UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A. C. SIMÕES
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

JIMENA CORTÉS BELCHES

POLUIÇÃO PLÁSTICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTRESSORES ECOSSISTÊMICOS INTRINSECAMENTE LIGADOS

Maceió
2024

JIMENA CORTÉS BELCHES

POLUIÇÃO PLÁSTICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTRESSORES ECOSSISTÊMICOS INTRINSECAMENTE LIGADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Ciências Biológicas

Orientador: Prof. Dr. Robson Guimarães dos Santos.

Maceió

2024

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C828p Cortés Belches, Jimena.
Poluição plástica e mudanças climáticas : estressores ecossistêmicos intrinsecamente ligados / Jimena Cortés Belches. – Maceió, 2024.
61 f. : il.

Orientador: Robson Guimarães dos Santos.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Ciências Biológicas: bacharelado) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 54-61.

1. Poluição plástica. 2. Mudanças climáticas. 3. Estressores ecossistêmicos. I. Título.

CDU: 504

Folha de Aprovação

JIMENA CORTÉS BELCHES

POLUIÇÃO PLÁSTICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTRESSORES ECOSSISTÊMICOS INTRINSECAMENTE LIGADOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 04 novembro de 2024

(Orientador - Prof. Dr. Robson Guimarães dos Santos, Universidade Federal de Alagoas)

Banca examinadora:

(Examinador Interno - Prof. Dr. Osvaldo Viégas, Universidade Federal de Alagoas)

(Examinador Interno - Prof. Dr. Marcos Vinícius Carneiro Vital- Universidade Federal de Alagoas)

Para una pequeña grande soñadora y todas las personas que pusieron plumas en sus alas para volar.

AGRADECIMENTOS

A Dios, mí Dios de promesas, por tu infinita fidelidad y por siempre poner mis pies en lugares espaciosos.

A mis padres, Octavio y Mildred, por ser el motivo de hoy estar donde estoy. Como decía cuando era pequeña, no me alcanzarían los días de una vida entera para decirles cuánto los amo y cuán agradecida estoy.

A mis hermanos, Octavio, Carol y Jackie, cada uno de ustedes es un pilar que sostiene mi vida. No podría haberle pedido a Dios mejores compañeros para conquistar montañas y atravesar valles.

Ao meu orientador, Prof. Robson, por sua orientação e apoio não apenas durante o desenvolvimento deste trabalho, mas também ao longo de todo o meu curso. Sua dedicação e conhecimento foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Finalmente, pero no menos importante, a todas esas personas que han formado parte de mi camino como persona y profesional: a mis profesores, amigos y familia que han estado en cada paso sumando pedacitos en la construcción de este sueño. Un inmenso gracias.

RESUMO

A humanidade enfrenta uma policrise sem precedentes, na qual as pressões antropogênicas sobre os sistemas do planeta atingem uma escala e intensidade que resultam em mudanças ambientais abruptas e inegáveis. Essas perturbações, como a poluição plástica e as mudanças climáticas, têm sido abordadas, em grande parte, de forma isolada ou até como questões opostas. No entanto, essa abordagem desconsidera as interações não lineares entre essas pressões e seus efeitos cumulativos no sistema terrestre. Este trabalho, portanto, visa avaliar como a comunidade científica tem explorado as inter-relações entre a poluição plástica e as mudanças climáticas, identificando as principais abordagens e sua evolução ao longo do tempo. Por meio de uma revisão sistemática da literatura na base de dados Web of Science (WoS) Core Collection, foram analisadas 909 publicações, abrangendo o período de 2006 a 2024, utilizando as palavras-chave: ("Plastic pollution" OR microplastics OR "synthetic polymer") AND ("climate change" OR "global warming" OR "extreme weather"). Dos artigos analisados, 20,5% abordaram diretamente as interconexões entre esses dois estressores ecossistêmicos, enquanto 43,3% mencionaram tais interações de forma indireta. Apenas 0,44% investigaram a ausência de conexões entre poluição plástica e mudanças climáticas de forma explícita, enquanto 1% o fez incidentalmente. Além disso, 34,8% das publicações não exploraram qualquer relação entre os dois temas. O aumento exponencial de publicações ao longo dos anos sugere uma evolução científica que integra, progressivamente, esses estressores como elementos interconectados em um sistema global. No entanto, persiste uma lacuna significativa em estudos que abordem diretamente as interações sinérgicas amplas entre poluição plástica e mudanças climáticas. Resolver esses desafios e seus efeitos cumulativos demanda uma abordagem holística e integrada. Este estudo identifica tendências, lacunas e oportunidades para pesquisas futuras, promovendo uma compreensão mais profunda desses estressores como componentes inter-relacionados de um único sistema global.

Palavras-chave: Poluição Plástica; Mudanças Climáticas; Estressores Ecossistêmicos.

ABSTRACT

Humanity is currently facing an unprecedented polycrisis, where anthropogenic pressures on planetary systems have reached a scale and intensity resulting in abrupt and undeniable environmental changes. These environmental disturbances, such as plastic pollution and climate change, have mostly been addressed as isolated or even opposing issues. However, this approach overlooks the nonlinear interactions between these stressors and their cumulative effects on the Earth's system. Therefore, this work aims to evaluate how the academic community has explored the interrelationships between plastic pollution and climate change, identifying and analyzing the main approaches and their evolution over time. Through a systematic literature review using the Web of Science (WoS) Core Collection, 909 publications were analyzed, covering the period from 2006 to 2024, using the keywords: ("Plastic pollution" OR microplastics OR "synthetic polymer") AND ("climate change" OR "global warming" OR "extreme weather"). Among the analyzed articles, 20.5% directly addressed the interconnections between these two ecosystem stressors, while 43.3% mentioned such interactions indirectly. Only 0.44% explicitly investigated the absence of connections between plastic pollution and climate change, while 1% did so incidentally. Additionally, 34.8% of the publications did not explore any relationship between the two topics. The exponential growth in the number of publications over the years suggests a scientific evolution towards a conceptual integration of these stressors, increasingly studied as interrelated elements within a global system. However, there remains a significant gap in studies directly addressing the broad spectrum of synergistic interactions between plastic pollution and climate change. Addressing these issues and their cumulative effects requires a holistic and integrated approach. This study identifies trends, gaps, and opportunities for future research, promoting a deeper understanding of these stressors as interconnected components of a single global system.

Keywords: Plastic pollution; Climate Change; Ecosystemic stressors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Atualização mais recente do estado dos Nove Limites do planeta 16
Figura 2: Emissões de GEE e o Risco de Aumento da Temperatura Global: Limite Crítico de 1,5 °C.....20
Figura 3: Produção Mundial de Plástico 22
Figura 4: Interligações Poluição por Plástico e as Mudanças Climáticas.....33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Produção Acadêmica Categorizada por Tema e Menção 28
Gráfico 2: Evolução temporal Geral da produção Acadêmica 29
Gráfico 3: Evolução Temporal no panorama Sinergético e de Oposição 31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFAL	Universidade Federal de Alagoas
GEE	Gases Efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ppm	Partes por milhão
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
PE	Polietileno
Gt	Gigatoneladas
PSALSAR	Protocolo, Busca, Avaliação, Síntese, Análise e Resultado
SLP	Revisão Sistemática da Literatura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO 16
2.1 Mudanças Climáticas 19
2.2 Poluição por Plástico 20
2.3 Poluição Plástica e Mudanças Climáticas 23
3 METODOLOGIA 24
3.1 Protocolo 24
3.2 Busca 25
3.3 Avaliação 25
3.3.1 Critérios de Inclusão 25
3.3.2 Critérios de Exclusão 26
3.4 Síntese 26
3.5 Análise e reporte 27
4 RESULTADOS 28
4.1 Evolução Temporal 29
4.2 Estressores Ecossistêmicos Intrinsecamente Ligados 32
4.2.1 Links Poluição Plástica - Mudanças Climáticas 32
4.2.1.1 Ciclo de Vida do Plástico 32
4.2.1.2 Impactos Ecossistêmicos 39
4.2.1.3 Bioplásticos 42
4.2.2 Links Mudanças Climáticas- Poluição Plástica 42
4.2.2.1 Distribuição de plástico 43
4.2.2.2 Degradação 44
4.2.2.3 Interações com Fatores Ambientais 45
5 DISCUSSÃO 48
6 CONCLUSÃO 52
7 REFERÊNCIAS 54

1 INTRODUÇÃO

A humanidade enfrenta atualmente uma policrise sem precedentes, na qual as pressões antropogênicas sobre os diversos sistemas do planeta atingiram uma escala e intensidade que resultam em mudanças ambientais abruptas e inegáveis (ROCKSTRÖM et al., 2009; STEFFEN et al., 2015). Atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, a agricultura industrializada, a urbanização e o consumismo exacerbado, têm impactado o funcionamento e a resiliência do planeta, comprometendo sua capacidade de sustentar as gerações presentes e futuras (IPCC, 2022).

Nesse contexto, o marco dos “Limites do planeta” define um espaço operacional seguro, dentro de nove domínios ambientais nos quais a humanidade deve atuar a fim de garantir a manutenção da estabilidade planetária e dos sistemas de suporte à vida (ROCKSTRÖM et al., 2009). Esse quadro estabelece níveis de perturbações antropogênicas abaixo dos quais o risco de desestabilização do Sistema Terrestre permanece seguro ou representa um perigo iminente (STEFFEN et al., 2015).

Atualmente, ditas perturbações ambientais antropogênicas são abordadas principalmente como questões isoladas ou até opositoras entre si, competindo por recursos tanto em pesquisa quanto em políticas públicas (FORD et al., 2022). No entanto, essa abordagem ignora as interações não lineares entre essas perturbações e os efeitos cumulativos resultantes sobre o estado geral do sistema terrestre. Os limites do planeta oferecem uma compreensão científica dos impactos ambientais globais provocados por atividades humanas dentro de parâmetros que requerem um enfoque holístico do estado do sistema terrestre (STEFFEN et al., 2020).

Entre os nove limites, dois têm capturado a atenção global recentemente: as "Novas Entidades" e as "Mudanças Climáticas", ambos classificados em uma zona de risco crescente de desestabilização sistêmica (PERSSON et al., 2022). O limite das Novas Entidades refere-se a substâncias novas ou modificadas pelo homem, como produtos químicos sintéticos e materiais plásticos, que o sistema terrestre ainda não é capaz de assimilar (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; ZHENG; SUH, 2019). Por outro lado, o limite das Mudanças Climáticas abrange as emissões de gases de efeito estufa, aerossóis e alterações no albedo da superfície terrestre, que influenciam diretamente a temperatura global e os padrões climáticos (IPCC, 2023).

Ambos, representam dois dos grandes desafios ambientais do século XXI. Apesar disso, há uma crescente concorrência desses problemas globais, juntamente com outros fatores de estresse que ameaçam a resiliência do planeta (ZHENG; SUH, 2019). A poluição plástica e as mudanças climáticas, são um claro exemplo dessa divergência de abordagens que ignoram, aceitam ou contrariam as interações não lineares entre perturbações e os efeitos cumulativos.

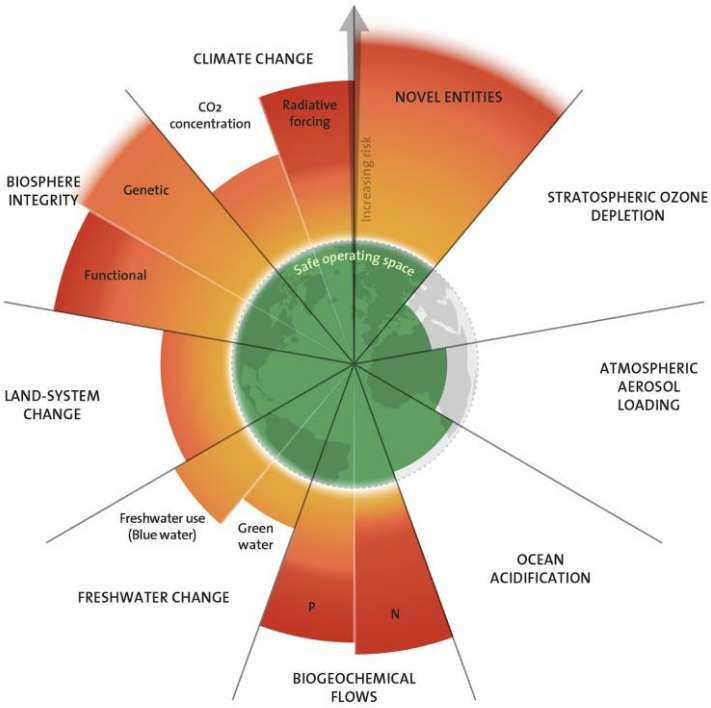
O que é sim evidente é que agora estamos em uma "zona de transgressão" dos Limites do planeta, e que tanto a poluição plástica quanto as mudanças climáticas representam uma ameaça para a segurança global das gerações atuais e futuras (STEFFEN et al., 2020). Em um mundo com poli crises e recursos limitados, encontrar pontos de interseção entre esses problemas é essencial para a criação de estratégias mitigadoras eficazes. Identificar tendências, lacunas e oportunidades para novas pesquisas, que promovam uma compreensão mais profunda desses estressores como parte de um sistema interconectado pode fortalecer a respostas às crises ambientais.

Resolver a poluição plástica e as mudanças climáticas e seus efeitos cumulativos requer uma abordagem holística e integrada que considere promover a colaboração e a cooperação entre diferentes partes interessadas, como governos, empresas, sociedade civil e pesquisa. Desta maneira o presente trabalho busca avaliar de que maneira a comunidade científica tem explorado as inter-relações entre a poluição plástica e as mudanças climáticas, identificando e analisando as principais abordagens e sua evolução ao longo do tempo.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

A humanidade enfrenta atualmente uma policrise sem precedentes, onde pressões antropogênicas, como a combustão de combustíveis fósseis, agricultura industrializada e consumismo exacerbado, estão influenciando o funcionamento e resiliência do planeta Terra para permanecer em um estado que possa sustentar a segurança das gerações atuais e futuras (Richardson et al., 2023). Nesse cenário, o marco dos "Limites do planeta" identifica os níveis de perturbações antropogênicas abaixo dos quais, nove contextos imprescindíveis para a garantia da estabilidade do Sistema Terrestre, representam risco de desestabilização (STEFFEN et al., 2020) (Figura 1).

Figura 1: Atualização mais recente do estado dos Nove Limites do planeta



Fonte: Richardson (2023).

