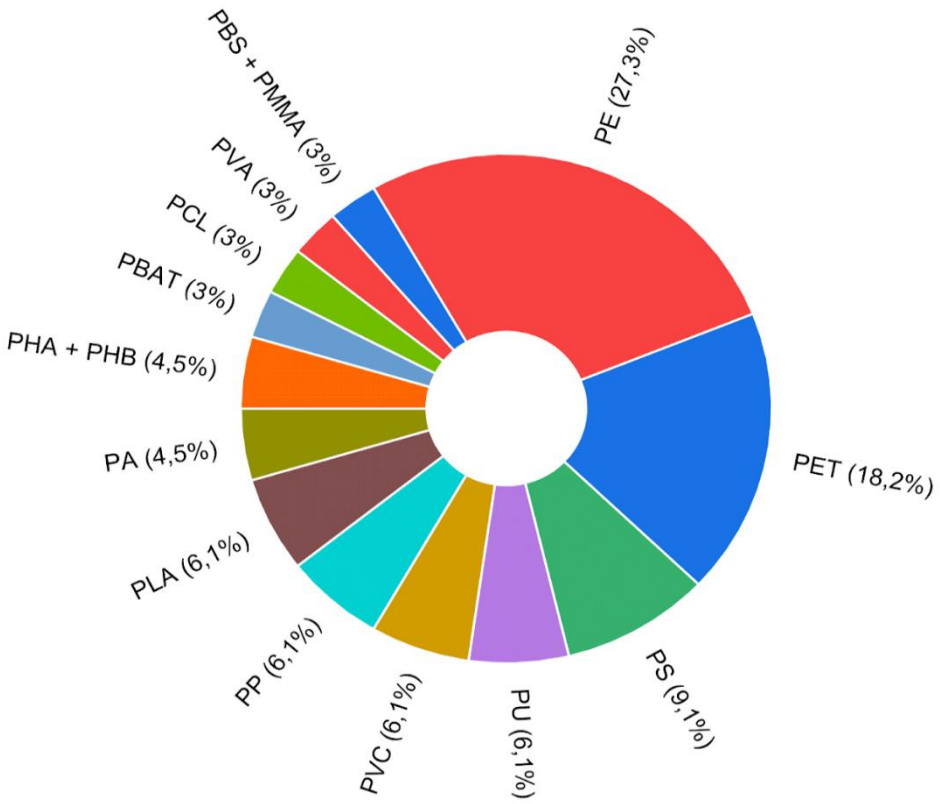
Inicialmente, a revisão evidenciou que, em geral, os plásticos mais amplamente utilizados apresentam alta resistência à degradação ambiental, contribuindo, assim, para o agravamento da poluição. Em contrapartida, a biodegradação desses plásticos é fortemente influenciada pela ação conjunta de fatores bióticos e abióticos. Entre os fatores abióticos, destacam-se as chuvas, a exposição à radiação UV, os ventos e outras condições ambientais, que atuam como catalisadores no processo de biodegradação. Esses fatores podem, inclusive, atuar diretamente na fragmentação do material plástico, aumentando a superfície de contato e permitindo uma interação enzimática mais eficaz, promovida pela ação dos microrganismos, o que intensifica os processos de despolimerização. Como subprodutos desse processo, ocorrem a liberação de gases, como dióxido de carbono, e a formação de água, sais e outros íons, contribuindo para a mineralização do plástico e reduzindo sua persistência no ambiente (Pathak, 2021).

A análise dos estudos agrupados de acordo com o tipo de plástico investigado revela uma predominância de pesquisas focadas em plásticos amplamente utilizados. Conforme apresentado na Figura 9, observa-se uma expressiva concentração de estudos sobre a biodegradação de Tereftalato de Polietileno (PET), Polietileno (PE) e Poliestireno (PS). Esses materiais, apesar de sua origem petroquímica comum, caracterizam-se por sua alta resistência à biodegradação, o que dificulta a sua decomposição no ambiente. A escolha desses materiais como foco principal dos estudos reflete a urgência em encontrar soluções para a degradação de plásticos de uso massivo e de grande impacto ambiental, uma vez que esses polímeros representam uma parcela considerável dos resíduos plásticos acumulados no ambiente.

Austin *et al*. (2018) destacam que o Tereftalato de Polietileno (PET) é um dos plásticos mais amplamente produzidos mundialmente e, simultaneamente, um dos que mais se acumulam no meio ambiente. Esse acúmulo ocorre principalmente devido à sua alta resistência à biodegradação, o que possibilita sua permanência no ambiente por séculos. Em contrapartida, estudos recentes de Zhao *et al.* (2023), Gao; Sun (2021), Roberts *et al*. (2020), León-Zayas *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2018) abordam

essa problemática, explorando a degradação biológica de plásticos como uma alternativa viável para reduzir o acúmulo desses resíduos. Esses autores investigam o uso de microrganismos e enzimas específicas capazes de quebrar as cadeias poliméricas do PET, oferecendo uma solução promissora para mitigar os impactos ambientais associados ao acúmulo de plásticos de alta durabilidade.

Figura 9 – Levantamento estatístico dos plásticos que mais apareceram na fase final nos estudos selecionados para revisão cuja degradação biológica foi usada



Fonte: Elaborada pela autora, 2024

Diversos estudos ressaltam o uso extensivo do polietileno (PE) e suas implicações ambientais mencionando- o como um dos plásticos mais comuns mundialmente. Quando descartado no ambiente, este polímero se mostra altamente resistente à degradação natural. Embora o polietileno apresente uma estrutura química inerte que dificulta sua degradação biológica, alguns estudos indicam que a

oxidação inicial promovida por enzimas, como as lacases, pode facilitar o processo de degradação microbiana, tornando o material mais suscetível à ação de microrganismos (Ruan *et al*., 2023). Esses achados sugerem que a aplicação de enzimas específicas pode ser uma estratégia promissora para mitigar o impacto ambiental desse polímero de ampla utilização.

O estudo de Devi (2023) analisa o processo de degradação do polietileno (PE) por meio da ação de uma bactéria nativa. A partir de um filme de PE previamente degradado e enterrado em um local de descarte de resíduos plásticos, foi isolada a bactéria *Alcaligenes faecalis* (cepa ISJ128). A atuação desse microrganismo demonstrou alta eficácia na produção de enzimas específicas para a quebra das longas cadeias poliméricas características do PE. Além disso, o estudo destaca que o uso de cepas nativas apresenta vantagens significativas, pois esses microrganismos são adaptados ao ambiente local e, portanto, podem realizar a degradação de forma mais eficiente.

O estudo de Yuan *et al*. (2023) apresentou resultados positivos quanto à redução do peso do polietileno (PE) por meio da biodegradação. Em contrapartida, Tao *et al*. (2023) observou uma menor taxa de degradação do PE resultante da ação de microrganismos. Ainda assim, ambos os autores sugerem que a taxa de degradação de polímeros sob a ação microbiana pode ser acelerada com o pré-tratamento do material, como a foto-oxidação, e com a utilização de múltiplas cepas. Corroborando essa ideia, Roberts *et al.* (2020) e León-Zayas *et al.* (2019) demonstraram maior eficiência na biodegradação de polímeros por meio de consórcios bacterianos, em comparação com o uso isolado das cepas, destacando a atuação sinérgica entre os microrganismos. Esses estudos empregaram pré-tratamento com radiação UV para intensificar a eficiência da degradação. No entanto, embora o pré-tratamento tenha melhorado os resultados em ambos os casos, sua necessidade pode limitar a aplicabilidade prática da tecnologia, especialmente em contextos em que o pré-tratamento não é viável, tornando o processo menos eficiente e mais oneroso.

O estudo de Zhang *et al*. (2023) identificou um gene de oxidase multicobre semelhante à lacase, o qual desempenhou um papel fundamental na degradação do polietileno (PE), apresentando uma taxa de degradação significativa. De forma geral, as pesquisas têm se mostrado inovadoras ao isolar e caracterizar cepas bacterianas capazes de degradar o PE. Considerando a crescente preocupação global com a poluição causada por plásticos, a descoberta de métodos biológicos eficientes para o manejo desses materiais torna-se extremamente relevante, oferecendo uma alternativa promissora para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte de plásticos.

O estudo de Peixoto, Silva e Krüger (2017) trouxe uma contribuição significativa para a pesquisa sobre degradação biológica de plásticos, ao demonstrar o potencial do solo do Cerrado brasileiro como habitat de microrganismos capazes de degradar polietileno (PE). A pesquisa identificou cepas bacterianas que utilizam o PE como fonte primária de carbono, sugerindo uma elevada capacidade de adaptação e sobrevivência desses microrganismos em ambientes contaminados por resíduos plásticos. Esse achado reforça o potencial do Cerrado como uma fonte natural de microrganismos degradadores de polímeros.

