



T R A B A L H O 1 0

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO CICLO DE VIDA AMBIENTAL DE PLÁSTICOS PET E PLA: FOCO NOS IMPACTOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE MACROPLÁSTICOS E MICROPLÁSTICOS

Bruno Freitas de Souza Placido

Bettina Susanne Hoffmann

Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco

Thiago Santiago Gomes

RESUMO: A fragmentação de plásticos ao longo do tempo forma macro e microplásticos que persistem no ambiente, afetando fauna, ciclos biogeoquímicos e potencialmente a saúde humana. Este estudo comparou o ciclo de vida (ACV) do PET e PLA, considerando produção, importação e destinação no Brasil. O PET apresentou maior geração de macroplásticos, principalmente em cenários de disposição inadequada, devido ao maior volume consumido e vazamentos no fim de vida. O PLA teve menor geração de macroplásticos, sobretudo quando destinado à compostagem industrial. Ambos os polímeros contribuíram para microplásticos pelo transporte rodoviário, com maiores valores para o PLA pela maior dependência desse modal. A substituição parcial do transporte marítimo e rodoviário por modais mais sustentáveis reduziu vazamentos de microplásticos e impactos como acidificação terrestre (redução de 17,79% PET e 12,18% PLA) e aquecimento global (2,76% PET e 2,97% PLA), mostrando benefícios potenciais dessas mudanças logísticas.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do Ciclo de Vida; PET; PLA; Macroplásticos; Microplásticos;

INTRODUÇÃO

O plástico desempenha um papel inquestionável na sociedade moderna, devido à sua versatilidade, durabilidade e baixo peso específico. Esse material tem contribuído para a democratização do consumo e reduzido o peso de muitos objetos (WALKER E ROTHMAN., 2020).

Entre os vários tipos de plásticos de origem fóssil, o poli (tereftalato de etileno) (PET) se destaca como um dos principais polímeros usados atualmente. Ele é amplamente empregado em produtos plásticos do cotidiano, especialmente em itens descartáveis, como embalagens e garrafas de água (CHEN *et al.*, 2020).

A produção de plásticos no mundo foi de 400,3 Mt em 2022, sendo mais de 90% dessa quantidade relacionada à produção de plásticos de base fóssil, ou seja, derivado do petróleo. Além disso, 32% dessa quantidade é proveniente da China, sendo a América Central e do Sul responsável por apenas 4% de toda a produção mundial (PLASTICSEUROPE, 2023).

Em 2023, conforme o perfil da ABIPLAST, o polietileno tereftalato (PET) representou 6,9% do total das principais resinas consumidas no Brasil. O polietileno (PE) destacou-se como o tipo de plástico mais consumido, com as seguintes porcentagens: o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) contabilizou 13,9%, o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) alcançou 7,6%, e o Polietileno de Baixa Densidade Linear (PEBDL) foi responsável por 15,3%. Dessa forma, o total de consumo de polietileno atingiu 36,8%.

Apesar do pequeno volume consumido, o PET foi o tipo de plástico com maior índice de reciclagem pós-consumo (53,6%) em 2022. De acordo com a ABIPET (2024), foram 359 mil toneladas de PET pós-consumo em 2021, o que corresponde a 56,4% das embalagens descartadas pelos consumidores, e que 69% desse material é proveniente da atuação de sucateiros e 15% de cooperativas, tendo grande relevância social no Brasil.

De acordo com BARBOZA *et al.* (2019), a poluição plástica em ambientes marinhos afeta desde seres invertebrados a vertebrados, e o número de registros de animais ameaçados pelo plástico marinho, como aves e mamíferos marinhos, tartarugas, peixes e invertebrados, aumentou ao longo dos últimos anos, sendo a presença desses resíduos nos ambientes marinhos um dos maiores problemas ambientais do nosso tempo.

RHODES *et al.* (2018) apontam algumas consequências ambientais da poluição plástica: emaranhamento ou entrelaçamento, que ocorre quando muitas criaturas marinhas ficam cercadas ou enredadas pelos detritos plásticos e acabam sufocando ou se afogando, relacionada a macroplásticos; decomposição do material, que pode descarregar uma série de poluentes secundários, que incluem compostos orgânicos voláteis (COV), tais como benzeno e tolueno, ora como componentes gasosos, ora como componentes de lixiviado.

Após a degradação dos plásticos, ocorre a formação de microplásticos, que são materiais com menos de 5 mm, que interagem com a biota marinha, sendo os efeitos na saúde humana ainda desconhecidos (MERCÊS *et al.*, 2021). KHALID *et al.* (2020) citam que os microplásticos possuem a capacidade de sorção de vários poluentes, e que por suas características hidrofóbicas, em ambientes aquáticos, pode facilitar a atração de poluentes orgânicos, aumentando sua toxicidade.