Proposto por Johan Rockström e um grupo de 28 especialistas internacionais em 2009, o arcabouço dos Limites do planeta delineia os sistemas e processos biofísicos e bioquímicos conhecidos por regular o estado do planeta dentro de faixas historicamente conhecidas e cientificamente prováveis de manter a estabilidade do sistema terrestre e os sistemas de suporte à vida que favorecem o bem-estar humano e o desenvolvimento social, como experimentado durante o Holoceno. Em outras palavras, essas fronteiras definem o "espaço operacional"

seguro para a humanidade em relação ao sistema terrestre e estão associadas aos subsistemas ou processos biofísicos que determinam a capacidade de autorregulação do planeta, ou seja, os processos físicos, químicos e biológicos interconectados na terra, nos oceanos e na atmosfera (RICHARDSON et al., 2023).

Se esses limiares forem ultrapassados, subsistemas importantes podem mudar para um novo estado, muitas vezes com consequências prejudiciais ou potencialmente catastróficas para a humanidade (SCHELLNHUBER, 1998). Assim, todas as fronteiras do arcabouço utilizam as condições pré-industriais do Holoceno como referência para avaliar a magnitude das alterações antropogênicas (ZALASIEWICZ et al., 2017). Durante o Holoceno, as mudanças ambientais ocorreram de forma natural, e a capacidade reguladora da Terra manteve as condições que possibilitaram o desenvolvimento humano, período no qual a agricultura e as civilizações modernas evoluíram, caracterizado por condições planetárias relativamente estáveis e amenas (ZALASIEWICZ et al., 2015).

Porém, desde a Revolução Industrial, uma nova era surgiu, o Antropoceno, na qual as ações humanas tornaram-se o principal motor da mudança ambiental global (FORD et al., 2022; ZALASIEWICZ et al., 2015). Como proposto por Crutzen (2002), o Antropoceno representa um sistema terrestre que mudou irreversivelmente em relação às condições anteriores, para um estado ainda em evolução, para o qual o nome Holoceno não pode mais ser considerado apropriado.

A transformação representada pelo Antropoceno foi caracterizada pela alteração da química atmosférica; um clima em aquecimento; derretimento irreversível de calotas polares e elevação do nível do mar; erosão e sedimentação aceleradas e proliferação de bens industriais, muitos compostos de materiais artificiais como plásticos, entre outros (FISCHER-KOWALSKI; KRAUSMANN; PALLUA, 2014).

Com isso, foram identificados nove desses processos para definir os limites planetárias frente às pressões enfrentadas por novos cenários, sendo: mudança climática; taxa de perda de biodiversidade terrestre e marinha; interferência nos ciclos de nitrogênio e fósforo; diminuição da camada de ozônio estratosférico; acidificação dos oceanos; uso global de água doce; mudança no uso da terra; novas entidades; e carga de aerossóis atmosféricos (ROCKSTRÖM et al., 2009). As nove fronteiras representam componentes do sistema terrestre criticamente

afetados por atividades antropogênicas e relevantes para o estado geral da Terra(STEFFEN et al., 2015).

As posições das fronteiras não demarcam ou preveem mudanças singulares nos limiares do estado do sistema terrestre (STEFFEN et al., 2020). Elas são estabelecidas em níveis onde as evidências disponíveis sugerem que uma perturbação adicional dos processos individuais pode potencialmente levar a uma mudança sistêmica planetária, alterando e reconfigurando fundamentalmente as dinâmicas e os padrões espaço-temporais das interações entre a geosfera e a biosfera, e seus retroalimentadores (ROCKSTRÖM et al., 2009).

A atualização mais recente mostrou que seis dos nove Limites já foram transgredidos (ROCKSTRÖM et al., 2009) (Figura 1). Ultrapassar essas fronteiras aumenta o risco de gerar mudanças ambientais abruptas e irreversíveis em larga escala. Mudanças drásticas podem não ocorrer de imediato, mas, em conjunto, essas fronteiras marcam um limiar crítico para o aumento dos riscos à humanidade e aos ecossistemas dos quais fazemos parte (LADE et al., 2019).

Dentro dos limites recentemente quantificados como transgredidos, existem dois que recentemente têm capturado uma atenção crescente: Entidades Novas e Mudanças Climáticas.

As Entidades Novas, são definidas por Steffen et al. (2015) como "novas substâncias, novas formas de substâncias existentes e formas de vida modificadas", incluindo "químicos e outros novos tipos de materiais ou organismos engenheirados não previamente conhecidos pelo sistema terrestre". Atualmente se argumenta que a introdução antropogênica de entidades novas no ambiente é preocupante em nível global quando essas entidades apresentam persistência, mobilidade em diferentes escalas, consequente distribuição e acumulação em organismos e no ambiente, além de impactos negativos potenciais nos processos ou subsistemas vitais do sistema terrestre (COLE et al., 2011).

Por sua vez, o Limite das Mudanças Climáticas, baseia-se no equilíbrio dos gases de efeito estufa, o comportamento das grandes camadas de gelo polares sob climas mais quentes e o comportamento observado do sistema climático com a atual concentração de CO2 (STEFFEN et al., 2020).

Sendo assim, embora as fronteiras planetárias sejam descritas em termos de quantidades individuais e processos separados, elas estão fortemente interligadas. Se uma fronteira for transgredida, outras fronteiras também estarão sob sério risco (RICHARDSON et al., 2023).

2.1 Mudanças Climáticas

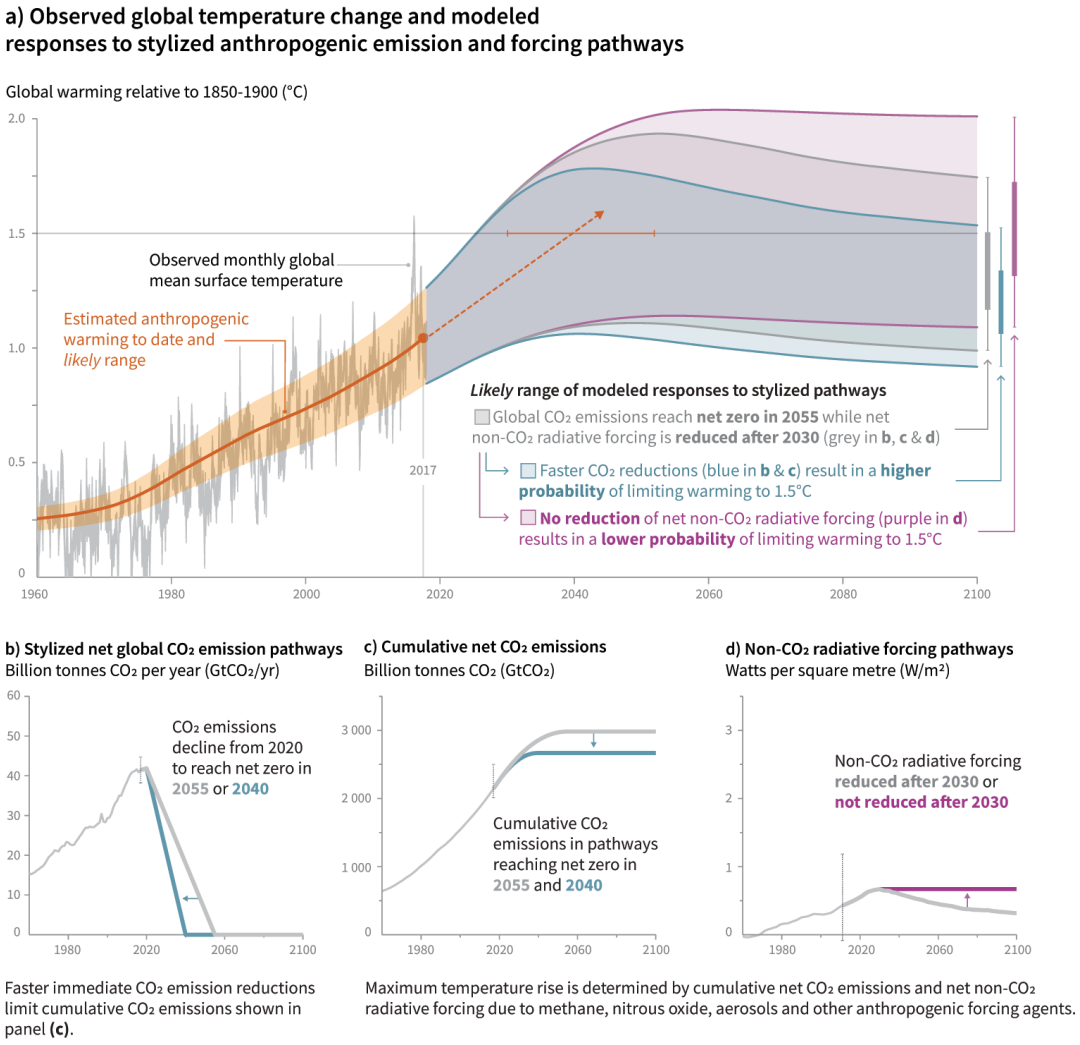
As mudanças climáticas referem-se a alterações duradouras nos padrões de clima e temperatura global, associadas principalmente ao aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (YUE; GAO, 2018). Estes gases, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos nitrosos (N_2O), são resultantes tanto de processos naturais quanto de atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas intensivas (IPCC, 2022). O efeito estufa, um processo natural pelo qual a atmosfera retém parte da energia irradiada pela superfície da Terra, é intensificado por essas atividades, resultando no aquecimento global (IPCC, 2023b).

A intensificação do efeito estufa impulsiona uma série de eventos climáticos extremos. A literatura científica aponta que o aumento da temperatura média global exacerba a frequência e a intensidade de eventos como secas prolongadas, ondas de calor, tempestades tropicais e inundações (DIFFENBAUGH; FIELD, 2013). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (2019), há uma correlação direta entre o aquecimento global e a amplificação desses eventos, o que aumenta significativamente os riscos para os sistemas ecológicos e humanos. Estes extremos climáticos não apenas desafiam as capacidades de adaptação das sociedades, mas também ameaçam a segurança alimentar, hídrica e a saúde humana, especialmente em regiões vulneráveis (IPCC, 2021).

A relação entre o ser humano e o clima começou a ser discutida de forma mais sistemática a partir da Revolução Industrial, quando o uso de combustíveis fósseis aumentou drasticamente a concentração de CO_2 na atmosfera (STEFFEN et al., 2015). Desde então, a concentração atmosférica de CO_2 aumentou em mais de 40%, passando de aproximadamente 280 partes por milhão (ppm) na era pré-industrial para mais de 410 ppm em 2021 (NOAA, 2023). Esse aumento é amplamente atribuído à queima de combustíveis fósseis. O impacto humano se intensificou ao longo do século XX, levando à emergência de um novo conceito: o Antropoceno, uma época geológica caracterizada pela influência predominante da atividade humana nos processos naturais da Terra (CRUTZEN, 2002).

O IPCC, em seu Sexto Relatório de Avaliação, projetou que, se as emissões de GEE continuarem no ritmo atual, o aquecimento global poderá alcançar 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais até 2040 (IPCC, 2021) (Figura 2). Superar o limite de 1,5 °C seria catastrófico, colocando em risco o resto de sistemas do planeta (ARMSTRONG MCKAY et al., 2022).

Figura 2: Emissões de GEE e o Risco de Aumento da Temperatura Global: Limite Crítico de 1,5 °C



Fonte: IPCC (2019).

2.2 Poluição por Plástico

O plástico é um material sintético composto principalmente por polímeros, macromoléculas formadas pela repetição de unidades químicas menores chamadas monômeros

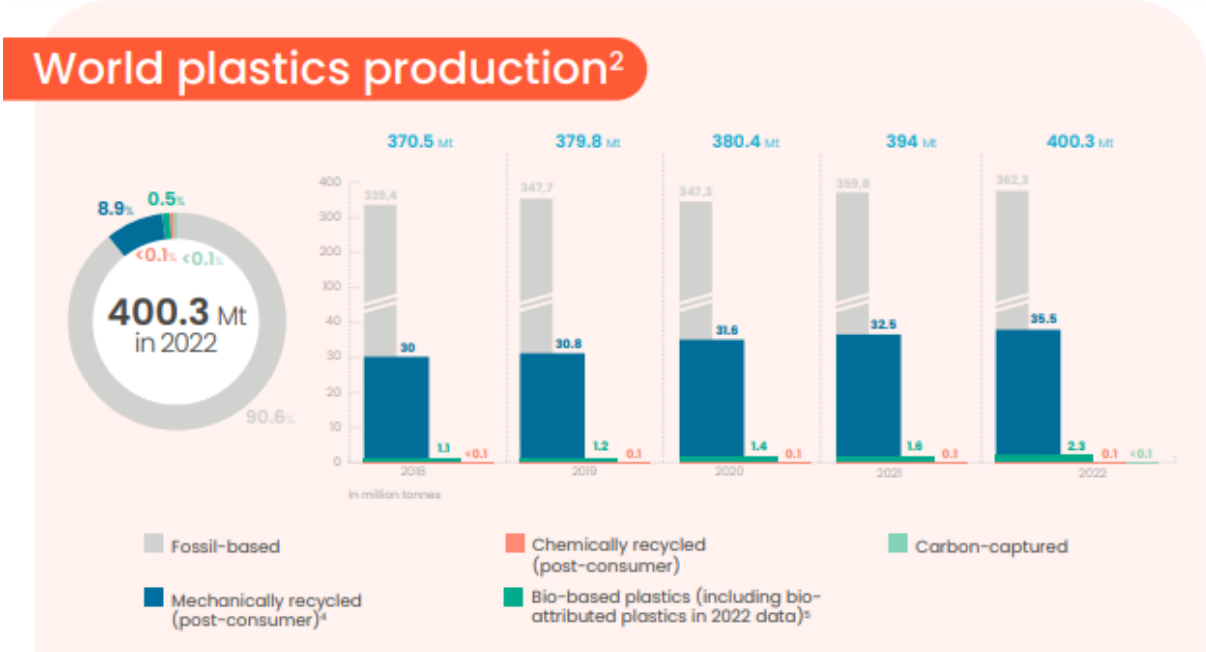
(Heinrich Böll, 2020). Entre os polímeros mais comuns estão o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC), todos derivados principalmente do petróleo e gás natural. A versatilidade do plástico, que pode ser moldado em diversas formas e oferece durabilidade, leveza e baixo custo, levou à sua adoção em uma ampla gama de aplicações, desde embalagens até componentes de veículos e dispositivos médicos (ANDRADY; NEAL, 2009).

O desenvolvimento do plástico revolucionou a indústria global no século XX, especialmente após a invenção da baquelite, o primeiro plástico totalmente sintético, em 1907 (OECD, 2022). A partir desse ponto, o plástico passou a ser um material inovador que rapidamente substituiu materiais naturais como madeira, vidro e metal, devido à sua maleabilidade e resistência (FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL, 2020). Durante e após a Segunda Guerra Mundial, suas aplicações se expandiram, abrangendo setores como saúde, transporte, construção civil, e, principalmente, embalagens (THOMPSON et al., 2024).