Complementando essa linha de pesquisa, Maroof, Khan e Hassan (2022) isolou a cepa LM-IK2 a partir de um solo contaminado por plásticos, demonstrando que esse microrganismo apresenta uma expressiva capacidade de degradação do PE, também utilizando o polímero como fonte primária de energia. Esses resultados sugerem que a biodiversidade microbiana de solos impactados por resíduos plásticos pode oferecer uma alternativa promissora para a biorremediação, especialmente em áreas onde os polímeros se acumulam em grandes quantidades.

O aumento da produção global de plásticos resulta em um crescimento alarmante da poluição por microplásticos (MPs), que são, em geral, partículas com dimensões inferiores a 5 mm (Ou *et al.*, 2023). O estudo de Ou (2023) ainda evidencia que certas espécies de Psychrobacter possuem um elevado potencial para a biodegradação de MPs em sedimentos marinhos. A identificação de enzimas-chave envolvidas nesse processo de degradação é um avanço significativo, pois permite

uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos microbianos de remoção de partículas plásticas do ambiente.

Em outro estudo, Gong *et al.* (2019) demonstra que MPs de polietileno (PE) em ambientes de água doce são rapidamente colonizadas por microrganismos, o que resulta na formação de biofilmes. Esse processo sugere que as partículas de MP atuam como "ilhas microscópicas," facilitando o desenvolvimento de biofilmes. Além disso, essas partículas podem servir como veículos para a dispersão de microrganismos, incluindo patógenos, no ecossistema aquático, o que representa sérias implicações ecológicas para espécies que ingerem essas partículas. A capacidade dos MPs de dispersar microrganismos patogênicos acarreta potenciais riscos para a biodiversidade e para a saúde dos ecossistemas aquáticos, enfatizando a necessidade de mais pesquisas sobre os impactos de MPs e o desenvolvimento de métodos eficazes de mitigação.

Indo além, o estudo de Ren e Ni (2023) realizou uma investigação aprofundada sobre a biodeterioração de microplásticos (MPs), apresentando uma contribuição relevante para o campo da biodegradação ambiental. A pesquisa identificou bactérias com capacidade de degradar uma variedade de 11 tipos diferentes de MPs, utilizando a produção de enzimas específicas para realizar esse processo. Esse achado oferece uma solução potencialmente ecológica para enfrentar um problema ambiental contemporâneo e urgente, possibilitando o desenvolvimento de estratégias biotecnológicas que visam à redução do acúmulo de microplásticos no ambiente e à mitigação dos impactos desses poluentes em ecossistemas naturais.

A presença de resíduos plásticos em ambientes marinhos levanta consideráveis preocupações ambientais, e a identificação de microrganismos capazes de degradá-los surge como uma alternativa promissora para a mitigação desse problema. Zhao e*t al*. (2023) aborda em seu estudo a capacidade de diferentes bactérias presentes em ambientes marinhos de degradar o politereftalato de etileno (PET), destacando seu potencial na redução de poluentes plásticos. Complementando esses achados, Gao; Sun (2021) identificou uma comunidade bacteriana com capacidade de degradar tanto o PET quanto o polietileno (PE), demonstrando a

versatilidade de microrganismos marinhos na biodegradação de polímeros variados. Em outra investigação, Gui *et al*. (2023) evidenciou a atuação de uma cepa da bactéria Bacillus velezensis GUIA, que degrada o poliuretano (PU) a partir da ação da enzima oxidativa Oxr-1. Além disso, estudos conduzidos por Rong *et al*. (2023) e Li *et al.* (2020) identificaram as espécies bacterianas Rhodococcus sp. C-2 e Microbulbifer hydrolyticus IRE-3, respectivamente, com capacidade de despolimerizar plásticos comuns em ambientes marinhos, como o PU. Observou-se também que as bactérias, de modo geral, apresentam superioridade na degradação do polietileno de baixa densidade (LDPE) em comparação com outros microrganismos, com resultados promissores na identificação de microrganismos e enzimas específicas que podem contribuir de forma efetiva para a redução da poluição plástica nos oceanos.

Os estudos de Elsamahy (2023) e Ali *et al*. (2022), trouxeram algo inovador ao investigar consórcios de leveduras do intestino de cupins que se alimentam de madeira e bactérias isoladas do intestino da larva de *Achroia grisella*, além de uma espécie de inseto conhecida por se alimentar-se de plástico, capazes de degradar o PE. Explorando a sinergia entre diferentes espécies para potencializar a degradação do plástico, ambos os estudos mostraram uma redução significativa do PE, resultados promissores, considerando que o PE altamente resistente e recalcitrante.

Outros estudos de Yin, Xu e Zhou (2020), Peng *et al*. (2019) e de Xian *et al*. (2023), trazem uma abordagem inovadora na busca de soluções biológicas para a degradação de plásticos através da utilização de um consórcio de bactérias isoladas do intestino de larvas de *Tenebrio molitor.* Yin, Xu e Zhou (2020) realizou uma descoberta significativa ao identificar um consórcio bacteriano capaz de degradar de forma eficiente o polietileno (PE) em condições laboratoriais. O estudo sugere que estratégias similares podem ser adaptadas e aplicadas em ambientes naturais, indicando que a cooperação entre diferentes cepas bacterianas potencializa a degradação de filmes de PE. Por outro lado, o trabalho de Peng *et al*. (2019) traz uma comparação da eficiência de degradação do PS a partir da ação das larvas de *Tenebrio obscurus* e *Tenebrio molitor.* Os resultados mostraram que *T. obscurus* possui uma capacidade superior de degradação de PS em comparação com *T.*

molitor. Essa descoberta aponta que a capacidade biodegradativa pode ser uma característica comum entre membros do gênero *Tenebrio*, o que amplia o potencial de sua aplicação biotecnológica. Já o autor Xian (2023) conduziu um estudo em que utilizou dois tipos distintos de consórcios bacterianos para analisar a capacidade de degradação do polipropileno (PP). Um dos consórcios foi obtido de um ambiente marinho, enquanto o outro foi isolado do intestino de larvas de Tenebrio molitor. A diversidade dos ambientes de origem permitiu a exploração de diferentes tipos de bactérias com potencial de degradação de polímeros em condições variadas, proporcionando uma perspectiva promissora para aplicações em contextos ambientais distintos. Os resultados mostraram que ambos os consórcios bacterianos foram eficazes na degradação do PP, destacando a importância de estratégias adaptativas e diversificadas para o manejo sustentável de resíduos plásticos.

Wang *et al.* (2020), em seu estudo, trouxe uma descoberta significativa. O autor mostra que a cepa de *Acinetobacter* isolada do intestino de *Tribolium castaneum* tem potencial de degradar PS, que é um dos plásticos mais amplamente utilizados e mais resistentes à biodegradação. Seu estudo também investigou o impacto da alimentação com PS no microbioma intestinal das larvas de *T. castaneum*, observando mudanças na microbiota, com aumento de bactérias associadas à degradação de hidrocarbonetos. Correlatamente, Xu *et al*. (2023) também trouxe um estudo que se analisa a capacidade de um consórcio bacteriano da microbiota intestinal das larvas de *Tenebrio molitor* de crescer utilizando o PVC, plástico amplamente utilizado e de difícil biodegradação, como fonte primária de carbono.

A formação de biofilmes é um fator importante nos processos de degradação, os microrganismos se anexando às superfícies plásticas, o que sugere que o contato físico entre o microrganismo e o plástico é crucial para a biodegradação. Os estudos abrem portas para futuras pesquisas sobre o uso de bactérias intestinais de insetos como fonte de microrganismos capazes de degradar plásticos resistentes.

Bardají, Furlan e Stehling (2019) estudaram a ação de uma cepa de Paenibacillus isolada de um aterro sanitário e avaliaram sua capacidade de degradação de polietileno (PE). No experimento, sacolas de PE, tratadas e não

tratadas quimicamente, foram utilizadas para testar a eficácia da bactéria na degradação do plástico. Os resultados indicaram que houve degradação do PE, a qual foi atribuída à quebra das cadeias de carbono, possivelmente catalisada pelas enzimas produzidas pela bactéria (Nauendorf *et al*., 2016).

No estudo de Gaytán *et al*. (2020) uma comunidade microbiana isolada de um aterro sanitário apresentou a capacidade de degradar de poliuretano (PU) e os aditivos xenobióticos, usando uma combinação de mecanismos de hidrólise e oxidação. Por outro lado, o estudo de Su *et al*. (2023) utilizou de consórcios de microrganismos oriundos de aterros sanitários para degradar o PU, revelando a capacidade do consórcio em iniciar o processo de biodegradação do plástico em um curto período de tempo. Ambos os resultados são promissores, mostrando que consórcios microbianos provenientes de aterros sanitários podem ser eficazes na degradação de PU.