Para mitigar os impactos ambientais causados pelos plásticos de origem fóssil, estudos vêm sendo realizados em busca de substitutos biodegradáveis, de origem renovável. Esses materiais podem decompor-se em materiais de menor tamanho e, no caso dos biodegradáveis, através de mecanismos microbianos, misturar-se inofensivamente em solo e água (ATIWESH *et al.*, 2021). Até o presente momento, os bioplásticos mais amplamente produzidos incluem o ácido poliláctico (PLA), o polihidroxialcanoato (PHA), o succinato de polibutileno (PBS), plásticos à base de amido e plásticos à base de celulose. Com exceção do PLA, os demais biopolímeros enfrentam uma ou várias questões fundamentais que limitam de maneira significativa sua aplicação extensiva, tais como métodos de processamento diversos, propriedades inerentes insatisfatórias e lenta industrialização, entre outros (YU *et al.*, 2023).

O Poli (ácido láctico) (PLA) é uma das alternativas mais promissoras para substituir determinadas aplicações do PET, um dos polímeros mais utilizados no segmento de embalagens. De acordo com RAJESHKUMAR *et al.* (2021), o PLA pode ser produzido a partir de fontes renováveis como trigo, milho, arroz, batata-doce, entre outros. Dentre as vantagens desse polímero, destaca-se o baixo consumo de energia. Os autores ainda citam que existem limitações comerciais devido a algumas fragilidades, como baixa tenacidade e sua natureza hidrofílica, mas quando misturado com fibras naturais, suas propriedades térmicas, cristalização, degradabilidade e propriedades mecânicas, por exemplo, são otimizadas, tornando o produto competitivo e disponível para uso por diferentes indústrias.

A participação de mercado dos plásticos “*bio-based*” está em ascensão, com uma previsão de crescimento de 2,15 milhões de toneladas em 2020 para 2,43 milhões de toneladas em 2024, representando um aumento de 13% (SPIERLING *et al.*, 2020).

Segundo MTIBE *et al.* (2021), os polímeros biodegradáveis são facilmente degradados por microrganismos devido à presença de grupos funcionais em suas cadeias alifáticas, como carbonilas, hidroxilas, ésteres e hidroxiácidos, que os tornam mais suscetíveis à atividade enzimática. Contudo, é essencial considerar que a eficiência dessa degradação depende de diversos fatores, como o tipo de microrganismos presentes no ambiente, as condições ambientais (como temperatura, umidade, pH, luz e disponibilidade de oxigênio) e as características próprias do polímero, como massa molar e cristalinidade.

Para a tomada de decisão entre o desempenho ambiental de um produto ou outro, KOUSEMAKER *et al.* (2021) cita que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é reconhecida como uma metodologia para estimar e quantificar o impacto ambiental de produtos, sistemas e serviços, através da análise detalhada dos balanços de massa e energia.

De acordo com a definição da ABNT NBR ISO 14.040:2006, “A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais”, como por exemplo, o uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente, ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final, sendo isso considerado, do berço ao túmulo”.

Os impactos ambientais, fundamentados nos dados do inventário do ciclo de vida, são quantificados e associados a categorias específicas de impacto (ou “áreas de preocupação ambiental”). A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (ACV) compreende: i) a escolha das categorias de impacto, indicadores e modelos de caracterização; ii) a atribuição dos resultados do inventário do ciclo de vida às categorias de impacto selecionadas (classificação); e iii) o cálculo dos indicadores de categoria, onde os resultados do inventário dentro de cada categoria são quantitativamente convertidos por meio de fatores de caracterização (caracterização) (BISHOP, 2021).

SALIERI *et al.* (2021) sinaliza que diversos estudos foram realizados em relação à ACV de plásticos, porém os microplásticos só tem sido considerados em poucos estudos. O autor ainda cita que a ausência de dados de inventário de geração de microplásticos no ciclo de vida e da determinação de um fator de caracterização (FC) é um limitador para avaliar de forma mais ampla os impactos ambientais da liberação de microplásticos por meio do ACV.

O objetivo deste trabalho é avaliar quantitativamente o desempenho ambiental dos polímeros PET e PLA, desde a sua produção até o fim de vida em diferentes cenários de descarte, como aterro sanitário, reciclagem, incineração e disposição irregular, focando no potencial de geração de macroplásticos e microplásticos no ciclo de vida. Para realizar essa avaliação, foi empregada a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando as variações nos processos de produção e importação. Além disso, busca-se analisar os impactos ambientais associados à ecotoxicidade, pegada hídrica e de carbono.