A produção global de plásticos aumentou de forma exponencial desde a década de 1950, quando foram produzidas aproximadamente 1,5 milhão de toneladas por ano. Hoje, esse número ultrapassa 400 milhões de toneladas anuais (PLASTICS EUROPE, 2023) (Figura 3). Essa explosão na produção de plásticos, impulsionada pela demanda crescente e pela adoção em setores industriais, trouxe consigo sérias preocupações ambientais, principalmente devido à baixa biodegradabilidade desses materiais(WANG et al., 2024). A maioria dos plásticos pode levar séculos para se decompor completamente, permanecendo no ambiente em forma de microplásticos, com consequências ambientais e ecológicas graves (JAMBECK et al., 2015).

Sendo assim, a poluição plástica tornou-se um problema global urgente, com a acumulação e disseminação inadequada de resíduos plásticos desde as praias mais remotas até os oceanos profundos, e até mesmo na atmosfera (LEBRETON et al., 2017). Dado que o plástico é resistente à degradação natural, os detritos plásticos se fragmentam em partículas menores, chamadas de microplásticos (≤5 mm), que são facilmente transportados por ventos, rios e correntes oceânicas. Estima-se que cerca de 8 milhões de toneladas de plástico entrem nos oceanos anualmente, criando um impacto devastador sobre a fauna marinha, ecossistemas aquáticos e cadeias alimentares (JAMBECK et al., 2015).

Figura 3: Produção Mundial de Plástico



Fonte: Plastics Europe (2023).

Além dos impactos físicos sobre a fauna, como ingestão e emaranhamento, estudos têm mostrado que os microplásticos podem entrar na cadeia alimentar humana, embora as implicações à saúde ainda estejam sendo amplamente investigadas (ROCHMAN et al., 2013). Dessa maneira, governos e organizações internacionais têm reconhecido a necessidade de uma ação urgente. Em 2022, a Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente deu um passo histórico ao aprovar a negociação de um tratado vinculativo global que visa regular a produção, o consumo e a gestão de resíduos plásticos, um marco na luta contra a poluição plástica (JANSEN et al., 2024).

Embora os impactos exatos do plástico sobre os processos biogeoquímicos ainda estejam sendo estudados, a poluição plástica foi recentemente adicionada à lista de processos que constituem os Limites do planeta, sendo que há consenso crescente de que a produção desenfreada e a acumulação de resíduos plásticos já ultrapassaram a capacidade de assimilação dos ecossistemas, representando uma nova ameaça global (PERSSON et al., 2022; ROCKSTRÖM et al., 2009).

2.3 Poluição Plástica e Mudanças Climáticas

A produção de plásticos está diretamente ligada à indústria petroquímica, que utiliza combustíveis fósseis, principalmente petróleo e gás natural, como matéria-prima para a fabricação de polímeros plásticos (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017). Estima-se que, em 2019, a cadeia de valor do plástico tenha contribuído com aproximadamente 1,8 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente ($GtCO_2e$), ou cerca de 3,4% das emissões globais de GEE, o que pode ser um fator de contribuição para as mudanças climáticas (ZHENG; SUH, 2019).

Por outro lado, os plásticos também possuem características que podem contribuir para a mitigação das emissões de GEE. Devido à sua leveza e resistência, os plásticos são utilizados em uma variedade de indústrias para substituir materiais mais pesados, como vidro, madeira e metal (CHANG et al., 2022). Esta substituição resulta em menores emissões de dióxido de carbono durante o transporte, uma vez que veículos mais leves consomem menos combustível. Além disso, em setores como o automobilístico e o de embalagens, os plásticos ajudam a melhorar a eficiência energética, reduzindo o peso dos veículos e aumentando a durabilidade dos produtos (JIAO et al., 2024). Portanto, embora os plásticos contribuam para as emissões ao longo de seu ciclo de vida, suas propriedades também oferecem oportunidades para reduzir as emissões, especialmente quando comparados a materiais tradicionais.

Nos últimos anos, a ciência tem documentado mais detalhadamente a poluição plástica e as mudanças climáticas, reconhecendo que ambos representam limites do planeta críticos, contudo os diálogos sobre suas ligações ainda não são representados por um consenso ou riqueza de evidências integradas.

3 METODOLOGIA

Apoiado no embasamento teórico, o presente estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura abordando as interseções entre a poluição por plástico e mudanças climáticas. Esta abordagem foi escolhida por permitir mapear e avaliar o conhecimento existente sobre o tópico e sua evolução. A revisão adotou o referencial teórico PSALSAR (MENGIST; SOROMESSA; LEGESE, 2020), um procedimento que adiciona duas etapas essenciais (protocolo e relato de resultados) ao protocolo amplamente conhecido como SALSA — Search, Appraisal, Synthesis, and Analysis (GRANT; BOOTH, 2009), que define os protocolos de busca que a revisão sistemática da literatura deve seguir.

De acordo com Nightingale (2009), as revisões sistemáticas têm como objetivo identificar todas as pesquisas relevantes sobre uma questão específica, utilizando métodos explícitos e sistemáticos para fornecer um resumo equilibrado e imparcial da literatura. Essa abordagem busca aumentar a transparência em todas as etapas do processo, minimizando vieses na seleção e inclusão dos estudos, avaliando sua qualidade e sintetizando-os de maneira objetiva (LIBERATI et al., 2009). Para atingir esses objetivos, o framework PSALSAR de revisão sistemática da literatura (SLR) segue seis etapas: protocolo, busca, avaliação, síntese, análise e relato.

3.1 Protocolo

O tema “Poluição por Plástic o e Mudanças Climáticas: Estressores Ecossistêmicos Intrinsecamente Ligados” guiou a construção da estratégia de formulação das perguntas norteadoras da pesquisa. As perguntas formuladas foram: Como a comunidade científica tem abordado as ligações entre poluição plástica e mudanças climáticas? De que forma essas questões têm sido tratadas? E como essas abordagens evoluíram ao longo do tempo? Isso permitiu, subsequentemente, o refinamento dos objetivos do presente estudo, que visam avaliar como a comunidade científica tem explorado as inter-relações entre poluição plástica e mudanças climáticas, identificando e analisando as principais abordagens, além de retratar a evolução temporal dessas investigações e abordagens científicas sobre o tema.

3.2 Busca

Para a identificação de estudos relevantes que abordassem as perguntas de pesquisa, a estratégia de busca foi principalmente direcionada à poluição por plástico e às mudanças climáticas, utilizando palavras-chave e operadores booleanos em inglês: ***("Plastic pollution" OR microplastics OR "synthetic polymer") AND ("climate change" OR "global warming" OR "extreme weather").*** A base de dados selecionada para este estudo foi a base Web of Science (WoS) Core Collection, um índice de citação que abrange publicações científicas e acadêmicas, incluindo periódicos, anais de conferências, livros e compilações de dados, reconhecida como a base de dados mais antiga, amplamente utilizada e autoritativa em publicações e citações científicas no mundo (BIRKLE et al., 2020). É importante ressaltar que, antes de realizar a busca sistemática, foram realizadas buscas piloto na literatura para refinar as palavras-chave, garantindo que elas atendessem aos objetivos específicos do estudo. A janela temporal escolhida para a revisão sistemática abrange documentos publicados a partir do ano 2000 até agosto de 2024, sem restrição quanto ao tipo de documento, com o intuito de captar uma variedade de abordagens. Essa escolha da janela temporal se justifica pelo crescimento tecnológico no início dos anos 2000, que ampliou o acesso à informação, além de coincidir com a adoção dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), estimulando pesquisas relacionadas a problemas ambientais globais.

3.3 Avaliação

Os artigos recuperados foram analisados com base nos critérios de inclusão e exclusão. Os artigos que atendiam aos critérios de inclusão foram selecionados para uma investigação e avaliação de conteúdo mais aprofundada; caso contrário, foram excluídos. O processamento dos dados foi realizado no software Microsoft Excel, utilizando informações gerais dos artigos de interesse, tais como: título da publicação, ano de publicação, tipo de documento, resumo (abstract), palavras-chave e o conteúdo da publicação.

3.3.1 Critérios de Inclusão

- Quando as palavras-chave pré-definidas existiam integralmente ou já seja no título, palavras-chave ou resumo do artigo.
- Exploram as conexões entre mudança climática e poluição plástica.
- Explicam como diferentes aspectos e impactos das mudanças climáticas afetam diferentes aspectos da poluição plástica.

- Ilustram como os plásticos contribuem para as mudanças climáticas.
- Avaliam a incidência dos efeitos de ambos os estressores sobre diferentes variáveis.
- Contêm recomendações ou medidas para enfrentar ambos os problemas.

3.3.2 Critérios de Exclusão

- Artigos duplicados dentro dos documentos recuperados na busca.
- Publicações que não exploram nenhum dos dois temas e suas vertentes.

Assim, a aplicação de critérios rigorosos de inclusão e exclusão foi necessária para obter os artigos mais relevantes e alcançar os objetivos do trabalho de revisão.

3.4 Síntese

A etapa de síntese consistiu tanto na extração quanto na classificação dos dados relevantes dos artigos selecionados, com o objetivo de derivar as distintas abordagens. Foi desenvolvido um sistema estruturado de categorias para organizar e interpretar as abordagens de cada artigo. Para atender aos objetivos da revisão sistemática, foram utilizados critérios previamente estabelecidos, baseados nas características gerais dos artigos, para avaliar, quantificar e mapear as abordagens sobre os temas investigados.

Os parâmetros de categorização adotados foram os seguintes:

- A categoria "Tema Sinergia" foi atribuída a todas as publicações cujo objetivo principal fosse explorar diretamente as interconexões entre plástico e mudanças climáticas.
- A categoria "Menciona Sinergia" foi atribuída às publicações que mencionassem essas interconexões no corpo do trabalho, mas que não as tratassem como o foco principal do estudo.
- A categoria "Tema Oposição" foi designada para publicações cujo objetivo principal fosse explorar como plástico e mudanças climáticas não estão interligados.
- A categoria "Menciona Oposição" foi aplicada às publicações que mencionassem, no corpo do trabalho, a ausência de interconexões entre plástico e mudanças climáticas, mas sem que esse fosse o foco principal do estudo.
- A categoria "Não Menciona" foi atribuída a todas as publicações que tratassem de plástico e mudanças climáticas de forma conjunta ou individualmente, porém sem explorar suas interseções.

Com base nos achados dos artigos, os tipos de relação entre poluição plástica e mudanças climáticas foram categorizados, permitindo uma análise mais aprofundada das interconexões entre os dois temas.

3.5 Análise e reporte

Após a etapa de síntese e categorização, foi realizada uma análise subsequente que englobou a avaliação dos dados sintetizados e a extração de informações relevantes, com o objetivo de responder às perguntas de pesquisa formuladas.

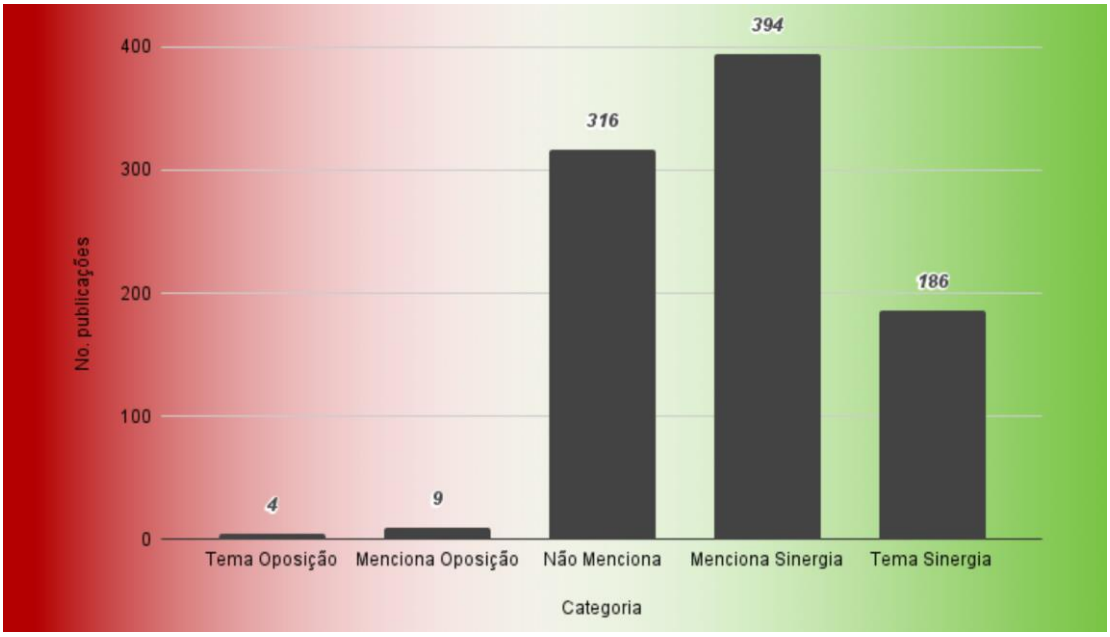
Foram utilizadas ferramentas de estatística descritiva para avaliar as tendências nas abordagens das publicações sobre as interligações entre poluição plástica e mudanças climáticas e sua evolução temporal. Com base na classificação categórica deste estudo, foi fornecido um panorama das evidências, lacunas de conhecimento e implicações para os ecossistemas.

4 RESULTADOS

A partir da busca realizada na base de dados Web of Science (WoS), foram compiladas 909 publicações, incluindo artigos, materiais editoriais, itens de notícias, revisões e capítulos de livros. Todas as publicações atenderam aos critérios de inclusão, o que permitiu sua progressão para as etapas de síntese e categorização. Dentre elas, 186 publicações (20,5%) foram classificadas na categoria **Tema Sinergia**, indicando que essas abordaram diretamente as interconexões entre os dois estressores ecossistêmicos. A maior parte das publicações, um total de 394 (43,3%), foi classificada na categoria **Menciona Sinergia**, mencionando essas interconexões, embora não fosse o foco central dos estudos.

Em contrapartida, 4 publicações (0,44%) foram categorizadas como **Tema Oposição**, explorando diretamente a falta de interligação entre poluição plástica e mudanças climáticas. Outras 9 publicações (1%) foram incluídas na categoria **Menciona Oposição**, mencionando de forma incidental a ausência de conexão entre os dois estressores. Além disso, um número considerável de 316 publicações (34,8%) não examinou as interações entre poluição plástica e mudanças climáticas, sendo classificadas na categoria **Não Menciona** (Gráfico 1).