O estudo de Shingwekar *et al*. (2023) propõe a degradação do PET combinando através de processo químico e da ação microbiana. Seus resultados mostram que o processo de degradação dos plásticos é acelerado. O autor ainda discute a degradação deste polímero como sendo resultado da ação de um catalisador, derivado de resíduos de biomassa, além do tratamento químico que promove a quebra de ligações estéricas do polímero. Esse resultado é altamente significativo, já que o PET é altamente resistente à degradação microbiana direta, principalmente devido à sua alta cristalinidade e hidrofobicidade. Esses estudos mostram que a combinação de métodos químicos e biológicos geram uma ação sinérgica de degradação que supera as limitações dos processos de biodegradação convencionais. Por outro lado, Falah *et al*. (2020) inova ao demonstrar a capacidade de degradação de plásticos de alta densidade por parte de microalgas. Seu estudo demonstra que a alga *Chlorella vulgaris* apresenta potencial para degradar o PET, especialmente quando combinada com tratamentos físicos e químicos. Mesmo assim, a taxa de degradação está aquém do ideal, além de que os subprodutos gerados podem apresentar riscos ambientais.

Os trabalhos de Meng *et al.* (2023), Zumstein *et al*. (2018) e Hajighasemi *et al.* (2016), estudaram a biodegradabilidade de plásticos já considerados biodegradáveis,

como PLA e PBA. O primeiro estudo examinou como os plásticos biodegradáveis comerciais se comportam em diferentes tipos de solo e como interagem com as comunidades dos microrganismos presentes no solo. O segundo examinou a degradação do PBAT no solo utilizando técnicas avançadas de rastreamento isotópico, como a marcação com carbono-13, para monitorar a conversão do carbono do polímero em CO_2 e sua incorporação na biomassa microbiana. A biodegradabilidade do PBAT foi confirmada através da formação de CO_2 derivado do carbono do polímero, mostrando que os microrganismos do solo são capazes de metabolizar os monômeros do PBAT. Esses microrganismos degradam o PBAT por meio de enzimas que quebram as ligações éster do polímero, gerando produtos de baixo peso molecular. O último estudo traz um consórcio bacteriano conhecido por sua capacidade de degradar compostos orgânicos e polímeros biodegradáveis como o ácido politálico (PLA), um dos bioplásticos mais promissores devido à sua compostabilidade, transparência e baixa toxicidade. Este artigo apresenta avanços importantes na identificação e caracterização de carboxilesterases que degradam PLA e outros poliésteres, abrindo caminho para a implementação de biotecnologias mais sustentáveis de reciclagem de plásticos.

Essas descobertas destacam o potencial biotecnológico de enzimas microbianas para transformar resíduos plásticos em recursos reutilizáveis, o que é crucial para lidar com a crescente crise ambiental causada pelos plásticos. Além disso, há um avanço significativo na compreensão dos processos microbianos que controlam a degradação de polímeros, o que abre caminho para a criação de novos materiais biodegradáveis ajudando na mitigação da poluição plástica no ambiente. No entanto, os estudos também revelam que, embora os plásticos biodegradáveis degradem-se no solo, a taxa pode não ser tão rápida quanto necessária para evitar a acumulação de resíduos plásticos no ambiente. A degradação incompleta destes materiais levanta preocupações sobre a eficácia desses materiais em condições reais de uso prolongado.

O estudo de Sun *et al*. (2022) evidenciou que a adição de biochar, um tipo de carvão vegetal, proveniente de esterco de gado à compostagem promoveu uma

degradação significativa de bioplásticos, como os PHA-MPs, em diferentes fases do processo de compostagem, com destaque para a fase termofílica, caracterizada por temperaturas mais elevadas. Essa adição mostrou-se eficaz na redução da presença de microplásticos em resíduos orgânicos, especialmente em áreas agrícolas. Já o estudo de Castro-Aguirre *et al*. (2018), propôs a bioaumentação como uma abordagem promissora para acelerar a biodegradação do PLA (ácido polilático). Os resultados mostraram que a introdução do *Geobacillus thermoleovorans* em ambientes compostos e vermiculita acelerou a degradação do PLA. Este processo de aceleração da degradação foi observado a partir do aumento da produção de CO_2 e na redução do peso molecular dos filmes de PLA, sugerindo que essa abordagem pode ser aplicada para melhorar a aceitação do PLA em instalações industriais de compostagem.

No estudo de Mohamed, Shah e Nazir (2022) o fungo *P. brevicompactum* OVR-5 mostrou ser eficiente na degradação de PVA, quando comparado com outras cepas testadas em estudos anteriores. A capacidade deste fungo de degradar o PVA, tomando o polímero como fonte primária de carbono indica um potencial biotecnológico significativo para a biorremediação de poluentes plásticos, especialmente em cenários agrícolas e industriais. Já no estudo de Vivi, Martins-Franchetti e Attili-Angelis (2019), a capacidade de degradação dos PCL e PVC, a partir da ação do fungo *C. Globosum.* O microrganismo foi altamente eficiente na degradação do PCL, o que indica uma degradação enzimática ativa, entretanto, o PVC mostrou-se muito mais resistente à degradação pela ação do *C. globosum*. O estudo então conclui que o fungo tem um potencial significativo para degradar o PCL, mas sua eficácia na degradação do PVC é limitada. Tais pesquisas reforçam a necessidade de continuar explorando fungos e outros microrganismos como agentes de degradação de polímeros, especialmente para materiais de difícil degradação como o PVC.

O uso do fungo *Trichoderma harzianum* no processo de biodegradação do PE foi explorado por Ruan *et al*. (2023). Esse microrganismo mostrou-se capaz de degradar as partículas de PE e ao produzir uma enzima recombinante que causa uma

degradação mais potente e visível. Em outro estudo, Porter *et al.* (2023) aborda a capacidade de degradação do PP puro a partir da atuação de dois fungos, o *Coniochaeta hoffmannii* e o *Pleurostoma richardsiae*. Essa descoberta é relevante para o desenvolvimento de biotecnologias voltadas à remediação de plástico, destacando a flexibilidade metabólica dos fungos em degradar diferentes compostos e diferentes ambientes. Outro estudo que destaca o uso de fungos como biodegradadores de plásticos foi do Wang *et al.* (2023), que aborda a ação dos fungos como uma possível ação mitigadora para poluição por microplásticos. O artigo demonstra que uma técnica de peletização fúngica pode ser eficaz na remoção de microplásticos, apontando uma nova via para o tratamento de águas contaminadas. Este é um ponto forte, pois oferece uma alternativa ambiental escalável e menos tóxica em comparação com métodos químicos.

Indo além, o estudo de Wang *et al*. (2022) explora uma perspectiva promissora da degradação biológica de plásticos: o cultivo de bactérias em conjunto (co-cultura). Seus resultados apontam a co-cultura como método mais eficiente em detrimento do uso de cepas isoladas, revelando o papel da cooperação microbiana na degradação de compostos plásticos complexos. A pesquisa também trouxe a possibilidade de reduzir a poluição do solo causada por resíduos de filme plástico agrícola. A presença de bactérias capazes de degradar o PE pode ajudar a mitigar os efeitos adversos da acumulação desses materiais no solo, promovendo uma agricultura mais sustentável. Com isso, o estudo representa um avanço significativo na compreensão da degradação de plásticos em ambientes agrícolas, com ênfase no uso de comunidades bacterianas da plastisfera.