OBJETIVO

Objetivo Geral

O objetivo geral desse estudo é avaliar comparativamente o desempenho ambiental de embalagens de Poli (tereftalato de etileno) (PET) e de Poli (ácido láctico) (PLA), incluindo os impactos ambientais provocados por emissão de macroplásticos e microplásticos no meio ambiente, além da avaliação de 12 categorias de impacto ambiental, em uma abordagem do berço ao túmulo: aquecimento global, acidificação

terrestre, eutrofização em água doce, eutrofização marinha, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, uso da terra, escassez de recursos fósseis, escassez de recursos minerais, vazamento de microplásticos e vazamento de macropplásticos.

Objetivos Específicos

- | Levantar dados secundários para modelar os processos de produção do PET de origem fóssil e o PLA, considerando todo o ciclo de vida até o pós-consumo em uma realidade brasileira.
- | Propor cenários de final de vida “business as usual” e “best case”, considerando a disposição final proveniente de PET e PLA e os cenários de descarte no Brasil.
- | Identificar vazamentos de macro e microplásticos para o oceano, relacionados ao ciclo de vida do PET e do PLA nos dois cenários.
- | Identificar fatores de caracterização e metodologias de cálculo propostas na literatura para a avaliação do impacto ambiental gerado por macro e microplásticos das resinas estudadas neste trabalho;
- | Avaliar comparativamente os resultados do ACV considerando quatro cenários, que variam em relação aos polímeros, os vazamentos de macro e microplástico e o tipo de destinação dos resíduos.

METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste estudo tem como objetivo principal realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) comparativa entre os polímeros poli(terefaltato de etileno) (PET) e poli(ácido lático) (PLA), seguindo as diretrizes normativas ISO 14040 e ISO 14044. Essa abordagem metodológica envolve as quatro etapas clássicas da ACV: definição de objetivo e escopo, elaboração do inventário, avaliação dos impactos ambientais e interpretação dos resultados. Toda a modelagem foi executada no software SimaPro (versão 9.4.0.3), utilizando dados de inventário secundários extraídos do banco Ecoinvent 3.8 e complementados com informações atualizadas da literatura científica especializada e outras fontes secundárias.

Para contemplar a realidade do mercado nacional, foram modelados quatro cenários distintos, dois para cada polímero: (1) PET em cenário “business as usual”, (2) PET em cenário “best case”, (3) PLA em cenário “business as usual” e (4) PLA em cenário “best case”. Esses cenários consideram diferentes rotas de produção, importação e destinação final, sempre no contexto brasileiro. Assim, foi possível analisar o desempenho ambiental de cada polímero sob diferentes condições de gestão de resíduos e infraestrutura de transporte.

A construção dos cenários foi precedida por uma revisão bibliográfica exploratória abrangente. Foram utilizados o Portal CAPES, Science Direct e Google Acadêmico, com as palavras-chave PET, PLA, produção, ACV e LCA. A triagem inicial resultou em 27 artigos publicados entre 2009 e 2024, reduzidos para 21 após o recorte para os últimos dez anos. Para assegurar a qualidade dos dados, restringiu-se a análise aos artigos publicados em revistas com fator de impacto superior à média dos estudos inicialmente identificados (7,73). Esse filtro resultou na seleção final de 10 artigos, dos quais 8 apresentaram estudos de ACV aplicados de acordo com as normas ISO.

Os artigos selecionados são provenientes de diversos países, como Estados Unidos, Irlanda, China, Holanda, Itália e Tailândia, destacando-se a relevância de fatores locais como tipo de cultivo agrícola e infraestrutura de exportação. Essa diversidade geográfica é essencial, visto que a produção de PLA e PET varia significativamente conforme as matérias-primas disponíveis e as rotas logísticas adotadas. Por exemplo, a NatureWorks (EUA) e a Total Corbion (Tailândia) são líderes globais na produção de PLA, utilizando milho e cana-de-açúcar, respectivamente. Tentativas de contato foram feitas para obtenção de dados primários, mas as respostas foram limitadas, restringindo-se aos dados públicos.

Com base na origem das resinas, adotou-se como premissa para o PLA a importação dos EUA, considerando o milho cultivado em Nebraska, enquanto para o PET considerou-se a importação da China, principal fornecedora do Brasil segundo a ABIPLAST (2023). O processo produtivo do PET envolve múltiplas etapas: síntese de PTA a partir de paraxileno, produção de MEG via óxido de etileno, polimerização, extrusão e moldagem. Já para o PLA, Moretti et al. (2021) descrevem as fases desde o cultivo do milho até a produção de ácido lático, lactídeo e, finalmente, a resina PLA.