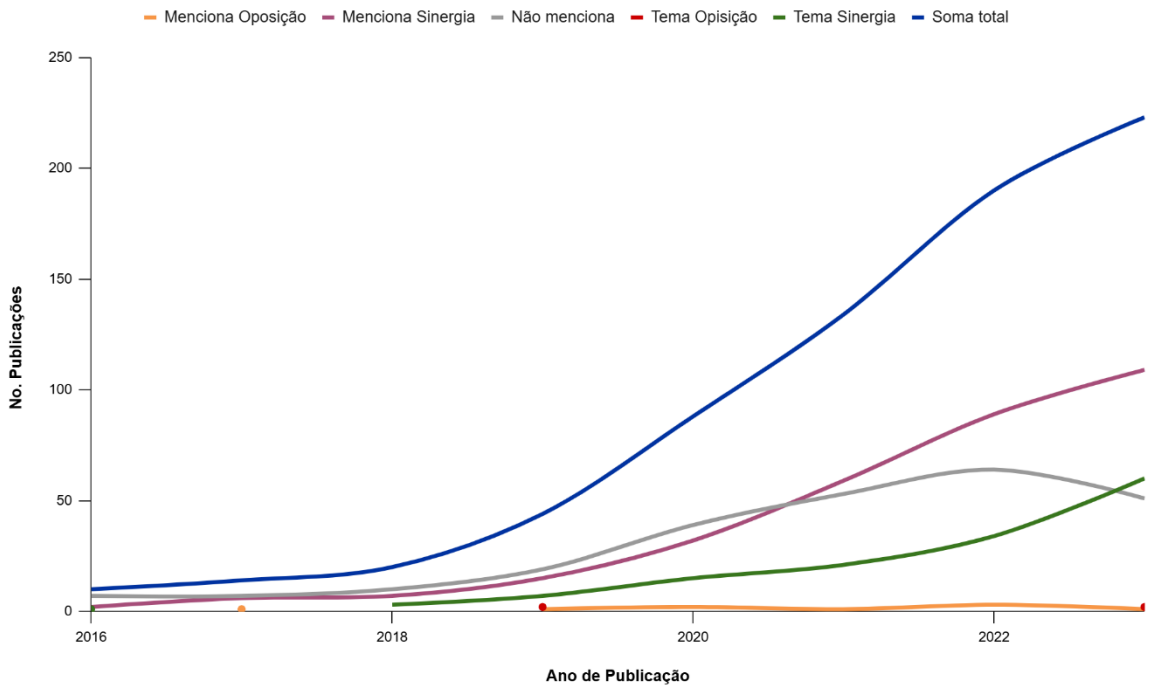
Gráfico 1: Produção Acadêmica Categorizada por Tema e Menção



Fonte: Autoria

4.1 Evolução Temporal

Gráfico 2: Evolução temporal Geral da produção Acadêmica



Fonte: Autoria

A análise da evolução temporal geral da produção acadêmica sobre as inter-relações entre poluição plástica e mudanças climáticas abrangeu o período de 2006 a agosto 2024 (Gráfico 2). Em 2006, identificou-se a primeira publicação abordando os estressores, sendo esta de forma isolada. Entre 2007 e 2011, não foram registradas novas contribuições, evidenciando uma brecha na pesquisa.

O cenário começou a mudar em 2012, quando surgiram duas publicações que passaram a explorar as inter-relações entre os dois fenômenos, ambas mencionando a sinergia das mudanças climáticas com a poluição plástica. Apesar de um novo intervalo sem publicações em 2013, em 2014 foi registrada a primeira contribuição que teve por tema principal a conexão entre esses estressores.

O ano de 2015 marcou um avanço, com três publicações documentadas, predominante na abordagem da sinergia. A partir de 2016, evidenciou-se um incremento na produção científica, porém, apenas 30% das publicações abordaram os estressores de maneira

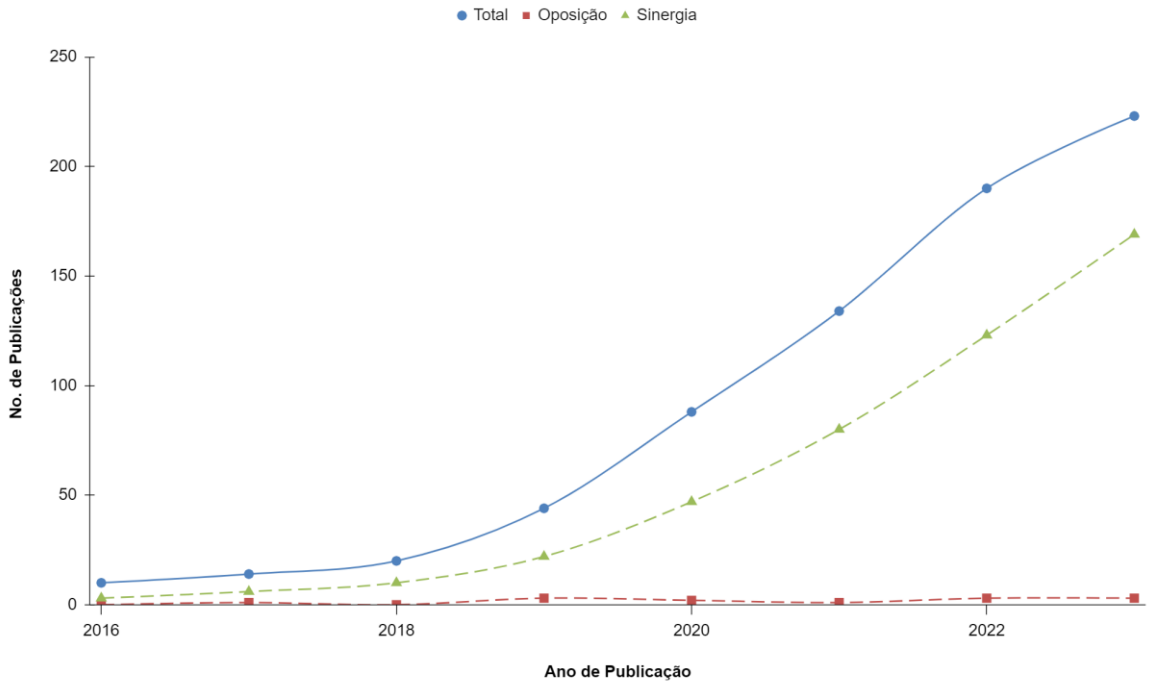
interconectada. Em 2017, foi reportada a primeira menção à oposição entre esses dois estressores no contexto agrícola, e no ano seguinte, um segundo artigo abordou essa temática.

Em contraste, durante 2018, 50% das publicações abordaram a sinergia entre a poluição plástica e as mudanças climáticas, tanto como objeto principal das pesquisas, quanto mencionando a interconexão. O ano de 2019 evidenciou uma duplicação na quantidade de publicações, bem como um aumento nas investigações que exploraram a sinergia. Este ano também foi notável pela discussão da oposição, sendo este o primeiro ano que se explorou como tema central dos estudos.

Em 2020, a produção científica novamente dobrou e paralelamente os estudos que exploravam as sinergias duplicaram-se, sem embargo ainda com alguns indicando oposição. Em 2021, foram registrados 59 artigos que mencionaram a sinergia, dos quais 21 trataram-na como objeto principal de estudo, enquanto 53 não examinaram os estressores de forma conjunta. Para 2022, a proporção de artigos que tratavam a sinergia superou 60%, com 34 classificadas como tema principal e 89 mencionando a inter-relação. No entanto, 2022 também foi o ano com o maior número de artigos que abordaram a oposição entre os estressores, com 3 publicações, além de um considerável número de estudos que trataram os estressores de forma isolada.

Em 2023, as publicações que discutiram a oposição entre os estressores aumentaram, registrando dois artigos como objetivo principal e um que fez uma menção incidental. Por outro lado, 75% do total anual de artigos focou na sinergia. Finalmente, em 2024, até agosto, não houve investigações que indicassem a oposição entre os estressores. Com quatro meses restantes no ano, foi contabilizado que um 64% das publicações que tratavam da sinergia, contudo, o outro 35% do total anual de publicações não avaliou esses dois estressores simultaneamente. Essa evolução temporal do panorama geral evidencia uma crescente complexidade na abordagem acadêmica dos desafios ambientais, refletindo uma maior consciência da necessidade de investigar as interconexões entre a poluição plástica e as mudanças climáticas.

Gráfico 3: *Evolução Temporal no panorama Sinergético e de Oposição*



Fonte: Autoria

No panorama sinergético e de oposição (Gráfico 3), em 2016, foram identificadas 10 publicações, enquanto em 2023 esse número aumentou para 223. O crescimento anual das publicações totais segue uma tendência acelerada, descrevendo um comportamento exponencial com uma taxa de crescimento de aproximadamente 36,5% ao ano a partir de 2016. Isso sugere que a pesquisa em torno desses dois estressores ecossistêmicos está ganhando rapidamente relevância científica.

Os artigos categorizados dentro do contexto de sinergia também mostraram um crescimento exponencial. Em 2016, apenas 3 artigos abordavam a conexão entre os dois fenômenos, enquanto em 2023 esse número aumentou para 169. Esse crescimento também seguiu uma tendência exponencial, com uma taxa de crescimento anual de aproximadamente 45%. Esse comportamento sugere que a visão científica dominante está evoluindo para uma integração conceitual desses estressores ecossistêmicos, cada vez mais estudados como elementos inter-relacionados dentro de um mesmo sistema global.

Por outro lado, a categoria de oposição manteve-se relativamente estável ao longo do tempo, com apenas pequenas flutuações. De 2016 a 2023, o número de artigos nesta categoria

variou entre 0 e 3 por ano, o que indica que a perspectiva que considera esses estressores de forma isolada não experimentou um crescimento significativo.

4.2 Estressores Ecossistêmicos Intrinsecamente Ligados

Com base na análise dos artigos selecionados, foram identificados diversos vínculos entre a poluição por plástico e as mudanças climáticas. Esses achados refletem as abordagens diversas que a literatura científica adota ao explorar as interconexões entre esses dois temas críticos. A identificação dos vínculos foi realizada a partir dos conteúdos que mencionam explicitamente as ligações, permitindo uma compreensão mais clara das perspectivas e enfoques que permeiam a discussão sobre como esses estressores ecossistêmicos interagem. A seguir, serão apresentadas as categorias identificadas, que elucidam as nuances dessas inter-relações e destacam as contribuições da pesquisa existente (Gráfico 4).

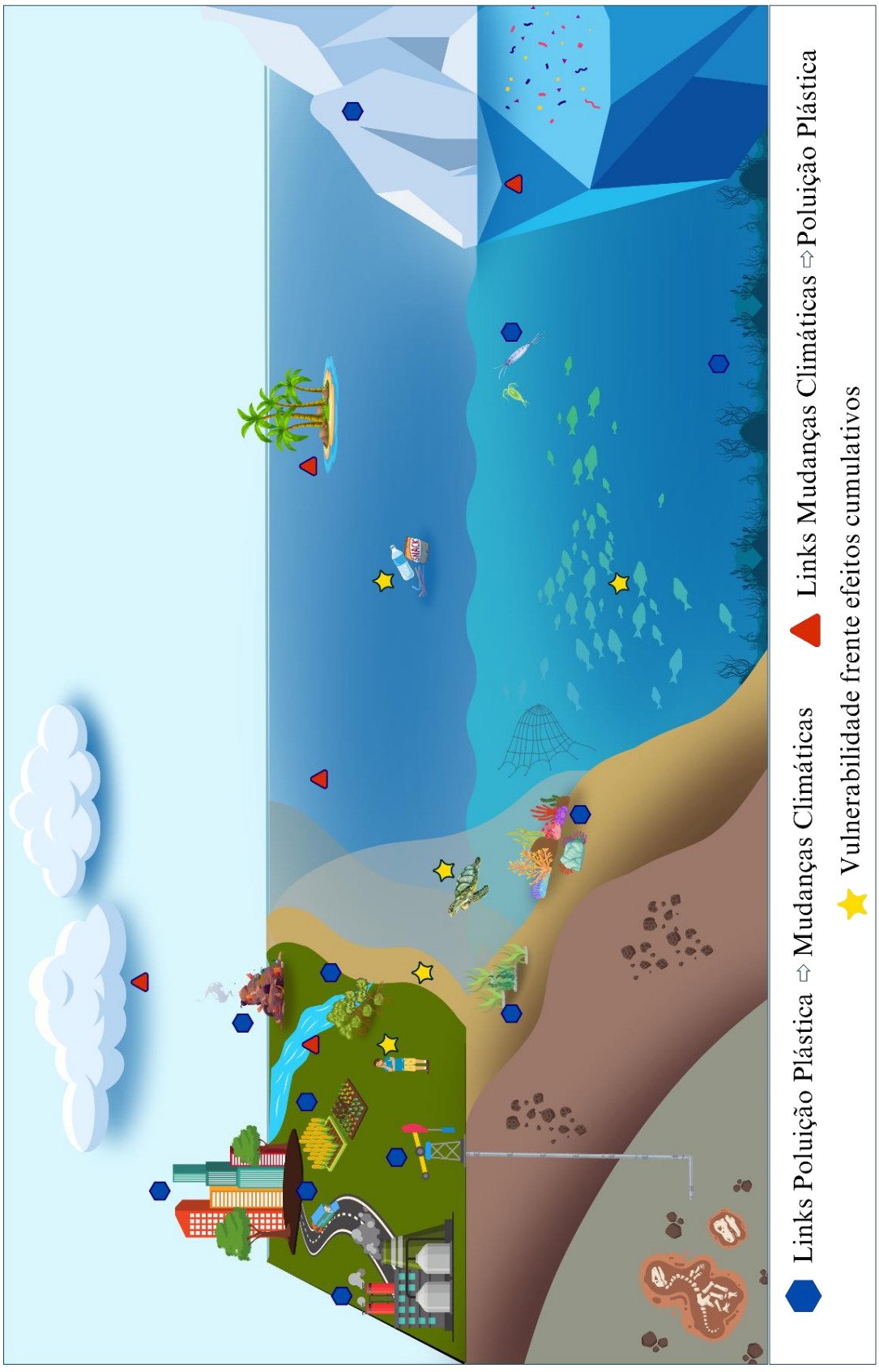
4.2.1 Links Poluição Plástica - Mudanças Climáticas

A poluição plástica constitui um dos maiores desafios ambientais do século XXI, contribuindo direta e indiretamente às mudanças climáticas globais. Derivados majoritariamente de combustíveis fósseis, os plásticos emitem gases de efeito estufa (GEE), em todas as etapas de seu ciclo de vida, causando impactos abrangentes nos ecossistemas (Zheng e Suh, 2019). Sendo assim, a contribuição dos plásticos para as mudanças climáticas pode ser classificada em três categorias: 1) Ciclo de Vida; 2) Impactos ecossistêmicos; e 3) Bioplásticos.

4.2.1.1 Ciclo de Vida do Plástico

A emissão de gases de efeito estufa é inevitável durante a produção de plásticos, abrangendo não apenas os processos de produção e manufatura, mas também da extração, transporte das matérias-primas, gestão dos resíduos plásticos e a entrada desses materiais no ambiente (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; SHEN et al., 2020a). Atualmente, 1,8 gigatoneladas de equivalentes de dióxido de carbono de emissões de gases de efeito estufa (GEE) podem ser atribuídas ao ciclo de vida dos plásticos. No entanto, espera-se que esse número mais que dobre, alcançando 4,3 Gt CO_2 até 2060 (OECD, 2022).

