

Technologies for reducing plastics generated by the industrial sector: Systematic literature review

Jolver Edixon Rios-Granda, Estudiante Ingeniería Industrial¹; Angie Evelyn-Valdivia-Sánchez, Estudiante Ingeniería Industrial²; Jorge Luis Leiva- Piedra, Magister en Protección de Cultivos³; Yenny Anali-Tenorio-Ortiz, Magister en Docencia Universitaria y Gestión Educativa⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, U21201853@utp.edu.pe, U21231156@utp.edu.pe, jleiva@utp.edu.pe, ytenorio@utp.edu.pe

Abstract- Plastic pollution is a growing environmental concern worldwide. This systematic review of the literature sought to analyze existing technologies for reducing plastic waste generated by the industrial sector. To this end, the PICOC methodology was used to identify search keywords and questions for subsequent analysis. Inclusion and exclusion criteria were also established, with the analysis period set at 2020–2024. Finally, the PRISMA method was applied to systematize the screening, selecting a total of 54 studies. The results obtained showed us that the most notable technologies for plastic reduction are pyrolysis, reburning, degradative depolymerization, chemical recycling, mechanical filtering, and enzymatic biodegradation. These solutions have shown efficiency levels above 90% in some cases, allowing plastic waste to be converted into energy, fuel, and recyclable materials. However, all technologies have disadvantages, such as high energy consumption, operating costs, availability of raw materials, or specialized infrastructure. Evidence suggests that no single technology can solve the problem entirely; rather, a combination of solutions tailored to the type of plastic, industry, and desired objective is required. These technologies are a crucial step toward a circular economy and more sustainable production.

Keywords- plastics, microplastics, technologies, reduction, industry.

Tecnologías para la reducción de plásticos generados por el sector industrial: Revisión sistemática de literatura

Jolver Edixon Rios-Granda, Estudiante Ingeniería Industrial¹; Angie Evelyn-Valdivia-Sánchez, Estudiante Ingeniería Industrial²; Jorge Luis Leiva- Piedra, Magister en Protección de Cultivos³; Yenny Anali-Tenorio-Ortiz, Magister en Docencia Universitaria y Gestión Educativa⁴; y
^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, U21201853@utp.edu.pe, U21231156@utp.edu.pe, jleiva@utp.edu.pe, ytenorio@utp.edu.pe

Resumen– La contaminación por plástico es una preocupación ambiental creciente a nivel mundial. La presente revisión sistemática de la literatura buscó analizar las tecnologías existentes para la reducción de residuos plásticos generados por el sector industrial. Para ello, se utilizó la metodología PICOC, para la identificación de las palabras clave de búsqueda y las preguntas para el posterior análisis, asimismo, se establecieron criterios de inclusión y exclusión, tomándose como periodo de análisis los años 2020 – 2024, finalmente se aplicó el método PRISMA para la sistematización del cribado, seleccionándose un total de 54. Los resultados obtenidos nos mostraron que las tecnologías más notables en la reducción de plástico se encuentran la pirólisis, la recombustión, la despolimerización degradativa, el reciclaje químico, el filtrado mecánico y la biodegradación enzimática. Estas soluciones han mostrado niveles de eficiencia superiores al 90% en algunos casos, permitiendo que los residuos plásticos se conviertan en energía, combustible, materiales reciclables. Sin embargo, toda tecnología tiene desventajas, como el alto consumo de energía, los costos operativos, la disponibilidad de materias primas o la infraestructura especializada. La evidencia sugiere que no existe una tecnología que pueda resolver el problema en su totalidad; más bien, se requiere una combinación de soluciones adaptadas al tipo de plástico, la industria y el objetivo deseado. Estas tecnologías son un paso crucial hacia una economía circular y una producción más sostenible.

Palabras clave-- plásticos, microplásticos, tecnologías, reducción, industria.