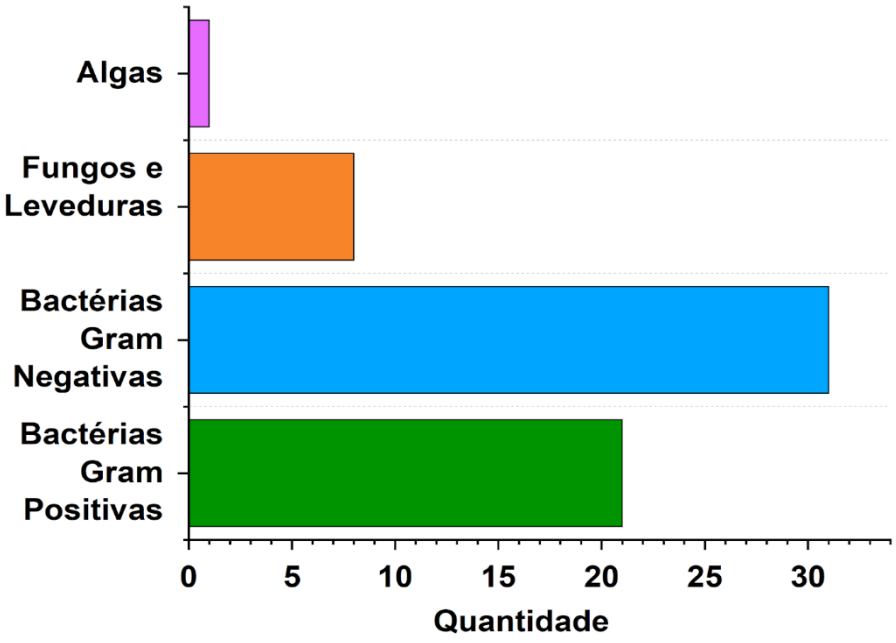
O estudo de Yue *et al.* (2021) aborda a degradação microbiana do policarbonato de bisfenol-A (PC), um tipo de plástico amplamente utilizado em diversas indústrias, como construção civil, automotivo e transporte, mídia óptica e oftálmica, dispositivos médicos, embalagens e dispositivos de armazenamento de dados ópticos, mas apresenta desafios ambientais devido à sua persistência no ambiente. A cepa NyZ600 isolada de iodo ativo demonstrou ser capaz de degradar PC. Isso é particularmente importante, pois os estudos anteriores sobre a

biodegradação de PC por alguns fungos e bactérias sugerem sinais promissores de biodegradação, porém careciam de evidências concretas de biodegradação. Esses resultados sugeriram sinais promissores de biodegradação de PC por bactérias, mas a biodegradação genuína ainda não foi confirmada com evidências concretas.

A aplicação biotecnológica de microrganismos na degradação de plásticos em larga escala apresenta um potencial significativo para reduzir o impacto ambiental dos resíduos plásticos. Os estudos até tratados que investigam bactérias e fungos têm apontado como esses microrganismos contribuem para a biodegradação de polímeros em diferentes contextos ambientais, por meio da produção de enzimas que catalisam a quebra das longas cadeias poliméricas, facilitando sua decomposição. A utilização de consórcios microbianos também demonstrou um aumento na eficiência desse processo, promovendo interações sinérgicas que aceleram a fragmentação e mineralização dos plásticos Edwards *et al.* (2022). Essa abordagem biotecnológica oferece perspectivas promissoras para o manejo de resíduos sólidos e a mitigação dos danos ambientais, apoiando a transição para práticas mais sustentáveis de gestão de resíduos.

A Figura 10 apresenta um levantamento estatístico feito acerca dos artigos selecionados no presente trabalho, agrupando tais estudos a partir dos tipos principais de microrganismos envolvidos na biodegradação de plásticos. As bactérias destacam-se por aparecerem na maioria dos estudos relacionados a degradação de plástico por microrganismos, devido a quantidade de bactérias descritas, fez-se necessário categorizá-las em Gram-positivas e em Gram-negativas, para construção da estatística, na sequência vem os fungos, leveduras e as algas.

Figura 10 – Levantamento estatístico dos microrganismos que mais apareceram na fase final nos estudos selecionados para revisão cuja degradação biológica foi usada



Fonte: Elaborada pela autora, 2024

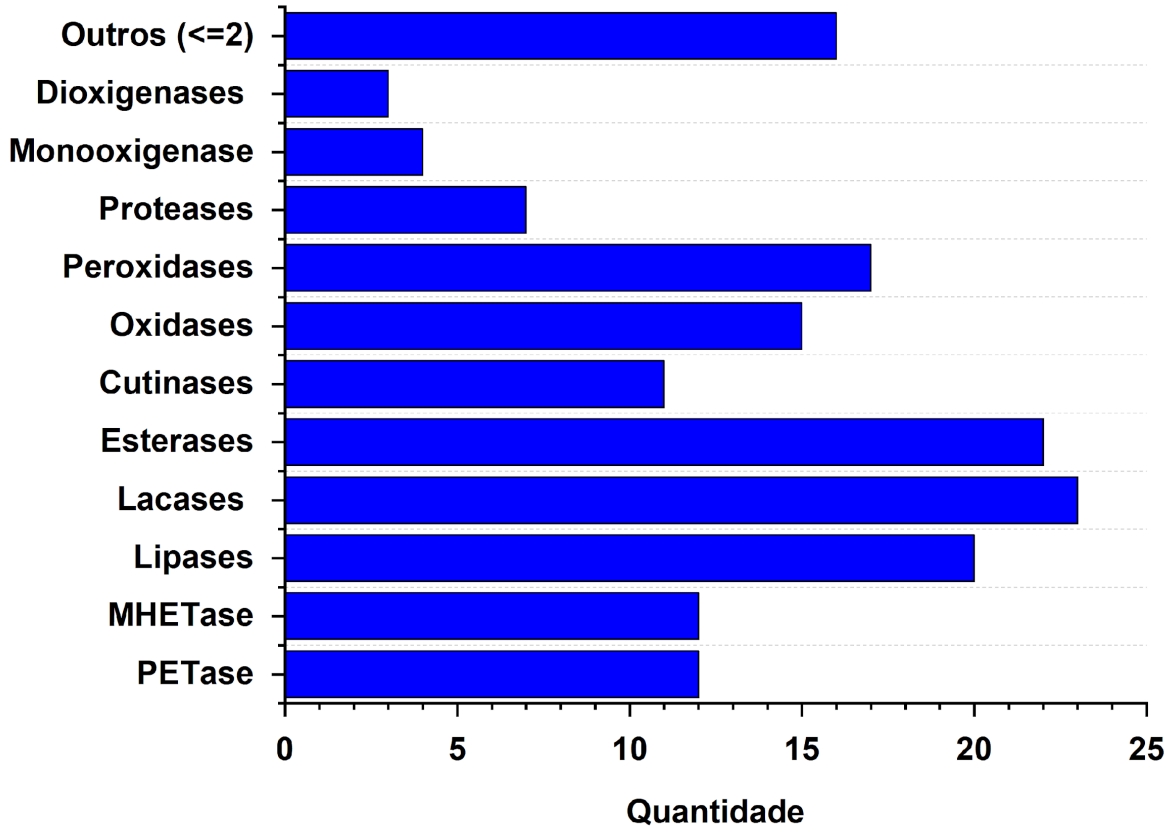
Os microrganismos desempenham papéis significativos na biodegradação de diversos polímeros plásticos por meio da produção de enzimas específicas. Essas enzimas catalisam reações, que resultam na fragmentação e degradação dos polímeros, contribuindo para a redução do impacto ambiental causado pelos plásticos. As enzimas trabalham de maneira sinérgica para quebrar as cadeias poliméricas dos polímeros em moléculas menores que podem ser mais facilmente metabolizadas pelas bactérias, fungos, leveduras ou algas. A combinação dessas enzimas no consórcio bacteriano permite uma degradação mais eficiente, o que é crucial para o desenvolvimento de soluções biotecnológicas para a reciclagem e biorremediação de plásticos.

A maioria dos estudos traz as enzimas dos tipos lacases, esterases, lipases, peroxidases, oxidases, petases, mhetases como principais responsáveis pela

degradação dos polímeros. Na Figura 10 é apresentado um levantamento estatístico baseado no agrupamento dos artigos selecionados a partir das enzimas relacionadas ao processo de degradação biológica. Pela figura é possível observar quais as enzimas, trazidas pela revisão dos trabalhos selecionados, que foram mais abordadas quanto às suas capacidades de degradação dos plásticos.

Karunatillaka, Jaroszewski e Godzik (2022) confirmam a descoberta de novas enzimas, do tipo PETases, que têm estruturas e locais de ligação semelhantes à PETase de Ideonella sakaiensis, uma das enzimas degradadoras de PET mais estudadas. A descoberta dessas novas enzimas sugere a existência de outras enzimas, presentes na natureza, e que também têm potencial na biodegradação de plásticos. Essa indicação abre novas possibilidades biotecnológicas envolvendo a biodegradação e a reciclagem de plásticos.

Figura 11 – Levantamento estatístico dos tipos de enzimas que mais apareceram na fase final nos estudos selecionados para revisão cuja degradação biológica foi usada



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Embora ambos os estudos tenham avanços na compreensão da biodegradação de plásticos, faz-se necessário entender melhor os mecanismos enzimáticos envolvidos. A aplicação prática em larga escala exige melhorias nas taxas de manipulação e de adaptação dessas cepas às diversas condições ambientais. Em geral, as pesquisas abordadas têm um alto grau de inovação, à medida que isolam e caracterizam as diversas cepas com potencial de biodegradação de plásticos. Assim, dada a crescente preocupação global com a poluição plástica, a busca por métodos de degradação biológica eficientes mostra-se uma abordagem inovadora e atual, o que para o manejo e reciclagem de resíduos plásticos é extremamente relevante.