As rotas de importação foram definidas considerando a realidade logística: o PET sai da província de Zhejiang, na China, através do Porto de Xangai, enquanto o PLA parte de Blair, Nebraska, via Porto de Chicago. Ambos seguem via transporte ferroviário até os portos, transporte marítimo até o Porto de Santos (SP) e, por fim, rodoviário até as indústrias de transformação localizadas majoritariamente em São Paulo.

Para o fim de vida, foram considerados dois cenários: o “business as usual”, baseado em dados da WWF (2019) e ABREMA (2023), e o “best case”, alinhado com as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos 2040. No cenário atual, grande parte dos resíduos de PET é encaminhada a aterros sanitários (51,53%), com apenas 9,57% reciclados. Para o PLA, a reciclagem ainda é incipiente no Brasil, sendo o aterro a principal rota. Já o cenário “best case” projeta melhorias como aumento da reciclagem para 20% do PET e PLA e inclusão da compostagem industrial para o PLA, refletindo o potencial de recuperação da fração orgânica.

A definição da unidade funcional (UF) adotou a produção de um copo descartável de 473 ml (16 oz), considerando os pesos médios de 16,3 g de PLA e 18 g de PET, baseados em dados do estudo de Americas (2009). O fluxo de referência foi ajustado proporcionalmente para cada etapa da cadeia. Os inventários de ciclo de vida (ICV) detalharam entradas de massa e energia. Para o PLA, foram utilizadas as referências de Rezvani et al. (2021) e Benavides et al. (2020), enquanto para o PET os dados vieram de Tamburini et al. (2021).

As distâncias logísticas foram levantadas com base no Sea Distances e Google Maps, considerando trajetos conservadores: Porto de Xangai a Santos (13.541 milhas náuticas) e Porto de Chicago a Santos (6.606 milhas náuticas). Para o transporte terrestre, consideraram-se distâncias como Nebraska–NatureWorks (231 milhas), Zhejiang–Xangai (210 km) e Porto de Santos–fábricas do ABC Paulista (66,3 km).

Por fim, ressalta-se que foram incluídos fatores como pegada de carbono, pegada hídrica e toxicidade, mas sem considerar o sequestro de carbono biogênico do milho, dado que o CO₂ é novamente emitido no fim de vida do PLA. Essa abordagem do “berço ao túmulo” assegura uma visão abrangente do desempenho ambiental de cada polímero, oferecendo subsídios para políticas públicas, planejamento logístico e tomada de decisão empresarial rumo a cadeias de valor mais sustentáveis.

RESULTADOS

Para o inventário de vazamentos de macro e microplásticos associados aos ciclos de vida dos polímeros PET e PLA, foi considerada a metodologia Plastic Leak Project (PLP). Foram calculados os vazamentos considerando três categorias principais: (i) vazamentos de macroplásticos provenientes de resíduos plásticos, estimados com base na massa de resíduos, taxa de perda nacional, taxa de lançamento para oceanos/água doce e taxa de redistribuição oceânica, utilizando dados nacionais; (ii) vazamentos de microplásticos devido ao desgaste de pneus durante o transporte rodoviário, estimados a partir das distâncias percorridas, perdas específicas por tipo de veículo e participação polimérica na banda de rodagem; e (iii) vazamentos de microplásticos resultantes da produção de pellets, calculados considerando taxa média de perda acumulada de 0,01% e redistribuição fluvial/oceânica.

Os resultados mostraram que os vazamentos estimados de macroplásticos foram de 0,00080 kg (PET) e 0,00072 kg (PLA) no cenário business as usual e 0,00016 kg (PET) e 0,00014 kg (PLA) no best case; os vazamentos de microplásticos devido à abrasão de pneus foram de 0,00037 kg para PET e 0,00242 kg para PLA; e os vazamentos de microplásticos pela produção de pellets foram de 0,000000211 kg para PET e 0,000000191 kg para PLA. Este inventário servirá como base para análises integradas de Avaliação de Ciclo de Vida com enfoque em impactos de macro e microplásticos em sistemas de produção de biopolímeros e polímeros fósseis.

Para a avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida analisado, foi adotada a metodologia ReCiPe 2016 Midpoint, por ser uma das mais atualizadas e amplamente reconhecidas na comunidade científica e industrial. O ReCiPe integra midpoints, que representam categorias intermediárias como mudança climática, acidificação e eutrofização, e endpoints, que traduzem os danos finais sobre saúde humana, ecossistemas e recursos naturais, permitindo análises abrangentes e de fácil comunicação para tomadores de decisão e público não técnico. O método abrange diversas categorias de impacto ambiental, incluindo mudanças climáticas, uso de recursos fósseis e minerais, toxicidade humana, ecotoxicidade, alterações no uso do solo e perdas de biodiversidade, estando alinhado a inventários e bancos de dados atualizados.