Figura 4: *Interligações Poluição por Plástico e as Mudanças Climáticas*



Fonte: Autoria

Os combustíveis fósseis desempenham um papel fundamental na produção de plásticos (JAMBECK et al., 2015). Esta fase inicial do ciclo compreende processos como de grande escala, como a mineração, perfuração e fraturamento hidráulico para a extração dos recursos naturais. Durante essa fase do ciclo, aproximadamente 99% dos materiais essenciais utilizados provêm de combustíveis fósseis, enquanto apenas 1% tem origem em fontes vegetais (WILLIAMS; RANGEL-BUITRAGO, 2022). A fase de extração de combustíveis fósseis contribui para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio de emissões indiretas, como o vazamento de metano, a remoção de vegetação para a construção de infraestrutura de extração, e o transporte subsequente dos combustíveis até as refinarias (FORD et al., 2022).

A segunda fase do ciclo corresponde ao refino, um processo intensivo em energia de craqueamento, um processo petroquímico no qual hidrocarbonetos saturados são quebrados em hidrocarbonetos menores, frequentemente insaturados, conhecidos como olefinas, que posteriormente são convertidos em resinas plásticas (REN; PATEL; BLOK, 2006). A refinação de plásticos também é uma das indústrias mais intensivas em emissões de GEE no setor de manufatura, com uma produção global de 184,3 a 213,0 milhões de toneladas de CO_2e em 2019 (SHEN et al., 2020a).

Já a manufatura, exige uma quantidade significativa de energia, que na maioria das vezes provém de fontes não renováveis. A análise do ciclo de vida de produtos plásticos revela que a manufatura é uma das etapas mais intensas em carbono, contribuindo com cerca de 50% das emissões totais associadas a produtos plásticos (SHARMA; SHARMA; CHATTERJEE, 2023). Este impacto é ainda mais acentuado em regiões onde a energia elétrica é gerada principalmente a partir de carvão ou outras fontes fósseis, amplificando o impacto ambiental da fabricação de plásticos. Os processos químicos envolvidos na manufatura do plástico também podem gerar resíduos que, quando descartados inadequadamente, podem liberar GEE adicionais no ambiente (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

O processo de transporte abrange o deslocamento de matérias-primas para as instalações de manufatura, a distribuição de produtos acabados e o transporte de resíduos plásticos para locais de disposição final, como aterros e instalações de reciclagem (FORD et al., 2022).

Os métodos de transporte utilizados para mover plásticos e suas matérias-primas, que frequentemente incluem caminhões, navios e trens, têm uma dependência substancial de

combustíveis fósseis (HUANG et al., 2024). Um estudo de 2019 estimou que as emissões de GEE associadas ao transporte de plásticos podem representar até 15% das emissões totais do ciclo de vida do plástico (LEBRETON; ANDRADY, 2019). O uso predominante de combustíveis fósseis para o transporte não só contribui com CO_2, mas também com outros poluentes atmosféricos que exacerbam o aquecimento global.

Além disso, a globalização das cadeias de suprimento tem levado a distâncias de transporte cada vez maiores, resultando em emissões adicionais. A interconexão de mercados globais faz com que os plásticos frequentemente sejam fabricados em um país e transportados para consumo em outro, aumentando a pegada de carbono associada ao transporte (SHEN et al., 2020b). Por exemplo, a importação de plásticos recicláveis em países desenvolvidos a partir de países em desenvolvimento tem mostrado um aumento nas emissões, devido à ineficiência do transporte marítimo e terrestre (HUANG et al., 2024).

A gestão inadequada dos resíduos plásticos, que muitas vezes envolve transporte de longa distância para aterros ou incineradores, também contribui para o impacto climático. Estudos indicam que o transporte de resíduos plásticos não apenas aumenta as emissões de GEE, mas também resulta em impactos negativos na qualidade do ar e da água nas comunidades próximas aos locais de disposição (AIGAJE; RIOFRIO; BAYKARA, 2023).

A utilização de plásticos em diversas aplicações após a sua manufatura gera impactos significativos nas mudanças climáticas, o aumento do consumo de produtos plásticos, impulsionado por um modelo de consumismo que prioriza a conveniência e a obsolescência programada, intensifica a contribuição dos plásticos para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (ANTRANIKIAN; STREIT, 2022). Os principais setores que utilizam plásticos incluem embalagens, construção, transporte, têxteis e produtos eletrônicos, e cada um deles exerce um papel distinto nas emissões de GEE (FORD et al., 2022).

O setor de embalagens é um dos maiores consumidores de plásticos, representando cerca de 40% do total de plásticos produzidos globalmente. As embalagens plásticas são frequentemente de uso único, resultando em descarte imediato e fomento de mais utilização (GEYER, 2020).

Na indústria da construção, os plásticos são utilizados em uma variedade de aplicações, como isolamento, tubulações e revestimentos. Embora esses materiais possam melhorar a

eficiência energética dos edifícios, sua produção é intensiva em energia e resulta em emissões significativas de GEE (ZHAO et al., 2022). A instalação de produtos plásticos frequentemente requer transporte adicional, aumentando ainda mais as emissões associadas. Além disso, a durabilidade dos plásticos pode resultar em longos períodos de disposição, durante os quais podem liberar substâncias que afetam a qualidade do solo e da água, alterando os ciclos de carbono (RILLIG, 2012).

Os plásticos são amplamente utilizados na fabricação de componentes automotivos, incluindo painéis, revestimentos e sistemas de combustível. Embora o uso de plásticos possa reduzir o peso dos veículos e, consequentemente, melhorar a eficiência do combustível, a produção desses materiais é associada a altas emissões de GEE (SOHN et al., 2020). Além disso, o transporte de veículos e componentes plásticos é uma fonte adicional de emissões, contribuindo para a pegada de carbono do setor de transporte (BAKER et al., 2018).

A produção de eletrônicos envolve uma quantidade significativa de plásticos, que são utilizados em componentes como carcaças, conectores e cabos. O ciclo de vida dos produtos eletrônicos é caracterizado por uma alta intensidade de energia e emissões associadas a seu uso (KUMAR et al., 2020).

Os impactos dos plásticos sobre o clima não cessam após seu uso e descarte. Dependendo do tratamento aplicado aos resíduos plásticos, estes podem representar uma ameaça igualmente grave às mudanças climáticas quando atingem a fase de descarte (SHEN et al., 2020a). Na verdade, a maioria dos impactos climáticos ocorrem após o término de seu ciclo de vida (Royer et al., 2018).Uma avaliação identificou que a fase de fim de vida corresponde a 9% das emissões totais de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida completo dos plásticos (ZHENG; SUH, 2019). As fases de Fim de vida podem variar entre as emissões geradas, sendo elas incineração, reciclagem, aterro sanitário e sem manejo.

Muitas vezes considerada uma solução simples para a contaminação em larga escala causada por plásticos terrestres, a incineração consiste na conversão de resíduos plásticos em cinzas residuais, gases de combustão, águas residuais e calor gerado pela combustão (ATABAY; ROSENTRATER; GHNIMI, 2022). Esse método não apenas gerencia efetivamente a poluição plástica, mas também fornece energia e calor para utilização. No entanto, durante a incineração de resíduos plásticos, gases de efeito estufa, predominantemente CO_2, podem ser emitidos.

Entre as três principais opções de disposição, a incineração de resíduos plásticos é geralmente considerada a que apresenta o maior impacto climático (ERIKSSON; FINNVEDEN, 2009).

Mesmo levando em consideração a energia gerada pelo processo de combustão, uma tonelada de resíduos de embalagens plásticas resulta em aproximadamente 0,9 toneladas de emissões líquidas de CO_2 equivalente (FORD et al., 2022). Evidências indicam que as emissões líquidas da incineração de resíduos de embalagens plásticas foram estimadas em 16 milhões de toneladas em 2015 (GURGACZ et al., 2023). Com a contínua produção de plásticos, essas emissões líquidas devem aumentar para 84 milhões e 309 milhões de toneladas até 2030 e 2050, respectivamente (PLASTICS EUROPE, 2023).

A reciclagem de resíduos plásticos refere-se ao processo físico de recuperação de materiais sem alterar a estrutura molecular dos polímeros (KHOAELE et al., 2023). Em teoria, comparada com outros métodos de gestão de resíduos plásticos existentes, a reciclagem plástica oferece benefícios significativos em termos de gases de efeito estufa. Podendo até resultar em emissões líquidas negativas de gases de efeito estufa ao reduzir o uso de matérias-primas e evitar emissões associadas à produção da mesma quantidade de matérias-primas. A reciclagem de embalagens plásticas em novos produtos poderia economizar 1,4 milhão de toneladas de CO_2 equivalente (DORMER et al., 2013)

Embora a reciclagem seja considerada mais sustentável, ela também enfrenta diversos desafios, como grandes demandas energéticas, custos elevados e a possibilidade de resultar em plásticos de baixa qualidade (HUANG et al., 2024). Na prática, apenas uma pequena fração dos resíduos plásticos é reciclada de volta aos produtos originais (CHANGWICHAN; GHEEWALA, 2020). O baixo preço dos plásticos virgens, inibe ainda mais a reciclabilidade dos plásticos, reduzindo o valor econômico dos plásticos recicláveis e dificultando o investimento em infraestrutura e mercados adequados (OECD, 2022).

Os aterros sanitários apresentam vantagens, como tecnologia consolidada e baixos custos de tratamento, sendo o principal método de descarte centralizado de resíduos plásticos urbanos (NEO et al., 2021). Ao ser depositado em aterros, o plástico pode levar centenas de milhares de anos para se degradar completamente. Durante esse período, os resíduos plásticos podem liberar metano (CH_4), um gás de efeito estufa com um potencial de aquecimento global que é aproximadamente 25 vezes maior que o do dióxido de carbono (CO_2) ao longo de um

período de 100 anos (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2023a). Estima-se que os aterros sanitários sejam responsáveis por cerca de 17% das emissões globais de metano, sendo os plásticos uma das principais fontes deste gás em muitos países (GAUTAM; AGRAWAL, 2021).

Além disso, a gestão inadequada de aterros pode resultar em emissões adicionais devido à lixiviação de produtos químicos e à liberação de outros poluentes durante a degradação dos plásticos (KHOAELE et al., 2023). A decomposição anaeróbica pode gerar não apenas metano, mas também compostos voláteis que podem afetar a qualidade do ar e contribuir para a formação de ozônio troposférico (KHOAELE et al., 2023).

A falta de gerenciamento ou um gerenciamento equivocado é comum em regiões com infraestrutura de gestão de resíduos menos desenvolvida, sendo que, o tratamento simplificado e de baixo custo apresenta sérias consequências para o clima. O impacto dos resíduos plásticos não gerenciados sobre as mudanças climáticas globais depende amplamente da proporção de queima a céu aberto e degradação nos ambientes.

A queima a céu aberto, uma prática que envolve a incineração de materiais combustíveis desnecessários em condições naturais, tem um impacto severo no clima, devido à ausência de controle da poluição do ar, contrastando com a operação de incineradores de resíduos. Quando queimados ao ar livre, os resíduos plásticos de embalagens podem emitir aproximadamente 2,9 milhões de toneladas de gases de efeito estufa por tonelada de plástico (ZHAO; YOU, 2023).

Por sua vez, a degradação do plástico inicia-se quando exposto a condições ambientais, onde gases de efeito estufa são liberados (ROYER et al., 2018). Com o tempo, os polímeros tornam-se frágeis e quebradiços, fragmentando-se em pequenas partes, eventualmente formando microplásticos (<5 mm) e nanoplásticos (<1000 nm) (NAPPER et al., 2020). Embora a emissão resultante da degradação ambiental seja relativamente pequena em comparação com a incineração de plásticos (aproximadamente 2122 toneladas CO_2 e por ano), trata-se de um processo contínuo (HUANG et al., 2024). Com o aumento da produção de plásticos e do desperdício associado, seu impacto se tornará progressivamente mais significativo (SHEN et al., 2020b). Além disso, os processos de degradação também promovem a dispersão dos

resíduos plásticos sem gerenciamento ou com um manejo equívoco entre os ambientes terrestre, de água doce e marinhos (WANG et al., 2024).

4.2.1.2 Impactos Ecossistêmicos

O incremento da entrada de plástico nos distintos ecossistemas tem o potencial de exacerbar as mudanças climáticas, através de mudanças na composição das comunidades, perturbações nos serviços ecossistêmicos e até mesmo nos ciclos biogeoquímicos (RAI et al., 2021).

Recentemente, um estudo liderado por (JANSEN et al., 2024) reportou que a degradação de plásticos expostos à luz solar em ambientes terrestres pode liberar gases de efeito estufa a uma taxa superior à observada em ambientes aquáticos, afetando a dinâmica dos ecossistemas, contribuindo assim para as alterações climáticas.

A presença de microplásticos nos solos, por exemplo, pode impactar a estrutura e a função do solo, reduzindo a capacidade de armazenamento de carbono. Estudos demonstraram que a adição de microplásticos pode alterar a atividade microbiana, afetando negativamente a ciclagem de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica (DING et al., 2022). Essas mudanças podem resultar na diminuição da capacidade do solo de sequestrar carbono, exacerbando os níveis de CO_2 na atmosfera e, consequentemente, acelerando as mudanças climáticas.

Os plásticos também têm um papel na modificação da temperatura do solo. O acúmulo de resíduos plásticos pode alterar a albedo (refletividade) da superfície terrestre, resultando em um aumento local da temperatura, o que pode afetar ainda mais a fauna e flora locais e potencialmente aumentar a emissão de gases de efeito estufa (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Por último, a degradação dos plásticos sob condições ambientais, incluindo a luz solar e a umidade, leva à liberação de poluentes orgânicos persistentes, que têm propriedades de efeito estufa e podem contribuir para o aquecimento global (HURLEY et al., 2020). Esses compostos não apenas deterioram a qualidade do solo e da água, mas também têm implicações significativas para a saúde humana e a biodiversidade.

O conceito de Carbono Azul, ou *Blue Carbon,* foi estabelecido como uma metáfora para enfatizar que, além dos ecossistemas terrestres, os ecossistemas marinhos e costeiros também desempenham um papel significativo na sequestro de carbono (BANDH et al., 2023). Esses ecossistemas são cruciais na minimização das emissões líquidas de carbono e por conseguinte, as mudanças climáticas. Em 2005, foi revelado que cinquenta por cento de todo o carbono marinho sequestrado provém de ervas marinhas, manguezais e pântanos interditais (SHEN et al., 2023), o que destaca a importância dos ecossistemas misto e de transição para a absorção e armazenamento de carbono.