A Tabela 2, mostra as patentes encontradas no banco de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI, as quais abordam a biodegradação de plástico. A seleção dos registros foi idêntica àquela feita para os trabalhos científicos, usando os critérios de inclusão e exclusão anteriormente descritos. A metodologia empregada pode ter sido um dos motivos da diferença discrepante entre a quantidade de patentes e os trabalhos científicos selecionados das bases de dados Scopus e Web of Science. Outro motivo reside no fato de que na base de dados do INPI são aceitos depósitos de patentes apenas do Brasil, enquanto a base de trabalhos científicos possui acesso global.

Alguns estudos mostram que o Brasil em lugar de destaque na busca por alternativas mais sustentáveis para redução dos impactos gerados pelos resíduos. (Lima; Gutierrez; Cruz, 2021) mostra que o Brasil tem implementado políticas para incentivar o mercado de bioplásticos, especialmente através de leis estaduais e municipais que proíbem plásticos de uso único e incentivam a substituição por alternativas biodegradáveis. Mesmo assim, ainda existem lacunas sustentáveis significativas, como por exemplo, a falta de infraestrutura adequada, o que limita o impacto dessas iniciativas. As patentes descritas na Tabela 2, mostram invenções que estão sendo implementadas e usadas no país, com uso de microrganismo e enzimas na potencialização da degradação dos polímeros, assim podendo minimizar os impactos gerados pelos resíduos plásticos.

A patente registrada por Buonamici (2021) descreve uma solução inovadora, a partir da utilização de uma combinação de fungos e bactérias para a biodegradação de plásticos. O processo ocorre em temperaturas moderadas, entre 25 º e 35 ºC, em biorreatores, podendo ser acelerado pela ação da luz solar (foto-oxidação) e além de enzimas degradadoras e compostos químicos. Os subprodutos gerados podem ser reutilizados para produzir calor, eletricidade ou outros tipos de energia. Além disso, o uso de fungos e bactérias facilita a acessibilidade dos microrganismos ao material plástico, promovendo uma degradação mais eficiente. Essa solução apresenta um processo de reciclagem inovador, sustentável e de baixo custo, com aplicação em diversos tipos de plásticos. Uma proposta inovadora

e sustentável, com o potencial de melhorar a reciclagem de plásticos e ajudar a mitigar os impactos ambientais. No entanto, desafios como a escalabilidade e a estabilidade dos microrganismos devem ser cuidadosamente considerados e resolvidos para que a solução possa ser implementada em grande escala com sucesso.

Por outro lado, o registro de patente de Chateau, Rousselle (2022) traz uma ação com grande potencial em relação à mitigação do impacto de resíduos plásticos a partir do desenvolvimento de plásticos mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis, com base no uso de tecnologia biológica para acelerar a degradação de materiais já amplamente utilizados. O foco da invenção é criar artigos plásticos que mantenham suas propriedades mecânicas enquanto têm biodegradabilidade aprimorada, sendo úteis para aplicações como embalagens, filmes agrícolas e outros produtos descartáveis.

A patente de Guémard e Dalibey (2023) trata de uma composição biológica líquida inovadora, que inclui entidades biológicas (como enzimas) e um carregador, capaz de degradar polímeros tornando-os biodegradáveis. A inovação é uma resposta aos problemas ambientais causados pelo acúmulo de plásticos, oferecendo uma solução que facilita a degradação de polímeros através da ação enzimática. O registro apresenta um avanço significativo para a fabricação de plásticos que podem ser degradados de forma mais eficaz após o descarte, propondo uma composição que integra compostos que facilitam a degradação de plásticos, tornando-os mais amigáveis ao meio ambiente.

Indo além, Marty (2020) traz em sua patente uma inovação no uso de proteases para degradar polímeros. As proteases são projetadas para serem mais eficazes em diversas condições, inclusive em altas temperaturas, o que é essencial para processos industriais. A invenção apresenta um avanço significativo, pois ajuda a tornar o processo de degradação de plásticos mais eficiente e sustentável, contribuindo para a mitigação do impacto ambiental do acúmulo de resíduos plásticos, trazendo proteases inovadoras e melhoradas que ajudam a degradar o PLA em produtos plásticos. Elas são mais eficientes e estáveis em temperaturas

elevada, tornando-as ideais para uso industrial e contribuindo para a redução de resíduos plásticos no meio ambiente.

As patentes que envolvem a biodegradação de plásticos desempenham um papel crucial no avanço do desenvolvimento sustentável, especialmente no contexto brasileiro, onde os desafios relacionados ao manejo de resíduos plásticos são significativos. A inovação tecnológica descrita nas patentes de Buonamici (2021); Chateau; Rousselle (2022); Guémard; Dalibey (2023); Marty (2020) evidencia o esforço contínuo para criar soluções mais eficazes e acessíveis para a degradação de plásticos, utilizando abordagens que variam desde consórcios de microrganismos e enzimas especializadas até a melhoria de propriedades mecânicas e biodegradabilidade dos materiais. Essas invenções proporcionam alternativas para reduzir a acumulação de resíduos plásticos, ao mesmo tempo em que promovem o reaproveitamento de subprodutos, impulsionando uma economia circular. No Brasil, onde políticas públicas têm sido implementadas para fomentar práticas mais sustentáveis, tais como a proibição de plásticos de uso único, as patentes representam um passo fundamental para complementar essas iniciativas com soluções práticas e tecnologicamente viáveis. No entanto, para que o país possa aproveitar plenamente essas inovações, é essencial superar desafios como a escalabilidade e a infraestrutura adequada para a aplicação em larga escala. Dessa forma, as patentes voltadas à biodegradação de plásticos não apenas contribuem para mitigar os impactos ambientais, mas também fortalecem a capacidade do Brasil de liderar a transição para um modelo de desenvolvimento sustentável, combinando inovação, conservação ambiental e avanço industrial responsável.

Tabela 2. - Levantamento das patentes analisadas

Patente	Titularidade	Polímero	Microrganismo	País	Ano	Resultados
Solução de Degradação de Plástico.	BUONAMICI, GUGLIELMO	(PE); (PP); (PVC); (PET) e (PS)	*Flavobacterium, Enterobacter asburiae, Ideonella sakaiensis, Sphingomonas, Bacillus subtilis e fungos: Fusarium oxysporum, Purpureocillium lilacinum, Pestalotiopsis microspora, Trichoderma arzianum e Alcaligenes eutrophus*	Itália	2021	A invenção combina processos de reciclagem química, utilizando uma mistura específica de microrganismos e enzimas, resultando em uma degradação mais acelerada.
Protases de Degradação de	ALAIN MARTY / SOPHIE DUQUESNE / MARIE GUICHERD	PLA	Microrganismo não identificado	Organização Européia de Patentes	2017	A invenção propõe a criação de uma enzima mutante que apresenta desempenho

Plástico Aprimoradas.	/ MARLÈNE VUILLEMIN / MAHER BEN KHALED					superior em termos de velocidade e eficiência na degradação do plástico.
Artigo plástico produzido a partir de uma composição de lote mestre sob forma sólida compreendendo um material carreador e enzimas que têm uma atividade de degradação de polímero e método para fabricar um artigo plástico.	MICHEL CHATEAU / JEAN-PHILIPPE ROUSSELLE	(PBAT); (PLA); (PCL); (PE) e (PET)	*Actinomadura keratinilytica e Laceyella sacchari*	Organização Européia de Patentes	2016	Criação de uma composição contendo altas concentrações de entidades biológicas, para um processo de degradação mais controlado e eficiente com prazos de 30 a 90 dias.

Composição Líquida que compreende Entidades Biologicas e uso da mesma.	"	PLA; PCL; PBAT; PHA; PBS; PET; PBT; PEF; PEA; PEN; PE; PP; PMP; PA6; PA66; PA11; PA12; PVC; PS; EVA e PVOH.	Diversas bactérias, fungos e leveduras	Organização Européia de Patentes	2018	A invenção de uma composição líquida, com entidades biológicas, para aumentar a biodegradabilidade dos plásticos e manter as propriedades mecânicas dos produtos plásticos biodegradáveis.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e o uso de plásticos biodegradáveis, que apresentam um tempo de decomposição consideravelmente menor em comparação aos plásticos convencionais, sua adoção juntamente com a ação dos microrganismos, surgem como alternativas viáveis para mitigar os impactos ambientais causados pelo acúmulo de resíduos plásticos. Abordagens integradas, que combinam inovação biotecnológica e design sustentável, reforça a necessidade de políticas públicas e investimentos em pesquisas para o desenvolvimento de materiais que sejam mais amigáveis ao meio ambiente o fortalecimento dessa linha de ação pode resultar em uma diminuição substancial dos impactos ambientais e em um futuro mais equilibrado e sustentável para as próximas gerações.