Além disso, oferece flexibilidade ao adotar diferentes perspectivas culturais: hierárquica, individualista e igualitária. A perspectiva hierárquica foi utilizada neste estudo, por refletir o consenso científico e políticas ambientais globais, adotando prazos médios a longos e nível moderado de incerteza, sendo considerada uma visão equilibrada. Em comparação, métodos como o CML limitam-se a midpoints e são menos atualizados, o Eco-Scarcity possui forte caráter regionalizado suíço, e o IMPACT 2002+ apresenta menor integração com bases modernas, justificando a escolha pelo ReCiPe.

Foram analisadas dez categorias de impacto: aquecimento global, acidificação terrestre, eutrofização em água doce, eutrofização marinha, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, uso da terra, escassez de recursos fósseis e minerais, além de duas categorias adicionais – Microplastic Leakage e Macroplastic Leakage –, desenvolvidas com base na metodologia Plastic Leak Project (PLP). Assim, foi possível realizar uma análise comparativa completa entre os quatro cenários modelados, gerando subsídios robustos para decisões de gestão ambiental e desenvolvimento de produtos com menor impacto ao longo do ciclo de vida.

A partir do inventário de ciclo de vida construído e da modelagem no SIMAPRO, foram obtidos os resultados apresentados no Gráfico e Tabela:

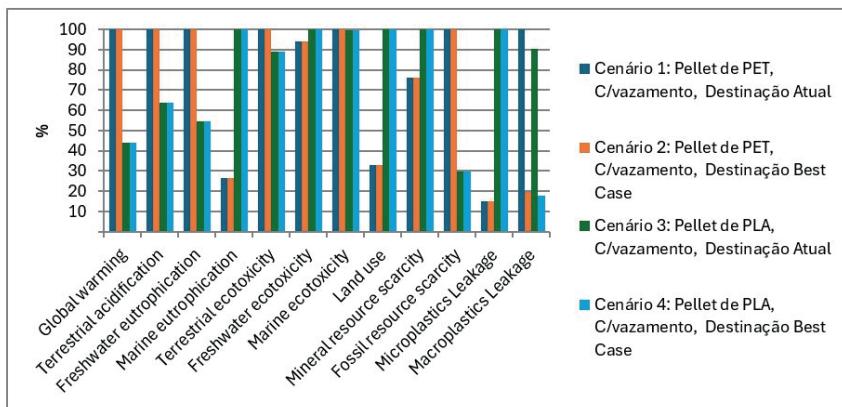


Gráfico 1 - Resultados da Análise Comparativa da ACV

Tabela 1 - Resultados por Categoria de Impacto Ambiental

Categoria de Impacto	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq	0,145	0,145	0,0639	0,0639
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	0,000489	0,000489	0,000312	0,000312
Eutrofização em Água Doce	Kg P eq	0,0000413	0,0000413	0,0000226	2,26E-05
Eutrofização Marinha	Kg N eq	0,00000351	0,00000351	0,0000132	0,0000132
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DCB	0,303	0,303	0,269	0,269
Ecotoxicidade em Água Doce	kg 1,4-DCB	0,00252	0,00252	0,00268	0,00268
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DCB	0,00344	0,00344	0,00343	0,00343
Uso da Terra	m ² a crop eq	0,0027	0,0027	0,00818	0,00818
Escassez de Recursos Minerais	kg Cu eq	0,000191	0,000191	0,000251	0,000251
Escassez de Recursos Fósseis	kg oil eq	0,0647	0,0647	0,0192	0,0192
Vazamento de Microplásticos	kg	0,000366	0,000366	0,00242	0,00242
Vazamento de Macroplásticos	kg	0,000796	0,000157	0,000721	0,000142

Não foram observadas diferenças significativas entre os cenários 1 e 2, bem como entre os cenários 3 e 4, nas categorias de impacto ambiental avaliadas, exceto nas categorias relacionadas ao vazamento de micro e macroplásticos. Essa ausência de variação se deve à baixa sensibilidade das alterações propostas nos padrões de destinação final dos resíduos, as quais não foram suficientes para gerar mudanças relevantes nos resultados obtidos.