Os sistemas de carbono azul ajudam a mitigar as mudanças climáticas por meio do armazenamento e sequestro de carbono. A acumulação de plásticos retidos nos sistemas de manguezais varia amplamente, dependendo da localização e da sazonalidade (HUANG et al., 2024). Estudos confirmam que esses habitats atuam como um sumidouro para microplásticos, gerando carregamentos mais altos do que locais de sedimento (PRADIT et al., 2022). O plástico fica preso e enterrado nas camadas superiores do sedimento das florestas de mangue criando condições anóxicas (BANDH et al., 2023).

À medida que o plástico cobre o sedimento e se entrelaça nas raízes aéreas, as árvores afetadas podem sofrer perda de folhas e tentar compensar investindo no crescimento das raízes para alcançar o ar (CHIA et al., 2023). Se as árvores ficarem completamente sufocadas, elas perderão todas as folhas e eventualmente morrerão, impactando o armazenamento e sequestro de carbono (BANDH et al., 2023).

Estimou-se que aproximadamente 8 milhões de toneladas métricas (Mt) de resíduos plásticos entram nos oceanos a partir de países costeiros a cada ano (JAMBECK et al., 2015). Sem embargo, estudos que prevejam como essa poluição pode interagir com as consequências das mudanças climáticas para agravar os danos aos organismos marinhos e ecossistemas são limitados para a dimensão dos impactos (FORD et al., 2022).

Um dos principais impactos da presença generalizada de plásticos nos ambientes marinhos é o comprometimento dos processos de fixação de carbono. Um exemplo desse fenômeno é o fitoplâncton, sendo o principal produtor primário nos oceanos, captura o CO_2 atmosférico através da fotossíntese, contribui tanto para a produção de oxigênio quanto para a

segurança alimentar dos organismos marinhos (VERED; SHENKAR, 2023). Embora as pesquisas sobre a interação entre fitoplâncton, microrganismos marinhos e poluição plástica ainda estejam em seus estágios iniciais, os primeiros resultados sugerem que os plásticos podem perturbar processos biogeoquímicos essenciais, como a bomba biológica de carbono, vital para manter o papel do oceano como um sumidouro de carbono (GODDIJN-MURPHY et al., 2023).

As gramas marinhas e os recifes de corais também estão expostos à ameaça combinada das mudanças climáticas e da poluição plástica. No caso das gramas marinhas, os microplásticos podem se aderir às lâminas e à biota associada, acumulando-se no sedimento. A grande quantidade de microplásticos retidos possui o potencial de causar impactos biológicos significativos no combate às mudanças climáticas, no armazenamento e sequestro de carbono (BANDH et al., 2023).

Paralelamente, a presença de plástico nos ambientes marinhos representa uma ameaça adicional, uma vez que esses poluentes podem interferir significativamente no desempenho alimentar dos corais, afetando a formação de seus esqueletos e, consequentemente, o sequestro de carbono (REICHERT et al., 2019). Processo pelo qual esses organismos captam dióxido de carbono por meio da fotossíntese realizada por seus simbiontes e da formação de carbonato de cálcio (MARANGONI; BERAUD; FERRIER-PAGÈS, 2022). Esse mecanismo contribui para a mitigação das mudanças climáticas e para a manutenção da saúde dos ecossistemas marinhos.

Além de que os recifes de corais enfrentam uma multiplicidade de ameaças que, quando combinadas, comprometem significativamente sua resiliência (VERED; SHENKAR, 2023). Sendo que a incidência de eventos decorrentes das mudanças climáticas como o aquecimento global, associado ao aumento das temperaturas oceânicas, tem intensificado a frequência de eventos de branqueamento de corais, um fenômeno que prejudica a saúde e a biodiversidade desses ecossistemas marinhos (NGUYEN et al., 2023). O que por sua vez, pode aumentar a vulnerabilidade de alguns corais a danos mecânicos causados por microplásticos, uma vez que reduz a calcificação, representando um loop de feedbacks entrelaçados (VERED; SHENKAR, 2023).

Os ecossistemas de águas profundas, cada vez mais reconhecidos como sumidouros para os resíduos plásticos (BERGMANN et al., 2022), enfrentam funções essenciais de armazenamento de carbono e ciclagem de nutrientes ameaçados também pela ocorrência de

plástico. Plantas e animais marinhos desempenham um papel crucial na bomba microbiana de carbono, que captura o carbono da atmosfera e o transporta para as profundezas oceânicas, prevenindo seu retorno à atmosfera. A intrusão de partículas de microplástico nesses ambientes sensíveis representa uma ameaça adicional para ecossistemas já vulneráveis, especialmente aqueles com organismos que exibem baixa variabilidade genética, tornando-os altamente suscetíveis às mudanças ambientais (SHARMA; SHARMA; CHATTERJEE, 2023). Além disso, a poluição plástica diminui as taxas metabólicas, o sucesso reprodutivo e as taxas de sobrevivência do zooplâncton, organismos essenciais para a transferência de carbono para as profundezas oceânicas (ZHENG; SUH, 2019).

4.2.1.3 Bioplásticos

O desenvolvimento de plásticos baseados em biomassa, é considerada uma alternativa mais sustentável em relação aos plásticos derivados de combustíveis fósseis (LOH; CHEW, 2021). Os plásticos bio-baseados são elaborados a partir de matérias-primas renováveis provenientes de plantas e apresentam emissões de gases de efeito estufa (GEE) significativamente inferiores ao longo de seu ciclo de vida em comparação com os plásticos convencionais (ZHENG; SUH, 2019).

No entanto, essa vantagem é altamente dependente das matérias-primas utilizadas, da composição dos plásticos, da gestão ao fim de sua vida útil e, de maneira crucial, do potencial de armazenamento de carbono perdido devido às mudanças no uso da terra associadas (SANZ-LÁZARO; CASADO-COY; BELTRÁN-SANAHUJA, 2021). Dado que os plásticos baseados em biomassa derivam de recursos biológicos, é necessário o uso de terras para o cultivo das matérias-primas requeridas para sua produção fósseis (LOH; CHEW, 2021). Assim, é imprescindível considerar as emissões decorrentes da agricultura como um fator significativo associado às mudanças climáticas.

4.2.2 Links Mudanças Climáticas- Poluição Plástica

Da mesma forma que a poluição por plástico pode agravar as mudanças climáticas, as mudanças climáticas podem potencialmente exacerbar a poluição por plástico, na sua 1) Distribuição; 2) Degradação; 3) Interações com Fatores Ambientais.

4.2.2.1 Distribuição de plástico

As mudanças climáticas afetam os fluxos e as concentrações de poluição plástica em sua distribuição global, um exemplo disso são os ambientes vulneráveis e remotos, que raramente foram impactados por pressões antropogênicas no passado, agora enfrentam ameaças de poluição por plásticos decorrentes das mudanças climáticas (STEFÁNSSON et al., 2021).

Alterações climáticas configuram uma ameaça global de magnitude crítica, com impactos já observados em todas as regiões do planeta (PARVEZ et al., 2024). Esses efeitos incluem o aumento das temperaturas oceânicas, a elevação do nível do mar, a acidificação dos oceanos e a maior frequência de eventos climáticos extremos (PRAET, 2024). O aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos associados às mudanças climáticas também contribui para a alteração da distribuição dos microplásticos no ambiente (PARVEZ et al., 2024).

Ventos mais fortes, eventos de chuva mais frequentes e a elevação do nível do mar podem liberar plásticos aprisionados em sedimentos costeiros e aumentar o risco de inundações (LO et al., 2020a). O aumento do risco de inundação dos rios globais tem o potencial de agravar ainda mais a poluição plástica, com áreas de risco de inundação frequentemente se tornando locais de alta mobilização plástica durante eventos de enchentes. O aumento das chuvas, associado a monções, estima-se que aumente as entradas mensais de plástico nos rios em direção ao oceano (LINCOLN et al., 2023).

Ciclones se formam sobre mares tropicais quentes sob condições específicas, especialmente quando as temperaturas da superfície do mar atingem ou excedem 26 °C (LO et al., 2020b). As ondas e marés associadas aos ciclones tropicais geralmente transportam quantidades significativas de poluentes do continente para o ambiente marinho, ou de áreas mais afastadas para zonas costeiras (CHEUNG; NOT, 2023). Ventos, secas e ondas de calor podem afetar indiretamente os padrões de atividade humana, o que, por sua vez, está relacionado à introdução e dispersão de plásticos (LINCOLN et al., 2023).

O aquecimento global é o principal responsável pelo derretimento do gelo marinho e das geleiras, afetando a distribuição e a concentração de microplásticos no ambiente (STEFÁNSSON et al., 2021). Nesses ambientes frios, os microplásticos experimentam uma degradação muito lenta e tendem a se acumular. Quando o gelo marinho e as geleiras derretem, os microplásticos aprisionados são devolvidos ao ambiente, resultando em um aumento da poluição nos corpos d'água (FORD et al., 2022). À medida que o volume do gelo marinho deve diminuir devido ao aumento das temperaturas, espera-se que os microplásticos sejam liberados no ambiente marinho (STEFÁNSSON et al., 2021).

A elevação do nível do mar é uma consequência do aquecimento global, causada tanto pelo derretimento do gelo marinho e das geleiras quanto pela expansão térmica do volume oceânico (TANG, 2023). Esse aumento no nível do mar pode agravar a erosão costeira e as inundações, o que leva a um aumento na transferência de microplásticos da terra, provenientes de instalações de gerenciamento de resíduos, aterros sanitários e sistemas de esgoto, para o oceano.

A elevação do nível do mar também pode alterar as correntes oceânicas e a circulação, o que, por sua vez, pode mudar a distribuição e a acumulação de poluição plástica em diferentes colunas d'água e no fundo do mar (HALE; KING; RAMIREZ, 2024). A modificação das correntes oceânicas pode causar a ressuspensão de sedimentos, o que potencialmente libera microplásticos aprisionados nesses sedimentos para o ambiente marinho, introduzindo-os na cadeia alimentar (RATNASARI et al., 2024). Além disso, o feedback positivo entre o derretimento do gelo e a elevação do nível do mar pode agravar o derretimento das camadas de gelo e das geleiras, levando ao aumento da liberação de microplásticos aprisionados no gelo para o oceano (STEFÁNSSON et al., 2021).

4.2.2.2 Degradação

As altas temperaturas, a exposição à luz e a abrasão, como aquelas experimentadas nos oceanos, são fatores que podem determinar a taxa de degradação dos plásticos (WALKER; FEQUET, 2023). Assim, o aquecimento das temperaturas decorrente das mudanças climáticas, podem desempenhar um papel na aceleração das taxas futuras de decomposição de plásticos no ambiente marinho (GALGANI et al., 2024).

Da mesma maneira, o aumento da intensidade das tempestades ou eventos extremos pode trazer a flote alguns plásticos ou causar o afundamento de outros, influenciando não apenas a distância que os plásticos são transportados pelos oceanos, mas também a sua taxa de degradação (WALKER; FEQUET, 2023).

4.2.2.3 Interações com Fatores Ambientais

A temperatura e outros fatores impulsionados pelas mudanças climáticas exercem um efeito cumulativo sobre o impacto dos microplásticos, especialmente em espécies ameaçadas, comunidades e habitats, há evidências crescentes e exemplos concretos desse fenômeno (CHANG et al., 2022). Outros possíveis efeitos indiretos incluem a maior exposição a produtos químicos, microrganismos e espécies invasoras (LAVERS; BOND; ROLSKY, 2022).

A interação entre esses estressores pode resultar em impactos mais severos sobre qualquer espécie do que a atuação de um único fator isolado (PROVENCHER et al., 2020). Os poluentes plásticos podem tanto liberar quanto absorver substâncias químicas durante sua degradação, incluindo aditivos e contaminantes, como disruptores endócrinos. Algumas dessas substâncias químicas se bioacumulam nas teias alimentares marinhas (KELLER et al., 2009). Assim, se as mudanças climáticas aceleram a degradação dos plásticos em certas regiões, isso pode aumentar a liberação de contaminantes, impactando negativamente a biota. Isso agravaria o estresse sobre os organismos, já diretamente afetados pelas mudanças climáticas (PROVENCHER et al., 2020).

Um exemplo de espécie particularmente vulnerável aos efeitos combinados das mudanças climáticas e da poluição plásticos são as tartarugas marinhas (FORD et al., 2022). A determinação do sexo dependente da temperatura, levanta preocupações em relação ao aquecimento global durante os períodos de incubação. Além disso, os microplásticos têm o potencial de aumentar as temperaturas dos ninhos em incubação (SOUSA-GUEDES et al., 2023).

Por sua vez, a capacidade de adaptação dos mamíferos marinhos às mudanças climáticas é pouco compreendida, embora seja sabido que eventos climáticos extremos que afetam habitats e áreas de reprodução chave podem provocar encalhes, afogamentos e doenças, resultando em deslocamentos populacionais e baixa taxa de sucesso reprodutivo (PROVENCHER et al.,

2020). Existem inúmeras lacunas de conhecimento importantes sobre a interação entre as mudanças climáticas e outros estressores locais, como o lixo marinho, que provavelmente variam conforme o contexto. O impacto combinado pode diferir em nível de espécie em comparação ao nível trófico ou ecossistêmico (KELLER et al., 2009).

Temperaturas mais altas têm sido associadas ao aumento da liberação de produtos químicos dos microplásticos (DING et al., 2022). Um estudo revelou que os plásticos envelhecidos, recuperados de uma praia de areia, apresentaram uma liberação de matéria orgânica dissolvida até 100 vezes maior em comparação com plásticos novos, sendo que a irradiação aumentou significativamente essa liberação (ROMERA-CASTILLO et al., 2023).

Isso sugere que o aumento do forçamento radiativo associado ao aquecimento global pode intensificar a liberação de produtos químicos, especialmente de plásticos envelhecidos (ROMERA-CASTILLO et al., 2023). Essa liberação de produtos químicos pode ser facilitada pela degradação acelerada dos plásticos em temperaturas mais altas e na presença de radiação ultravioleta, o que causa a quebra dos polímeros e a liberação de aditivos plásticos da matriz polimérica.

As mudanças climáticas e o lixo marinho flutuante ou à deriva convergem para aumentar a disseminação de patógenos. Muitas desses patógenos necessitam de um vetor para serem transportadas a novas áreas e o plástico pode atuar como tal (ADOMAKO et al., 2024; FENG et al., 2020). Além disso, a acidificação dos oceanos pode alterar a composição de biofilmes marinhos, potencializando a disseminação de patógenos e doenças (FENG et al., 2020).