Os resultados mostram que cerca de 30% dos estudos investigados apresentaram taxas de degradação superiores a 50% em condições controladas, testando o potencial de cepas bacterianas e fúngicas, como Bacillus e Pseudomonas, para decompor polímeros como PET e PE. Em experimentos específicos, observou-se que um consórcio de microrganismos conseguiu reduzir a massa de filmes de polietileno em até 33% em um período de 45 dias. Esses resultados indicam que a aplicação de técnicas combinadas, como o uso de consórcios e a foto-oxidação, pode aumentar a eficiência da biodegradação. No entanto, os estudos também evidenciam que a replicação desses resultados em condições ambientais naturais requer mais pesquisas para abordar variáveis como temperatura, umidade e exposição solar.

Contudo, desafios para a implementação em larga escala ainda persistem, como a adaptação dos processos às variações ambientais e a viabilidade econômica. A aplicação de políticas públicas que incentivem a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de degradação biológica, aliada à educação ambiental e ao incentivo ao uso de plásticos biodegradáveis, é essencial para alcançar uma gestão mais sustentável. Conclui-se que a combinação de dadosempíricos e estratégias de políticas podem promover avanços significativos no combate à poluição plástica, contribuindo para um futuro mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ABBASI, H. *et al*. Critical Evaluation of Plastic Waste Remediation through Microbial Degradation. **Third International Sustainability and Resilience Conference: Climate Change**, p. 72-77, 2021. DOI: hhttps://doi.org/10.1109/IEEECONF53624.2021.9668178. Acesso em: 18 set. 2024.

ALI, S. S. *et al*. Biodegradability of polyethylene by efficient bacteria from the guts of plastic-eating waxworms and investigation of its degradation mechanism. Journal of Hazardous Materials, Amsterdã, v. 443, p. 130287, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130287. Acesso em: 18 set. 2024.

ARAÚJO, F.; SILVA-CAVALCANTI, J. Os impactos ambientais dos plásticos. **Revista Brasileira de Estudos Ambientais**, v. 21, n. 1, p. 75-90, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/VJ58TBjHVqDZsvWLckcFbTQ#. Acesso em: 23 jan. 2024. Não localizada na internet e nas citações

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **The science and engineering of materials**. 7. ed. Stanford: Cengage Learning, 2016.

AUSTIN, H. P. *et al*. Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase. **Proceedings of the National Academy of Sciences,** United States, v. 115, e- 4350-57 2018. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1718804115. Acesso em: 18 set. 2024.

BARDAJÍ, D. K. R.; FURLAN, J. P. R.; STEHLING, E. G. Isolation of a polyethylene degrading Paenibacillus sp. from a landfill in Brazil. **Archives of Microbiology**, Berlim, v. 201, p. 699-704, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s00203-019-01637-9. Acesso em: 08 nov. 2024.

BARRADAS, M. S. Pesquisa da UFRGS e UEA aponta que fungos da casca preciosa podem ser capazes de degradar plástico. **Ciência: Jornal da Universidade**, 8 abr. 2021. Disponível em: https://www.ufrgs.br/ciencia/pesquisa-da-ufrgs-e-uea-aponta-que-fungos-da-casca-preciosa-podem-ser-capazes-de-degradar-plastico/. Acesso 29 de set. 2022.

BISSOLI, O. D. **Biotecnologias para a degradação de plásticos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Portugal, 2021. 87 p. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/138041/2/517461.pdf. Acesso em: 27 out. 2024.

BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. **Portal de buscas – Pesquisas em Propriedade Industrial**: patente. Disponível em:

https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/LoginController?action=login. Acesso em: 20 out. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (Brasil). Portal de buscas – Pesquisas em Propriedade Industrial: patente. Disponível em: https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/LoginController?action=login. Acesso em: 20 out. 2024.
BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei n. 9795, de 27 de abril de 1999.** Dispõe sobre a educação ambiental. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 abr. 1999. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm. Acesso em: 18 set. 2024.

BUARQUE, C. **Desenvolvimento sustentável**: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Record, 2018. Não localizado na citação

BUONAMICI, G. **Solução de degradação de plástico**. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. BR 112023011373-3 A2. Depósito: 06 dez. 2021. Concessão 01 ago. 2023. Acesso em: 20 out. 2024.

CASTRO-AGUIRRE, E. *et al*. Enhancing the biodegradation rate of poly (lactic acid) films and PLA bio-nanocomposites in simulated composting through bioaugmentation. **Polymer Degradation and Stability**, Londres, v. 154, p. 46-54, 2018. Disponível em:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391018301708?via%3Dihub. Acesso em: 03 out. 2024.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering:** An Introduction**.** 9. ed. New York: John Wiley e Sons, 2014.

BRASIL. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. **Acervo**: lista de bases e coleção. Brasília, DF: governo Federal, 2021. Disponível em: https://www-periodicos-capes-gov-br.ez33.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/lista-a-z-bases.html. Acesso em: 20 out. 2024.

CANEVAROLO JR.; Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CHATEAU, M.; ROUSSELLE, Jean-Philippe. **Artigo plástico produzido a partir de uma composição de lote mestre sob forma sólida compreendendo um material carreador e enzimas que têm uma atividade de degradação de polímero e método para fabricar um artigo plástico**. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. BR 122020011873-3 B1. Depósito: 10 jun. 2016. Concessão: 24 mai. 2022. Disponível em:

https://patentimages.storage.googleapis.com/e5/9f/4d/6a5b0ee218c73b/BR122020011873B1.pdf. Acesso em 20 out. 2024.

COELHO, Paulo**. O Alquimista.** São Paulo: Rocco, 1988.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. COP26: um breve resumo sobre os principais acordos. **WayCarbon**: Blog, São Paulo, 26 nov. 2021. Disponível em: https://blog.waycarbon.com/2021/11/cop26-um-breve-resumo-sobre-os-principais-acordos/. Acesso em: 30 set. 2022.

CHEN, Y. *et al*. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdã, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.03.011. Acesso em: 20 set. 2024.

COPPOLA, G. *et al*. Bioplastic from Renewable Biomass: A Facile Solution for a Greener Environment. **Earth Systems and Environment**, Cham, v. 5, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s41748-021-00208-7. Acesso em: 15 out. 2024.

DEVI, D. *et al*. Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) through application of indigenous strain Alcaligenes faecalis ISJ128. **Environmental Geochemistry and Health**, Dordrecht, v. 45, n. 12, p. 9391-9409, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10653-023-01590-z. Acesso em: 21 set. 2024.

DRZYZGA, O.; PRIETO, A. Plastic waste management, a matter for the ‘community’. **Microbial biotechnology**, Hoboken, v. 12, n. 1, p. 66-68, 2018.DOI: https://doi.org/10.1111/1751-7915.13328. Acesso em: 25 out. 2024.

EDWARDS, S. *et al*. Microbial consortia and mixed plastic waste: pangenomic analysis reveals potential for degradation of multiple plastic types via previously identified PET degrading bacteria. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 23, n. 10, e5612, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23105612. Acesso em: 05 nov. 2024.

ELSAMAHY, T. *et al*. Biodegradation of low-density polyethylene plastic waste by a constructed tri-culture yeast consortium from wood-feeding termite: Degradation mechanism and pathway. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 448, p. 130944, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130944. Acesso em: 01 out. 2024.

EMADIAN, S.; ONAY, T. T.; DEMIREL, B. Biodegradation of bioplastics in natural environments. **Waste Management**, United States, v. 59, p. 526-536, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006. Acesso em: 18 set. 2024.
Mirtes

FALAH, W. *et al*. Polyethylene terephthalate degradation by microalga Chlorella vulgaris along with pretreatment. **Materials Plastics**, United States, v. 57, n. 3, p. 260-270, 2020. DOI: https://doi.org/10.37358/Mat.Plast.1964. Acesso em: 08 nov. 2024.

FARAVELLI, T. *et al*. Thermal degradation of polystyrene. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 60, p. 103-121, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00159-5. Acesso em: 18 set. 2024.

FOTOPOULOU, K.; KARAPANAGIOTI, H. Degradation of various plastics in the environment. *In*: TAKADA, Hideshige; KARAPANAGIOTI, Hrissi K. (ed.). **Hazardous Chemicals Associated with Plastics in the Marine Environment.** New York: Springer, 2017. p. 71-92. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?q=Hazardous+Chemicals+Associated+with+Plastics+in+the+Marine+Environment&hl=pt-BR&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart1. Acesso em: 18 set. 2024.