Pegada de Carbono (Aquecimento Global)

A ACV demonstrou que a produção de PET gera maior pegada de carbono (0,145 kg CO₂eq/unidade funcional) em comparação ao PLA (0,0639 kg CO₂eq). No PET, predominam emissões de CO₂ fóssil e CH₄, associadas à extração de petróleo e produção de etileno e xileno. No PLA, as emissões de N₂O têm destaque devido ao uso de fertilizantes nitrogenados no cultivo agrícola, além da queima de gás natural em motores durante o armazenamento.

Acidificação Terrestre

O PET apresentou maior impacto para acidificação terrestre (0,000489 kg SO₂eq/unidade funcional) do que o PLA (0,000312 kg SO₂eq). No PET, as emissões de SO₂ provêm principalmente do transporte marítimo dos pellets, enquanto no PLA decorrem da queima de óleo combustível pesado em fornos e geradores usados na fermentação alcoólica e polimerização.

Eutrofização em Água Doce e Marinha

Para eutrofização em água doce, o PET gerou maior impacto (0,0000413 kg P eq) do que o PLA (0,0000226 kg P eq), principalmente por emissões de fosfato no tratamento de estéril de carvão betuminoso. Já na eutrofização marinha, o PLA foi mais impactante (0,0000132 kg P eq), devido às emissões de nitrato oriundas do cultivo de milho, enquanto o PET apresentou menor contribuição (0,00000351 kg P eq).

Ecotoxicidade Terrestre, em Água Doce e Marinha

Na ecotoxicidade terrestre, o PET teve maior impacto (0,303 kg 1,4 DCB) em comparação ao PLA (0,269 kg 1,4 DCB), com emissões de cobre, níquel e zinco relacionadas à geração de calor em processos industriais. Para ecotoxicidade em água doce e marinha, o PLA apresentou impacto levemente superior, principalmente pela emissão de cobre e zinco oriunda da fundição de cobre utilizada na produção de fertilizantes para o milho, enquanto no PET esses metais derivam de processos industriais de polimerização e produção dos monômeros.

Uso de Terra

O PLA apresentou impacto significativamente maior no uso de terras (0,00818 m²a crop eq) que o PET (0,0027 m²a crop eq). Isso se deve ao cultivo de milho para produção do PLA, que demanda grandes áreas agrícolas, frequentemente resultantes da conversão de florestas, enquanto no PET o impacto decorre principalmente da extração terrestre de petróleo e gás.

Escassez de Recursos Minerais e Fósseis

O PET foi responsável por praticamente 100% do impacto em escassez de recursos fósseis devido ao uso de petróleo e gás natural, enquanto o PLA apresentou maior impacto em recursos minerais, com destaque para cobre, níquel e ferro, utilizados em processos químicos e correção de pH durante a produção do PLA.

Vazamento de Micro e Macroplásticos

Para microplásticos, o PLA apresentou maior vazamento (0,00242 kg) comparado ao PET (0,000366 kg), devido à maior distância percorrida por transporte rodoviário (abrasão de pneus). Já o vazamento de macroplásticos foi mais alto no PET (0,000796 kg) em cenários de destinação inadequada, mas reduziu significativamente em ambos os polímeros com a adoção de práticas de gestão de resíduos mais sustentáveis.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foi identificado que, em um cenário hipotético no qual a produção dos polímeros PLA e PET ocorresse em território nacional, especificamente no estado de São Paulo, em substituição à atual dependência de importações oriundas dos Estados Unidos (para o PLA) e da China (para o PET), haveria uma redução significativa nos impactos ambientais associados ao transporte. A principal diferença estaria na eliminação da necessidade de longas rotas internacionais, que atualmente utilizam modais marítimo, ferroviário e rodoviário ao longo do ciclo de vida desses materiais.

Para isso, realizou-se uma análise de sensibilidade, na qual o transporte marítimo foi excluído do ciclo de vida dos dois polímeros, simulando-se um cenário de produção nacional. Como resultado, observou-se uma redução em todas as categorias de impacto ambiental, conforme apresentado na Tabela 2, com exceção das categorias de vazamento de micro e macroplásticos que permaneceram constantes, uma vez que as fontes geradoras desses materiais consideradas neste trabalho de acordo com a metodologia PLP está baseada na abrasão de pneus no modal rodoviário.