Em termos de saúde, a ingestão e inalação de microplásticos (MPs), presentes em alimentos, bebidas e no ar, podem causar danos à saúde (CELEBI SOZENER et al., 2022), pois esses materiais conseguem atravessar barreiras intestinais e entrar na corrente sanguínea, potencialmente afetando diversos órgãos (KRYSTOSIK et al., 2020). Além disso, os MPs podem transportar poluentes e patógenos, aumentando o risco de exposição a substâncias químicas nocivas e doenças. A degradação acelerada dos plásticos, impulsionada pelo aquecimento global, libera mais substâncias químicas perigosas no ambiente (GALGANI et al., 2024).

A segurança alimentar também é severamente afetada, uma vez que as mudanças climáticas comprometem a produção agrícola e pesqueira devido a secas, inundações e tempestades extremas (JIMOH et al., 2023). Isso é agravado pela poluição plástica, que contamina a vida marinha, essencial para a alimentação de milhões, acarretando à ingestão involuntária de plástico.

Há evidências crescentes também, que vinculam a degradação ambiental, a poluição e o aquecimento climático à emergência da resistência antimicrobiana. Os plásticos marinhos atuam como vetores para microrganismos e patógenos, enquanto as condições climáticas ideais promovem a propagação de bactérias resistentes a antibióticos, intensificando crises de saúde pública (RZYMSKI et al., 2024).

Finalmente, os efeitos combinados dessas crises criam desafios econômicos e sociais significativos (ANTRANIKIAN; STREIT, 2022). Comunidades dependentes de ecossistemas marinhos enfrentam insegurança alimentar e perda de renda devido à degradação dos recursos pesqueiros (GALGANI et al., 2024). Os custos associados à limpeza do lixo plástico e à mitigação de desastres naturais, exacerbados pelas mudanças climáticas, representam um peso econômico substancial para governos e sociedades. Em suma, o impacto cumulativo das mudanças climáticas e da poluição plástica compromete não apenas a saúde humana, mas também amplifica desigualdades sociais e econômicas, colocando em risco a sustentabilidade dos ecossistemas e a resiliência das comunidades.

5 DISCUSSÃO

A revisão sistemática realizada revelou uma evolução notável nas abordagens científicas que investigam a inter-relação entre poluição plástica e mudanças climáticas ao longo das últimas duas décadas. Inicialmente, as pesquisas sobre esses dois estressores ecossistêmicos foram conduzidas de maneira predominantemente isolada, com o foco concentrado em suas implicações individuais nos ecossistemas. No entanto, nos últimos anos, evidências crescentes indicam uma mudança de paradigma, com um número substancial de estudos reconhecendo que as interações entre esses fenômenos são mais complexas e sinérgicas do que previamente entendido.

Entre as principais abordagens identificadas, destacam-se aquelas que conectam diretamente a poluição plástica com o aquecimento global, não apenas devido às emissões de gases de efeito estufa durante seu ciclo de vida, mas também por meio de seu impacto nos distintos ecossistemas e a perturbação dos ciclos biogeoquímicos (FORD et al., 2022; JANSEN et al., 2024; LINCOLN et al., 2023; PARVEZ et al., 2024; REN; PATEL; BLOK, 2006). Da mesma forma, destacam-se aquelas que exploram como as mudanças climáticas podem potencialmente exacerbar a poluição por plástico, através da sua distribuição, degradação e interações com fatores ambientais (HAQUE; FAN, 2023; KARKANORACHAKI; SYRANIDOU; KALOGERAKIS, 2023; TANG, 2023).

Apesar desse progresso, nossa análise também destaca lacunas importantes na literatura. Embora as inter-relações entre poluição plástica e mudanças climáticas estejam sendo mais amplamente reconhecidas, uma grande fração dos estudos permanece focada em um único aspecto da conexão, sem abordar o espectro completo das sinergias entre esses estressores, como: o impacto da produção de plásticos nas emissões de gases de efeito estufa (SHEN et al., 2020a), o ciclo de vida dos plásticos (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017), dentre outros. Ao focar em um único aspecto da conexão, muitos estudos deixam de lado outras sinergias igualmente importantes. As interações entre poluição plástica e mudanças climáticas abrangem não apenas o ciclo de vida dos plásticos, mas também sua influência sobre a biodiversidade, a circulação oceânica e o sequestro de carbono em ecossistemas marinhos. Modelos que investiguem a amplificação mútua desses estressores em diferentes escalas ecológicas, desde os microplásticos no plâncton até as mudanças nos padrões climáticos globais, são necessários para preencher essas lacunas. Além disso, poucos trabalhos têm oferecido modelos teóricos

abrangentes ou análises quantitativas robustas que possam quantificar essas interações de maneira sistemática como os trabalhos de Ford et al. (2022), Shen et.al (2020) e Lincoln et al. (2022).

Outro achado relevante é que, embora exista uma crescente conscientização sobre os impactos conjuntos de plástico e mudanças climáticas, uma quantidade significativa de estudos ainda trata essas questões de forma independente, sem explorar como as suas interações podem amplificar os riscos ambientais (FRAGÃO et al., 2021; PROVENCHER et al., 2020; RASHEED; TSHOMO, 2024). Esse comportamento reflete uma lacuna conceitual, possivelmente decorrente de uma falta de financiamento ou de barreiras institucionais que promovem abordagens disciplinares fragmentadas. Esse cenário ressalta a necessidade urgente de um esforço interdisciplinar que una pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento, com vistas a desenvolver estratégias de mitigação e adaptação mais integradas.

A análise revela também que, entre os artigos que exploram a oposição ou independência desses fenômenos, destacam-se alguns de alto impacto, classificados como A1, incluindo dois publicados na *Marine Policy* (STAFFORD; JONES, 2019a; WATERS; WILSON; DEAN, 2023). Da mesma maneira, dos 13 artigos que mencionam ou tratam a oposição entre poluição plástica e mudanças climáticas, dois também compartilhavam o mesmo autor principal, o que indica uma tendência recorrente na maneira como certos grupos de pesquisa abordam essa questão. Essa repetição de autores e periódicos pode ser indicativa de um viés institucional ou de abordagem, que requer uma atenção mais crítica (STAFFORD; JONES, 2019a, 2019b)

Além disso, ao analisar as instituições que os diversos trabalhos se encontram afiliadas, percebeu-se que, em muitos casos, essas entidades se dedicam principalmente ao tema oposto ao que o estudo aborda. Por exemplo, artigos que focam exclusivamente em poluição plástica, classificados como não menciona, são frequentemente financiados/apoiados por instituições que tradicionalmente estudam mudanças climáticas, e vice-versa (WIRNKOR VERLA et al., 2020; HUE et al., 2021; LUO; ZHAO, 2023). Essa desconexão entre o foco da pesquisa e as áreas de atuação dos financiadores pode indicar uma fragmentação conceitual e institucional, dificultando uma abordagem mais holística que reconheça as interdependências entre esses dois estressores ecossistêmicos.

Mesmo diante da crescente evidência sobre a conexão entre esses estressores, a revisão mostra que as discussões sobre poluição plástica e mudanças climáticas ainda estão majoritariamente desconectadas dos grandes tratados globais, como o Acordo de Paris, que visa limitar o aumento da temperatura global a 1,5ºC (IPCC, 2021), e o Tratado Global sobre Plásticos (MARCH; ROBERTS; FLETCHER, 2022), que está em desenvolvimento. É crucial que essas inter-relações sejam exploradas em futuras negociações globais, uma vez que ambos os tratados visam mitigar os impactos ambientais e poderiam se beneficiar de abordagens conjuntas e integradas. As sinergias entre esses dois tratados poderiam fortalecer as respostas globais às crises ambientais.

Com base nos resultados, identificamos algumas medidas de mitigação que abrangem as inter-relações entre poluição plástica e mudanças climáticas. Em primeiro lugar, o controle da produção de plásticos em nível global deve ser uma prioridade, com regulamentações mais rígidas e uma transição para a redução da dependência de combustíveis fósseis na fabricação de plásticos. Em segundo lugar, a melhoria no tratamento e descarte de resíduos plásticos, especialmente em países em desenvolvimento, é essencial para reduzir a poluição de forma eficaz e promover práticas mais sustentáveis de gerenciamento de resíduos. Finalmente, uma avaliação detalhada do impacto sinergístico desses dois estressores nos ambientes globais é necessária para orientar políticas públicas mais abrangentes que levem em consideração a interdependência desses problemas.

A economia circular surge como uma solução promissora, com o potencial de promover a reutilização e reciclagem de materiais plásticos, reduzindo a dependência da produção de novos plásticos e as emissões associadas (ELLEN MACARTHUR, 2020). A transição para uma economia circular também oferece oportunidades para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis, como os bioplásticos, que embora ainda careçam de uma avaliação completa de viabilidade a longo prazo, representam uma alternativa importante no esforço de mitigação. Medidas como estas, que integram a prevenção, a gestão e a substituição de materiais, são fundamentais para enfrentar os efeitos cumulativos da poluição plástica e das mudanças climáticas.

Nossos resultados apontam para uma oportunidade significativa de avançar a pesquisa e a formulação de políticas públicas. Considerando o contexto atual das crises ambientais globais, é imperativo que cientistas, legisladores e líderes da sociedade civil reconheçam as

interdependências entre poluição plástica e mudanças climáticas. As futuras iniciativas de pesquisa devem se concentrar em abordar explicitamente essas interações, utilizando abordagens quantitativas para modelar seus impactos de forma mais precisa e, por fim, propor soluções que respondam de maneira eficaz à complexidade desses desafios interligados.

6 CONCLUSÃO

Neste estudo avaliamos a maneira na qual a comunidade científica tem explorado as inter-relações entre a poluição plástica e as mudanças climáticas. Identificamos e analisamos as principais abordagens e sua evolução ao longo do tempo. Depois de examinar os últimos 18 anos de publicações, englobando ambos estressores ecossistêmicos. Nossa análise concluiu que existe uma conscientização crescente sobre a sinergia entre a poluição plástica e as mudanças climáticas na literatura científica, mesmo quando o foco principal dos estudos está em outras áreas. Sem embargo, ainda há uma lacuna significativa em estudos que abordem diretamente o amplo espectro das sinergias que as interações desses dois estressores trazem consigo. Da mesma forma, apesar das evidências crescentes e da realidade global que enfrentamos, ainda há uma quantidade considerável de estudos recentes que continuam a ignorar ou minimizar as interligações entre esses limites do planeta.

Resolver a poluição plástica e as mudanças climáticas, bem como seus efeitos cumulativos requer uma abordagem holística e integrada que considere promover a colaboração e a cooperação entre diferentes setores envolvidos, como governos, empresas, sociedade civil e sobretudo a comunidade científica como uma fonte base de conhecimento e referência para os setores já mencionados, que deverão se constituir em partes interessadas na busca da solução dos problemas detectados. O estudo identifica tendências, lacunas e oportunidades para novas pesquisas, promovendo uma compreensão mais profunda desses estressores como parte de um sistema interconectado. Além disso, os resultados podem orientar políticas públicas e estratégias de sustentabilidade que abordem de forma conjunta esses dois estressores, fortalecendo a resposta global às crises ambientais.

Convencionalmente abordadas como questões ambientais separadas, as mudanças climáticas e a poluição por plásticos, são problemas que estão intrinsecamente interligados. As soluções são, sem dúvida, complexas, mas é necessário um esforço coordenado a fim de aliviar os efeitos da transgressão da zona segura dos estressores ecossistêmicos como limites do planeta e evitar cenários ambientais de crise. Torna-se imperativo compreender os efeitos da poluição por plásticos, do clima e vice-versa, bem como de outras pressões ambientais como interligados e cumulativos, em vez de isolá-los e colocá-los em oposição uns aos outros. Enfrentar os inúmeros desafios complexos que a poluição por plásticos apresenta exigirá, portanto, uma mudança genuína das abordagens isoladas para um modelo onde cientistas

ambientais se engajem em diálogos interdisciplinares e reconheçam plenamente a ligação entre cada um dos aspectos em estudo: “Poluição por plástico” e as “Mudanças Climáticas”.

7 REFERÊNCIAS

ADOMAKO, M. O. et al. Potential synergy of microplastics and nitrogen enrichment on plant holobionts in wetland ecosystems. **Science of The Total Environment**, v. 915, p. 170160, mar. 2024.

AIGAJE, E.; RIOFRIO, A.; BAYKARA, H. Processing, Properties, Modifications, and Environmental Impact of Nanocellulose/Biopolymer Composites: A Review. **Polymers**, v. 15, n. 5, p. 1219, 28 fev. 2023.

ANDRADY, A. L.; NEAL, M. A. Applications and societal benefits of plastics. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1526, p. 1977–1984, 27 jul. 2009.

ANTRANIKIAN, G.; STREIT, W. R. Microorganisms harbor keys to a circular bioeconomy making them useful tools in fighting plastic pollution and rising CO2 levels. **Extremophiles**, v. 26, n. 1, p. 10, abr. 2022.

ARMSTRONG MCKAY, D. I. et al. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. **Science**, v. 377, n. 6611, p. eabn7950, 9 set. 2022.

ATABAY, D.; ROSENTRATER, K. A.; GHNIMI, S. The sustainability debate on plastics: Cradle to grave Life Cycle Assessment and Techno-Economical Analysis of PP and PLA polymers with a “Polluter Pays Principle” perspective. **Frontiers in Sustainability**, v. 3, p. 931417, 16 set. 2022.

BANDH, S. A. et al. Importance of Blue Carbon in Mitigating Climate Change and Plastic/Microplastic Pollution and Promoting Circular Economy. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2682, 2023.

BERGMANN, M. et al. Plastic pollution in the Arctic. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 3, n. 5, p. 323–337, 5 abr. 2022.

BIRKLE, C. et al. Web of Science as a data source for research on scientific and scholarly activity. **Quantitative Science Studies**, v. 1, n. 1, p. 363–376, fev. 2020.

CELEBI SOZENER, Z. et al. The External Exposome and Allergies: From the Perspective of the Epithelial Barrier Hypothesis. **Frontiers in Allergy**, v. 3, p. 887672, 8 jul. 2022.

CHANG, M. et al. Warming, temperature fluctuations and thermal evolution change the effects of microplastics at an environmentally relevant concentration. **Environmental Pollution**, v. 292, p. 118363, jan. 2022.

CHANGWICHAN, K.; GHEEWALA, S. H. Choice of materials for takeaway beverage cups towards a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 22, p. 34–44, abr. 2020.

CHEUNG, C. K. H.; NOT, C. Impacts of extreme weather events on microplastic distribution in coastal environments. **Science of The Total Environment**, v. 904, p. 166723, dez. 2023.

CHIA, R. W. et al. Role of soil microplastic pollution in climate change. **Science of The Total Environment**, v. 887, p. 164112, ago. 2023.

COLE, M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 12, p. 2588–2597, dez. 2011.

CRUTZEN, P. J. Geology of mankind. **Nature**, v. 415, n. 6867, p. 23–23, jan. 2002.