GAO, R.; SUN, C. A marine bacterial community capable of degrading poly (ethylene terephthalate) and polyethylene. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 416, p. 125928, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125928. Acesso em: 04 nov. 2024.

Mirtes referência até aqui
GAYTÁN, I. *et al*. Degradation of recalcitrant polyurethane and xenobiotic additives by a selected landfill microbial community and its biodegradative potential revealed by proximity ligation-based metagenomic analysis. **Frontiers in Microbiology**,Pequim, China, v. 10, *e*-125928, p. 2986, 2020. Disponivel em: https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2019.02986/full. Acesso em: 04 nov. 2024.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, Washington, v. 3, 2017. DOI: https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782. Acesso em: 28 set. 2024.

GIRONI, F.; PIEMONTE, V. Bioplastics and Petroleum-based Plastics: Strengths and Weaknesses. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, Philadelphia, PA, v. 33, 2011. DOI: https://doi.org/10.1080/15567030903436830. Acesso em: 18 set. 2024.

GONG, M. *et a*l. Microbial biofilm formation and community structure on low-density polyethylene microparticles in lake water microcosms. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 252, p. 94-102, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.090. Acesso em: 11 out. 2024.

GUÉMARD, E.; DALIBEY, M. **Composição líquida que compreende entidades biológicas e uso da mesma.** Depositante: Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). BR n. 112020004083-5 B1. Concessão: 25 jul. 2023.

GUI, Zhi *et al*. A deep-sea bacterium is capable of degrading polyurethane. **Microbiology Spectrum**, Washington, v. 11, n. 3, p. e00073-23, 2023. DOI: https://doi.org/10.1128/spectrum.00073-23. Acesso em: 06 out. 2024.

HAJIGHASEMI, M. *et al*. Biochemical and structural insights into enzymatic depolymerization of polylactic acid and other polyesters by microbial carboxylesterases. **Biomacromolecules**, Washington, v. 17, n. 6, p. 2027-2039, 2016.DOI: https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b00223. Acesso em: 30 set. 2024.

HAMID, S. *et al*. A. Social media for environmental sustainability awareness in higher education. **International Journal of Sustainability in Higher Educatio**n, v. 18, 2017.DOI: https://doi.org/10.1108/IJSHE-01-2015-0010. Acesso em: 18 set. 2024.

HESS, M.; WALKER, M. A. Hermann staudinger – organic chemist and pioneer of macromolecules. **Pure and Applied Chemistry**, Berlin, v. 93, n. 10, p. 1063-1071, 2021. DOI: https://doi.org/10.1515/pac-2021-0113. Acesso em: 08 nov. 2024.

IBRAHIM, N.*et al*. Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging. **Coatings**, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings11111423. Acesso em: 18 set. 2024.

NIKI, T. Decomposição oxidativa de plásticos. **Journal of Japan Fuel Association**, Tóquio, v. 51, n. 4, p. 204-211, 1972. DOI: https://doi.org/10.3775/jie.51.204. Acesso em: 18 set. 2024. Não localizado nas citações e na internet

JIANG, *et al.* Assessment of plastic stocks and flows in China: 1978-2017. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdã, v. 161, p. 104969, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104969. Acesso em: 20 set. 2024.

JI, J. *et al*. Biodegradation of plastic monomer 2,6-dimethylphenol by Mycobacterium neoaurum B5-4. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 258, e-113793, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113793. Acesso em: 24 out. 2024. Não localizado nas citações e na internet

KAN, X. *et al*. Assessment of plastic stocks and flows in China: 1978-2017. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdã, v. 161, e-104969, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104969. Acesso em: 08 nov. 2024.localizado nas citações e na interne

KAN, M. *et al.* Seven decades of plastic flows and stocks in the United States and pathways toward zero plastic pollution by 2050. **Journal of Industrial Ecology**,

Hoboken, v. 27, n. 6, p. 1538-1552, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/jiec.13427. Acesso em: 06 out. 2024.

KARUNATILLAKA, I.; JAROSZEWSKI, L.; GODZIK, A. Novel putative polyethylene terephthalate (PET) plastic degrading enzymes from the environmental metagenome. **Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics**, Nova Iorque, v. 90, n. 2, p. 504-511, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/prot.26245. Acesso em: 03 out. 2024.

LEAR, G. *et al*. Microbial Abilities to degrade global environmental plastic polymer waste are overstated. **Environmental Research Letters**, United Kingdom, v. 17, 2022. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac59a7. Acesso em: 18 set. 2024.

LEÓN-ZAYAS, R. *et al*. Draft genome sequences of five environmental bacterial isolates that degrade polyethylene terephthalate plastic. **Microbiology Resource Announcements**, Washington, v. 8, n. 25, p. e- 00237-19, 2019. DOI: https://doi.org/10.1128/mra.00237-19. Acesso em: 21 set. 2024.

LI, Z. *et al*. Biodegradation of low-density polyethylene by Microbulbifer hydrolyticus IRE-31. **Journal of Environmental Management**, Amsterdã, v. 263, e.10402, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110402. Acesso em: 18 set. 2024.

LIMA, L.; GUTIERREZ, R.; CRUZ, S. Challenges in the context of single-use plastics and bioplastics in Brazil: A legislative review. **Waste Management & Research**, Londres, v. 40, p. 998-1006, 2021. DOI: https://doi.org/10.1177/0734242X211055548. Acesso em: 27 out. 2024.

LUYT, A. S.; MALIK, S. S. Can biodegradable plastics solve plastic solid waste accumulation? *In*: AL-SALEM, S. **Plastics design library, plastics to energy**. Londres: William Andrew Publishing, 2019. p. 403-423. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00016-9. Acesso em: 15 out. 2024.

MAROOF, L.; KHAN, I.; HASSAN, H*. et al*. Microbial degradation of low density polyethylene by Exiguobacterium sp. strain LM-IK2 isolated from plastic dumped soil. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 38, p. 197, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-022-03389-z. Acesso em: 28 set. 2024.

MARTY, A. *et al*. **Proteases de degradação de plástico aprimoradas.** Depositante: Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). BR n. 112019012258-3 A2. Concessão: 20 out. 2020.

MELNYK, L. G. *et al*. Bioplastics production for circular economy and sustainable development promotion. **Journal of Economic Literature**, United States, 2019. DOI: https://doi.org/10.32317/2221-1055.201911079. Acesso em: 18 set. 2024.

MENG, K. *et al*. Degradation of commercial biodegradable plastics and temporal dynamics of associated bacterial communities in soils: a microcosm study. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 865, p. 161207, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161207. Acesso em: 08 nov. 2024.

MOHAMED, H.; SHAH, A.M.; NAZIR, Y. Biodegradation of poly (vinyl alcohol) by an orychophragmus rhizosphere-associated fungus Penicillium brevicompactum OVR-5, and its proposed PVA biodegradation pathway. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 38, p. 10, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-021-03197-x. Acesso em: 24 out. 2024.

MORAWETZ, H. History of polymer science. **Wiley Online Library**, Nova Iorque, 15 Dec. 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/0471440264.pst631. Acesso em: 18 set. 2024.

NAUENDORF, A. *et al*. Microbial colonization and degradation of polyethylene and biodegradable plastic bags in temperate fine-grained organic-rich marine sediments. **Marine Pollution Bulletin**, Tóquio, v. 103, n. 1-2, p. 168-178, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.024. Acesso em: 02 nov. 2024.

OLIVEIRA, J. L.; SOUZA, C. A. Plástico no meio ambiente: características gerais e impactos socioambientais. *In*: CONAPEC, 4, 2019, Campina Grande, PB. **Anais eletrônicos [...]**. Campina Grande, PB, p. [8]. Disponível em: https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/57108. Acesso em: 05 nov. 2024.

OU, D. *et al*. Psychrobacter species enrichment as potential microplastic degrader and the putative biodegradation mechanism in Shenzhen Bay sediment, China. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 464, e-132971, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132971. Acesso em: 30 set. 2024.

PATHAK, N. V. M. *et al*. Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. **Bioresurces and Bioprocessing**, Germany, v. 4, n. 1, 2017. DOI: https://doi.org/10.1186/s40643-017-0145-9. Acesso em: 21 set. 2024.

PEIXOTO, J.; SILVA, L. P.; KRÜGER, R. H. Brazilian Cerrado soil reveals an untapped microbial potential for unpretreated polyethylene biodegradation. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 324, p. 634-644, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.037. Acesso em: 06 out. 2024.

PELICIONI, M. C. F.; CASTRO, M. L. **Educação ambiental**: evolução e conceitos**.** saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável. Barueri: Manole, 2018.