Tabela 2 - Análise de Sensibilidade

Categoria de Impacto	Unidade	Cenário 1 e 2 (PET)	% Redução PET	Cenário 3 e 4 (PLA)	% Redução PLA
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq	0,141	-2,76%	0,062	-2,97%
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	0,000402	-17,79%	0,000274	-12,18%
Eutrofização em Água Doce	kg P eq	0,0000407	-1,45%	0,0000223	-1,33%
Eutrofização Marinha	kg N eq	0,0000035	-0,28%	0,0000132	-0,28%
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DCB eq	0,291	-3,96%	0,264	-1,86%
Ecotoxicidade em Água Doce	kg 1,4-DCB eq	0,00249	-1,19%	0,00266	-0,75%
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DCB eq	0,00339	-1,45%	0,00341	-0,58%
Uso da Terra	m ² crop eq	0,00264	-2,22%	0,00816	-1,59%
Escassez de Recursos Minerais	kg Cu eq	0,000183	-4,19%	0,000247	-1,59%
Escassez de Recursos Fósseis	kg oil eq	0,0635	-1,85%	0,0187	-2,60%

Observou-se uma redução significativa nos impactos associados à acidificação terrestre, com diminuição de 17,79% para o ciclo de vida do PET e 12,18% para o ciclo de vida do PLA. Essa redução está relacionada às emissões de dióxido de enxofre (SO₂), provenientes principalmente da queima de combustíveis em embarcações marítimas, identificadas como a principal fonte de contribuição para essa categoria de impacto.

A redução dos vazamentos de microplásticos associados ao transporte rodoviário constitui um desafio significativo, especialmente no ciclo de vida do PLA, que inclui o transporte rodoviário entre as áreas de cultivo de milho em Nebraska e a unidade produtiva da NatureWorks. Nesse contexto, a substituição do modal rodoviário pelo ferroviário poderia resultar em uma redução expressiva de até 84,85% na geração de microplásticos, considerando especificamente esse impacto. Tal redução ocorre porque grande parte da poluição por microplásticos está relacionada à abrasão dos pneus de caminhões, que representa uma das principais fontes desse contaminante. No caso de biopolímeros produzidos nacionalmente, torna-se praticamente inviável eliminar essa fonte de vazamentos, uma vez que as plantações agrícolas se encontram, em geral, distantes dos centros urbanos e das unidades fabris, demandando transporte rodoviário para o escoamento da produção.

Adicionalmente, um novo arranjo logístico que priorize modais menos impactantes apresenta potencial para mitigar outros impactos ambientais, como o aquecimento global, ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa associadas

ao transporte marítimo de longa distância. Dessa forma, a produção nacional de polímeros se destaca como uma alternativa estratégica não apenas sob os aspectos logístico e econômico, mas também como uma medida eficaz para a redução de impactos ambientais relevantes ao longo de todo o ciclo de vida dos materiais.

Embora as taxas de biodegradabilidade dos polímeros PLA e PET não tenham sido incorporadas diretamente nos cálculos de vazamento de macro e microplásticos neste estudo, esse fator representa uma variável relevante que merece destaque e consideração em análises futuras.

A biodegradação do PLA (ácido polilático) em ambientes naturais está fortemente condicionada por fatores como temperatura, umidade, presença de oxigênio e estrutura físico-química do material. De acordo com EMADIAN *et al.* (2017), a cristalinidade elevada do polímero, aliada a uma estrutura química complexa e de cadeias longas, dificulta a ação de microrganismos e enzimas responsáveis pela degradação, já que essas características limitam a penetração de água e o acesso das enzimas ao interior da matriz polimérica.

CONCLUSÃO

De modo geral, os Cenários 1 e 2, que representam o uso de pellets de PET, registram os maiores valores em sete categorias: aquecimento global, acidificação terrestre, eutrofização em água doce, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade marinha, escassez de recursos fósseis e vazamento de macroplásticos, considerando os cenários de descarte de resíduos atuais. Esses dados indicam que o uso de PET está mais associado a impactos climáticos, de poluição e à dependência de combustíveis fósseis.

Por outro lado, os Cenários 3 e 4, referentes ao uso de pellets de PLA, têm os maiores impactos em cinco categorias. Esses cenários apresentam os maiores valores em eutrofização marinha, ecotoxicidade em água doce, uso do solo, escassez de recursos minerais e vazamento de microplásticos. Os cenários de PLA apresentam melhores resultados nas categorias relacionadas a emissões de gases de efeito estufa, acidificação terrestre, ecotoxicidade terrestre e marinha, eutrofização em água doce e escassez de recursos fósseis.

Em resumo, embora o PLA apresente vantagens claras em relação a emissões e poluição do solo e da água, ele não está isento de impactos relevantes, especialmente no que diz respeito ao uso de recursos naturais e geração de resíduos plásticos em formas menos perceptíveis. A escolha entre os materiais deve, portanto, considerar não apenas um critério isolado, mas uma análise completa do ciclo de vida e dos impactos ambientais envolvidos.