DIFFENBAUGH, N. S.; FIELD, C. B. Changes in Ecologically Critical Terrestrial Climate Conditions. **Science**, v. 341, n. 6145, p. 486–492, 2 ago. 2013.

DING, L. et al. The effects of microplastics on soil ecosystem: A review. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 26, p. 100344, abr. 2022.

DORMER, A. et al. Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 133–141, jul. 2013.

ERIKSSON, O.; FINNVEDEN, G. Plastic waste as a fuel - CO2-neutral or not? **Energy & Environmental Science**, v. 2, n. 9, p. 907, 2009.

FENG, L. et al. Investigating the composition and distribution of microplastics surface biofilms in coral areas. **Chemosphere**, v. 252, p. 126565, ago. 2020.

FISCHER-KOWALSKI, M.; KRAUSMANN, F.; PALLUA, I. A sociometabolic reading of the Anthropocene: Modes of subsistence, population size and human impact on Earth. **The Anthropocene Review**, v. 1, n. 1, p. 8–33, abr. 2014.

FORD, H. V. et al. The fundamental links between climate change and marine plastic pollution. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 150392, 2022.

FRAGÃO, J. et al. Microplastics and other anthropogenic particles in Antarctica: Using penguins as biological samplers. **Science of The Total Environment**, v. 788, p. 147698, set. 2021.

GALGANI, F. et al. Revisiting the strategy for marine litter monitoring within the european marine strategy framework directive (MSFD). **Ocean & Coastal Management**, v. 255, p. 107254, set. 2024.

GAUTAM, M.; AGRAWAL, M. Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Management: A Review of Global Scenario. Em: MUTHU, S. S. (Ed.). **Carbon Footprint Case Studies**. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 123–160.

GEYER, R. A Brief History of Plastics. Em: STREIT-BIANCHI, M.; CIMADEVILA, M.; TRETTNAK, W. (Eds.). **Mare Plasticum - The Plastic Sea**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 31–47.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 7 jul. 2017.

GODDIJN-MURPHY, L. et al. The links between marine plastic litter and the air-sea flux of greenhouse gases. **Frontiers in Marine Science**, v. 10, p. 1180761, 31 jul. 2023.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Information & Libraries Journal**, v. 26, n. 2, p. 91–108, jun. 2009.

GURGACZ, N. S. et al. Impact of plastic pollution on atmospheric carbon dioxide. **FACETS**, v. 8, p. 1–7, 2023.

HALE, R. C.; KING, A. E.; RAMIREZ, J. M. Plastic debris: An overview of composition, sources, environmental occurrence, transport, and fate. Em: **Microplastic Contamination in Aquatic Environments**. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 1–31.

HAQUE, F.; FAN, C. Fate of microplastics under the influence of climate change. **iScience**, v. 26, n. 9, p. 107649, 2023.

HUANG, Z. et al. Closing plastic loop with CCUS: Life cycle assessment of a novel strategy for plastic sustainable transition and negative emissions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 208, p. 107738, set. 2024.

HUE, H. T. T. et al. ASSESSMENT OF MICROPLASTICS CONTAMINATION IN COMMERICIAL CLAMS IN THE COASTAL ZONE OF VIETNAM. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 19, n. 6, p. 4977–4991, 2021.

HURLEY, R. et al. Plastic waste in the terrestrial environment. Em: **Plastic Waste and Recycling**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 163–193.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2023a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2023b.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty**. 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2022.

JAMBECK, J. R. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, v. 347, n. 6223, p. 768–771, 13 fev. 2015.

JANSEN, M. A. K. et al. Plastics in the environment in the context of UV radiation, climate change and the Montreal Protocol: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, Update 2023. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 23, n. 4, p. 629–650, abr. 2024.

JIAO, H. et al. A critical review on plastic waste life cycle assessment and management: Challenges, research gaps, and future perspectives. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 271, p. 115942, fev. 2024.

JIMOH, J. O. et al. Impact of face mask microplastics pollution on the aquatic environment

and aquaculture organisms. **Environmental Pollution**, v. 317, p. 120769, jan. 2023.

KARKANORACHAKI, K.; SYRANIDOU, E.; KALOGERAKIS, N. Extreme weather events as an important factor for the evolution of plastisphere but not for the degradation process. **Water Research**, v. 246, p. 120687, nov. 2023.

KELLER, B. D. et al. Climate Change, Coral Reef Ecosystems, and Management Options for Marine Protected Areas. **Environmental Management**, v. 44, n. 6, p. 1069–1088, dez. 2009.

KHOAELE, K. K. et al. The Devastation of Waste Plastic on the Environment and Remediation Processes: A Critical Review. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5233, 15 mar. 2023.

KRYSTOSIK, A. et al. Solid Wastes Provide Breeding Sites, Burrows, and Food for Biological Disease Vectors, and Urban Zoonotic Reservoirs: A Call to Action for Solutions-Based Research. **Frontiers in Public Health**, v. 7, p. 405, 17 jan. 2020.

LADE, S. J. et al. Human impacts on planetary boundaries amplified by Earth system interactions. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 2, p. 119–128, 16 dez. 2019.

LAVERS, J. L.; BOND, A. L.; ROLSKY, C. Far from a distraction: Plastic pollution and the planetary emergency. **Biological Conservation**, v. 272, p. 109655, 2022.

LEBRETON, L.; ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. **Palgrave Communications**, v. 5, n. 1, p. 6, 29 jan. 2019.

LEBRETON, L. C. M. et al. River plastic emissions to the world's oceans. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 15611, 7 jun. 2017.

LIBERATI, A. et al. The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000100, 21 jul. 2009.

LINCOLN, S. et al. Interaction of climate change and marine pollution in Southern India: Implications for coastal zone management practices and policies. **Science of The Total Environment**, v. 902, p. 166061, dez. 2023.

LO, H.-S. et al. Impacts of Typhoon Mangkhut in 2018 on the deposition of marine debris and microplastics on beaches in Hong Kong. **Science of The Total Environment**, v. 716, p. 137172, maio 2020a.

LO, H.-S. et al. Impacts of Typhoon Mangkhut in 2018 on the deposition of marine debris and microplastics on beaches in Hong Kong. **Science of The Total Environment**, v. 716, p. 137172, maio 2020b.

LOH, Y. Z.; CHEW, I. M. L. Mitigating plastic pollution through better process design: an opportunity from biomass to bioplastic. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 7 out. 2021.

LUO, Y.; ZHAO, J. Using behavioral interventions to reduce single-use produce bags. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 193, p. 106942, jun. 2023.

MARANGONI, L. F. B.; BERAUD, E.; FERRIER-PAGÈS, C. Polystyrene nanoplastics impair the photosynthetic capacities of Symbiodiniaceae and promote coral bleaching.

Science of The Total Environment, v. 815, p. 152136, abr. 2022.

MARCH, A.; ROBERTS, K. P.; FLETCHER, S. A new treaty process offers hope to end plastic pollution. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 3, n. 11, p. 726–727, 9 nov. 2022.

MENGIST, W.; SOROMESSA, T.; LEGESE, G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. **MethodsX**, v. 7, p. 100777, 2020.

NAPPER, I. E. et al. Reaching New Heights in Plastic Pollution—Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest. **One Earth**, v. 3, n. 5, p. 621–630, nov. 2020.

NEO, E. R. K. et al. Life cycle assessment of plastic waste end-of-life for India and Indonesia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, p. 105774, nov. 2021.

NGUYEN, P. Q. et al. Harnessing synthetic biology to enhance ocean health. **Trends in Biotechnology**, v. 41, n. 7, p. 860–874, jul. 2023.

NIGHTINGALE, A. A guide to systematic literature reviews. **Surgery (Oxford)**, v. 27, n. 9, p. 381–384, set. 2009.

OECD. **Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060**. [s.l.] OECD, 2022.

PARVEZ, MD. S. et al. Role of Microplastics in Global Warming and Climate Change: A Review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 3, p. 201, 2024.

PERSSON, L. et al. Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. **Environmental Science & Technology**, v. 56, n. 3, p. 1510–1521, 1 fev. 2022.

PRADIT, S. et al. The Occurrence of Microplastics in Sediment Cores from Two Mangrove Areas in Southern Thailand. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 3, p. 418, 13 mar. 2022.

PRAET, E. Plastic pollution: archaeological perspective on an Anthropocene climate emergency. **World Archaeology**, p. 1–19, 4 mar. 2024.

PROVENCHER, J. F. et al. A Horizon Scan of research priorities to inform policies aimed at reducing the harm of plastic pollution to biota. **Science of The Total Environment**, v. 733, p. 139381, set. 2020.

RAI, P. K. et al. Micro- and nano-plastic pollution: Behavior, microbial ecology, and remediation technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, p. 125240, abr. 2021.

RASHEED, Z.; TSHOMO, U. Evaluating Microplastics Removal Efficiency of Textile Industry Conventional Wastewater Treatment Plant of Thailand. **Journal of Ecological Engineering**, v. 25, n. 7, p. 256–264, 1 jul. 2024.

RATNASARI, A. et al. The Crucial Nexus of Microplastics on Ecosystem and Climate Change: Types, Source, Impacts, and Transport. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 5, p. 315, 2024.

REICHERT, J. et al. Impacts of microplastics on growth and health of hermatypic corals are species-specific. **Environmental Pollution**, v. 254, p. 113074, nov. 2019.

REN, T.; PATEL, M.; BLOK, K. Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. **Energy**, v. 31, n. 4, p. 425–451, mar. 2006.

RICHARDSON, K. et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, n. 37, p. eadh2458, 15 set. 2023.

ROCHMAN, C. M. et al. Long-Term Field Measurement of Sorption of Organic Contaminants to Five Types of Plastic Pellets: Implications for Plastic Marine Debris. **Environmental Science & Technology**, p. 130109073312009, 9 jan. 2013.

ROCKSTRÖM, J. et al. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, p. art32, 2009.

ROMERA-CASTILLO, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. **Science of The Total Environment**, v. 854, p. 158683, jan. 2023.

RZYMSKI, P. et al. Climate warming, environmental degradation and pollution as drivers of antibiotic resistance. **Environmental Pollution**, v. 346, p. 123649, abr. 2024.

SANZ-LÁZARO, C.; CASADO-COY, N.; BELTRÁN-SANAHUJA, A. Biodegradable plastics can alter carbon and nitrogen cycles to a greater extent than conventional plastics in marine sediment. **Science of The Total Environment**, v. 756, p. 143978, fev. 2021.

SCHELLNHUBER, H. J. Discourse: Earth System Analysis — The Scope of the Challenge. Em: SCHELLNHUBER, H.-J.; WENZEL, V. (Eds.). **Earth System Analysis**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998. p. 3–195.

SHARMA, S.; SHARMA, V.; CHATTERJEE, S. Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment - A review. **Science of The Total Environment**, v. 875, p. 162627, jun. 2023.

SHEN, M. et al. (Micro)plastic crisis: Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120138, 2020a.

SHEN, M. et al. Can microplastics pose a threat to ocean carbon sequestration? **Marine Pollution Bulletin**, v. 150, p. 110712, 2020b.

SHEN, M. et al. Recent advances in the research on effects of micro/nanoplastics on carbon conversion and carbon cycle: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 334, p. 117529, maio 2023.

SOHN, Y. J. et al. Recent Advances in Sustainable Plastic Upcycling and Biopolymers. **Biotechnology Journal**, v. 15, n. 6, p. 1900489, jun. 2020.

SOUSA-GUEDES, D. et al. Plastic pollution can affect the emergence patterns of loggerhead turtle hatchlings. **Animal Conservation**, v. 26, n. 4, p. 492–501, ago. 2023.

STAFFORD, R.; JONES, P. J. S. Viewpoint – Ocean plastic pollution: A convenient but distracting truth? **Marine Policy**, v. 103, p. 187–191, maio 2019a.

STAFFORD, R.; JONES, P. J. S. We should not separate out environmental issues, but the current approach to plastic pollution can be a distraction from meaningful action. A response to Avery-Gomm et al. **Marine Policy**, v. 107, p. 103585, set. 2019b.

STEFÁNSSON, H. et al. Microplastics in Glaciers: First Results from the Vatnajökull Ice Cap. **Sustainability**, v. 13, n. 8, p. 4183, 9 abr. 2021.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, p. 1259855, 13 fev. 2015.

STEFFEN, W. et al. The emergence and evolution of Earth System Science. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 1, p. 54–63, 13 jan. 2020.

TANG, K. H. D. Climate Change and Plastic Pollution: A Review of Their Connections. **Tropical Environment, Biology, and Technology**, v. 1, n. 2, p. 110–120, 2023.

THOMPSON, R. C. et al. Twenty years of microplastics pollution research—what have we learned? **Science**, p. eadl2746, 19 set. 2024.

VERED, G.; SHENKAR, N. Plastic pollution in a coral reef climate refuge: Occurrence of anthropogenic debris, microplastics, and plasticizers in the Gulf of Aqaba. **Science of The Total Environment**, v. 905, p. 167791, dez. 2023.

WALKER, T. R.; FEQUET, L. Current trends of unsustainable plastic production and micro(nano)plastic pollution. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 160, p. 116984, mar. 2023.

WANG, Y. et al. Unveiling the hidden impact: How biodegradable microplastics influence CO2 and CH4 emissions and Volatile Organic Compounds (VOCs) profiles in soil ecosystems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 471, p. 134294, jun. 2024.

WATERS, Y. L.; WILSON, K. A.; DEAN, A. J. Plastic action or distraction? Marine plastic campaigns influence public engagement with climate change in both general and engaged audiences. **Marine Policy**, v. 152, p. 105580, jun. 2023.

WILLIAMS, A. T.; RANGEL-BUITRAGO, N. The past, present, and future of plastic pollution. **Marine Pollution Bulletin**, v. 176, p. 113429, mar. 2022.

WIRNKOR VERLA, A. et al. Effect of macro-and micro-plastics in soil on growth of Juvenile Lime Tree (Citrus aurantium). **AIMS Environmental Science**, v. 7, n. 6, p. 526–541, 2020.

ZALASIEWICZ, J. et al. When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. **Quaternary International**, v. 383, p. 196–203, out. 2015.

ZALASIEWICZ, J. et al. The Working Group on the Anthropocene: Summary of evidence and interim recommendations. **Anthropocene**, v. 19, p. 55–60, set. 2017.

ZHAO, J. R. et al. A mini-review on building insulation materials from perspective of plastic pollution: Current issues and natural fibres as a possible solution. **Journal of Hazardous Materials**, v. 438, p. 129449, set. 2022.

ZHAO, X.; YOU, F. Cascading Polymer Macro-Debris Upcycling and Microparticle Removal as an Effective Life Cycle Plastic Pollution Mitigation Strategy. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 16, p. 6506–6519, 25 abr. 2023.

ZHENG, J.; SUH, S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 5, p. 374–378, maio 2019.