PENG, B. Y. *et al*. Biodegradation of polystyrene by dark (Tenebrio obscurus) and yellow (Tenebrio molitor) mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae). **Environmental**

Science & Technology, Washington, v. 53, n. 9, p. 5256-5265, 2019. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06963. Acesso em: 25 out. 2024.

PINCELLI, I. P. *et al*. Post-consumer plastic packaging waste flow analysis for Brazil: The challenges moving towards a circular economy. **Waste Management**,United States v. 126, 2021, p. 781-790. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.005. Acesso em: 18 set. 2024.

PORTER, R. *et al*. Degradation of polypropylene by fungi Coniochaeta hoffmannii and Pleurostoma richardsiae. **Microbiological Research**, Munique, v. 277, e-27507, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127507. Acesso em: 28 set. 2024.

RABELLO, M. S. **Estrutura e propriedades de polímeros**. 2. ed. Campina Grande, PB: Ed. do Autor, 2023.

RAGOSSNIG, A. M.; AGAMUTHU, P. Plastic waste: Challenges and opportunities. **Waste Management & Research**, Londres, v. 39, n. 5, p. 629-630, 2021. DOI: https://doi.org/10.1177/0734242X211013428. Acesso em: 30 out. 2024.

REN, S.; NI, H.-G. Biodeterioration of microplastics by bacteria isolated from mangrove sediment. **Toxics**, Basileia, v. 11, n. 5, e-432, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics11050432. Acesso em: 18 set. 2024.

ROBERTS, C. *et al*. Environmental consortium containing Pseudomonas and Bacillus species synergistically degrades polyethylene terephthalate plastic. **Msphere**, Washington, v. 5, n. 6, e- 01151-20, 2020. DOI: https://doi.org/10.1128/msphere.01151-20. Acesso em: 02 nov. 2024.

RONG, Z. *et al.* Degradation of low-density polyethylene by the bacterium Rhodococcus sp. C-2 isolated from seawater. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 907, e-167993, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167993. Acesso em: 08 nov. 2024.

RUAN, Y. *et al*. Degradation of polyethylene particles by Trichoderma harzianum and recombinant laccase cloned from the strain. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 140, n. 43, e-54599, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/app.54599. Acesso em: 24 out. 2024.

SAALWÄCHTER, K. Grand challenges in polymers. **Frontiers in Soft Matter**, Switzerland, v. 2, p. [5], Sept. 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/frsfm.2022.1037349. Acesso em: 18 set. 2024.

SANDELOWSKI, M. Combining qualitative and quantitative sampling, data collection, and analysis techniques in mixed-method studies. **Research in Nursing Health**,

United States, v. 23, n. 3, 2000, p. 246-255. DOI: https://doi.org/10.1002/1098-240X(200006)23:3<246::AID-NUR9>3.0.CO;2-H. Acesso em: 18 set. 2024.

SINGH, B.; SHARMA, N. Mechanistic implications of plastic degradation. **Polymer Degradation and Stability**, London, v. 93, p. 561-584, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008. Acesso em: 02 nov. 2024

SHELBY, L. B.; VASKE, J. J. Understanding meta-analysis: a review of methodological literature. **Leisure Science**s, v. 30, n. 2, p. 96-110, 2008. DOI: https://doi.org/10.1080/01490400701881366. Acesso em: 19 set. 2024.

SHINGWEKAR, D. *et al.* Two-step chemo-microbial degradation of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) plastic enabled by a biomass-waste catalyst. **Bioengineering**, Basileia, v. 10, n. 11, e- 1253, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/bioengineering10111253. Acesso em: 28 set. 2024.

SU, T. *et al.* Biodegradation of polyurethane by the microbial consortia enriched from landfill. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlim, v. 107, n. 5, p. 1983-1995, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-023-12418-2. Acesso em: 05 nov. 2024.

SUN, J. *et al*. The surface degradation and release of microplastics from plastic films studied by UV radiation and mechanical abrasion. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 838, e-156369, Sept. 2022a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156369. Acesso em: 03 nov. 2024.

SUN, Y. *et al*. Enhancing microplastics biodegradation during composting using livestock manure biochar. **Environmental Pollution**, v. 306, e-119339, Aug. 2022b. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119339. Acesso em: 03 nov. 2024.
Favor conferir o mesmo sobrenome com mesma data precisa identificar com uma letra na data. Exemplo 2020a nas citações.

TAO, X. *et al*. Polyethylene degradation by a Rhodococcus strain isolated from naturally weathered plastic waste enrichment. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 57, n. 37, p. 13901-13911, 2023. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03778. Acesso em: 11 out. 2024.

VIVI, V.K.; MARTINS-FRANCHETTI, S. M.; ATTILI-ANGELIS, D. Biodegradation of PCL and PVC: Chaetomium globosum (ATCC 16021) activity. **Folia Microbiologica**, Praga, v. 64, p. 1-7, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s12223-018-0621-4. Acesso em: 18 set. 2024.

WANG, H. *et al.* Microplastics removal in the aquatic environment via fungal pelletization. **Bioresource Technology Reports**, Amsterdã, v. 23, p. 101545, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101545. Acesso em: 06 out. 2024.

WANG, Z. *et al.* A polystyrene-degrading Acinetobacter bacterium isolated from the larvae of Tribolium castaneum. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 726, e-138564, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138564. Acesso em: 28 set. 2024.

WANG, P. *et al*. Polyethylene mulching film degrading bacteria within the plastisphere: Co-culture of plastic degrading strains screened by bacterial community succession. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 442, e-130045, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130045. Acesso em: 15 out. 2024.

XIAN, Z.-N. *et al*. Biodegradation of additive-free polypropylene by bacterial consortia enriched from the ocean and from the gut of Tenebrio molitor larvae. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 892, e-164721, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164721. Acesso em: 03 out. 2024.

XU, Y. *et al*. Degradation of polyvinyl chloride by a bacterial consortium enriched from the gut of Tenebrio molitor larvae. **Chemosphere**, Oxford, v. 318, e-137944, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137944. Acesso em: 21 set. 2024.

YAN, F. *et al.* Thermophilic whole- cell degradation of polyethylene terephthalate using engineered Clostridium thermocellum. **Microbial Biotechnology**, Hoboken, v. 14, n. 2, p. 374-385, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/1751-7915.13580. Acesso em: 18 set. 2024. Não localizado nas citações rever

YUAN, Y. *et al*. Unique Raoultella species isolated from petroleum contaminated soil degrades polystyrene and polyethylene. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdã, v. 263, e-115232, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115232. Acesso em: 08 nov. 2024.

YUE, W. *et al.* Biodegradation of bisphenol-A polycarbonate plastic by Pseudoxanthomonas sp. strain NyZ600. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 416, e-125775, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125775. Acesso em: 27 out. 2024.

YOUNG, R. J.; LOVELL, P. A. **Introduction to Polymers**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. Não localizado nas citações rever

YIN, C.-F.; XU, Y.; ZHOU, N. Biodegradation of polyethylene mulching films by a co-culture of Acinetobacter sp. strain NyZ450 and Bacillus sp. strain NyZ451 isolated from Tenebrio molitor larvae. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Amsterdã, v. 155, e-105089, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105089. Acesso em: 06 nov. 2024.

ZHANG, X. *et al*. Degradation of polyethylene by Klebsiella pneumoniae Mk-1 isolated from soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdã, v. 258, e-. 114965, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114965. Acesso em: 08 nov. 2024.

ZHANG, J. *et al*. Selection and evaluation of microorganisms for biodegradation of agricultural plastic film. **3 Biotech,** Heidelberg, v. 8, p. 1-8, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s13205-018-1329-5. Acesso em: 18 set. 2024.

ZHANG, K. *et al*. Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. **Environmental Pollution**, v. 274, e-116554. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554. Acesso em: 18 set. 2024.

ZHAO, S. *et al*. Biodegradation of polyethylene terephthalate (PET) by diverse marine bacteria in deep- sea sediments. **Environmental Microbiology**, Hoboken, v. 25, n. 12, e- 2719-2731, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/1462-2920.16460. Acesso em: 03 out. 2024.

ZRIMEC, J.; *et al*. Plastic-degrading potential across the Global Microbiome Correlates with Recent Pollution Trends. **mBio**, v. 12, e-02155-21, 2020. DOI: https://doi.org/10.1128/mBio.02155-21. Acesso em: 18 set. 2024.

ZUMSTEIN, M. T. *et al*. Biodegradation of synthetic polymers in soils: tracking carbon into CO2 and microbial biomass. **Science Advances**, Washington, v. 4, n. 7, e-9024, 2018.DOI: https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9024. Acesso em: 08 nov. 2024.