A análise do vazamento de micro e macroplásticos ao longo dos diferentes cenários modelados evidencia a complexidade envolvida na gestão ambiental de polímeros como o PET e o PLA. No caso dos micropolásticos, observou-se que a principal fonte de emissão está associada à abrasão de pneus durante o transporte rodoviário, o que torna a distância percorrida um fator determinante nos resultados. Assim, o PLA apresentou valores significativamente mais elevados devido ao seu maior percurso logístico, ainda que, na etapa de produção dos pellets, tenha apresentado ligeira vantagem sobre o PET em função da menor quantidade de material necessário por unidade funcional.

No tocante aos macroplásticos, ficou evidente a forte influência da eficácia dos sistemas de gestão de resíduos sobre os resultados obtidos. Os cenários baseados em práticas de descarte ambientalmente mais adequadas (Cenários 2 e 4) apresentaram reduções expressivas no vazamento de macroplásticos, demonstrando que melhorias na infraestrutura de coleta, tratamento e destinação de resíduos podem desempenhar um papel decisivo na mitigação desse impacto ambiental. O pior desempenho foi observado no Cenário 1, representando a realidade atual do PET, enquanto o melhor desempenho ocorreu no Cenário 4, que alia o uso do PLA a práticas mais sustentáveis de gestão de resíduos.

Dessa forma, conclui-se que, embora o tipo de polímero influencie os impactos ambientais relacionados ao vazamento de plásticos, o problema da poluição plástica só poderá ser efetivamente mitigado por meio de um conjunto de estratégias integradas, que combinem redução na fonte, substituição inteligente de materiais, gestão de resíduos eficiente, tecnologias de remoção e políticas públicas robustas, orientadas pelo princípio da economia circular.

Independentemente do tipo de polímero, os micropolásticos podem causar efeitos físicos nocivos aos organismos, como obstrução do trato digestivo, sensação de falsa saciedade e danos celulares, especialmente em espécies aquáticas e organismos de pequeno porte que ingerem essas partículas, reforçando a importância de serem controladas as fontes de vazamento desses materiais para o meio ambiente.

Além disso, os micropolásticos possuem elevada capacidade de adsorver poluentes orgânicos persistentes (POPs), como pesticidas e hidrocarbonetos, atuando como vetores de contaminação química em organismos aquáticos (CASTRO-CASTELLON *et al.*, 2022). Dessa forma, embora o PLA apresente características que indicam menor periculosidade ambiental em comparação ao PET, sobretudo em relação à persistência, à bioacumulação e à interação com contaminantes, é fundamental ressaltar que essas observações ainda são preliminares. A escassez de dados consolidados, sobretudo sobre o comportamento do PLA em ambientes diversos e não controlados, exige mais pesquisas experimentais, análises ecotoxicológicas e estudos de longo prazo. Apenas com uma base científica mais robusta será possível realizar uma avaliação precisa dos impactos reais desses micropolásticos no ambiente e na saúde dos ecossistemas.

REFERÊNCIAS

- ABREMA E PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/download-panorama-2023/>. Acessado em 17 de agosto de 2024.
- BISHOP, GEORGE, ET AL. "Environmental Performance Comparison of Bioplastics and Petrochemical Plastics: A Review of Life Cycle Assessment (LCA) Methodological Decisions". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 168, maio de 2021, p. 105451. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105451>.
- BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14.040:2006. Gestão ambiental – Análise de ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2006.
- CASTRO-CASTELLON, ANA T., ET AL. "Ecotoxicity of Microplastics to Freshwater Biota: Considering Exposure and Hazard across Trophic Levels". *Science of The Total Environment*, vol. 816, abril de 2022, p. 151638. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151638>.
- PEANO, L., KOUNINA, A., MAGAUD, V., CHALUMEAU, S., ZGOLA, M., BOUCHER, J., 2020. Plastic Leak Project. Methodological Guidelines. Quantis and EA. quantis-intl.com/plastic-leakproject-guidelines.
- REZVANI GHOMI, ERFAN REZVANI, ET AL. "The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material". *Polymers*, vol. 13, no 11, junho de 2021, p. 1854. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/polym13111854>.
- TAMBURINI, ELENA, ET AL. "Plastic (PET) vs Bioplastic (PLA) or Refillable Aluminium Bottles – What Is the Most Sustainable Choice for Drinking Water? A Life-Cycle (LCA) Analysis". *Environmental Research*, vol. 196, maio de 2021, p. 110974. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110974>.
- WALKER, S., E R. ROTHMAN. "Life Cycle Assessment of Bio-Based and Fossil-Based Plastic: A Review". *Journal of Cleaner Production*, vol. 261, julho de 2020, p. 121158. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121158>.
- WWF - Fundo Mundial para a Natureza, Solucionar a Poluição Plástica: Transparência e Responsabilização, 2019.