I. INTRODUCCIÓN

La producción de plásticos ha experimentado un crecimiento acelerado, superando los 367 millones de toneladas en el 2020 y las 400 en el 2022 [1], [2], [3]. Las proyecciones indican que podría superar las 1100 en 2060 [3], [4], lo que representa un aumento de más del 22 000% en comparación con 1950 [5]. Esto se debe, a la expansión de actividades industriales que requieren materiales derivados del petróleo como el propileno y el polietileno, que constituyen más del 65% del total de plástico producido [6], [7]. Ante este panorama, la gestión de estos residuos se ha convertido en un desafío creciente, en Estados Unidos el 60% se envían a vertederos, el 10% no se recicla y el 30% no se contabiliza [8]. La situación es igualmente preocupante en otros países; en Shanghái, se vierten aproximadamente 1.5 millones de plásticos en el Mar Amarillo [9]. Por otro lado, están los microplásticos, partículas menores a 5 µm originadas por la manipulación y degradación de plásticos, los cuales suman 51

billones partículas dispersas en el ambiente [9]. Estas han sido encontradas en alimentos, bebidas, leche materna y hasta en la sangre humana con concentraciones de hasta 1.6 µg/mL [10]. Además, se ha demostrado que funcionan como vectores metálicos al combinarse con cadmio, logrando aumentar su nivel de toxicidad [11]. Igualmente, se ha encontrado que disueltos en el sistema acuático su nivel de absorción es mayor, lo que afecta la reproducción y supervivencia de los seres vivos [12]. Esta problemática se intensifica al observar que en la industria textil se produce 42 millones de toneladas de fibras sintéticas [1], y que un solo kilogramo de ropa puede liberar hasta 3.3×10^{14} partículas de microplásticos, esto durante el proceso de lavado [1], [13]. Por su parte, la industria de bebidas contribuye con la liberación de microfibras y partículas plásticas, con concentraciones de hasta 5.45 fibras/L y 4.05 partículas plásticas/L, [14]. Este desafío se vuelve aún más alarmante si consideramos que en 2050 existirán más microplásticos que peces en el océano [14].

En ese contexto, el reciclaje químico se proyecta como una tecnología del mañana, capaz de transformar residuos plásticos en materia prima de alta calidad [15]. Paralelamente, el reciclaje mecánico ha demostrado su potencial en la producción de membranas filtrantes a partir de botellas recicladas, capaces de reducir el nivel de turbidez del agua a 1.42 NTU [16]. Adicionalmente, se exploran alternativas innovadoras como la producción de envases biodegradables a partir de almidón de maíz, papel reciclado y la pulpa de paja natural [17]. Asimismo, está la captura y el almacenamiento de carbono (CCS) capaz de evitar la liberación de CO₂ a la atmosfera en el proceso de incineración [18]. Siguiendo esa misma línea, se está analizando reemplazar las materias primas fósiles por biomasa renovable y lignina en la producción de polímeros, buscando disminuir el tiempo de descomposición de estos residuos [19]. De igual modo, se destaca el moldeo por extrusión de plásticos como una forma eficiente para fabricar traviesas ferroviarias, generando menos emisiones de gases de efecto invernadero [20].

En ese sentido, diversas investigaciones han mostrado resultados tecnológicos significativos. La teledetección óptica combinada con bandas espectrales y la inteligencia artificial,

ha notado una eficiencia del 97% a la hora de identificar diferentes tipos de plásticos en zonas costeras y playas [21]. En el ámbito de valorización energética, la pirolisis catalítica emerge como una solución para transformar residuos plásticos en aceite de pirolisis, un combustible competitivo y económico, con un costo hasta menor del 25% [22]. No obstante, el uso de los residuos del polietileno como combustible de recombustión ha demostrado una disminución de un 82% en las emisiones de óxido de nitrógeno, un contaminante nocivo que se libera en las calderas industriales [23]. En esa misma línea, se ha logrado formular espumas de poliuretano adicionando un 10% de biopoliol, un compuesto derivado de aceites vegetales para la fabricación de asientos de vehículos [24]. Finalmente, la adsorción se destaca por remover microplásticos, por el hecho que ha alcanzado una eficiencia superior al 95%, gracias al uso del carbón activado y del biocarbón, un adsorbente a base de residuos de maíz o caña de azúcar [25], [26]. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar a través de una revisión sistemática de literatura, las tecnologías utilizadas para reducir los plásticos en el sector industrial, identificando la eficiencia y limitaciones que está presentando a la hora de implementarlas.

II. METODOLOGÍA

Inicialmente, se recopiló información de las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS) y se aplicó la metodología PICO [27], donde se formularon preguntas (Ver TABLA 1) y se identificaron palabras clave para cada componente (Ver TABLA 2).

TABLA 1
PREGUNTAS PICO

P	Población	¿Qué efectos genera los residuos plásticos en los ecosistemas?
I	Intervención	¿Qué tecnologías se han aplicado para reducir las emisiones de plásticos?
O	Resultados	¿Qué nivel de eficacia han demostrado las tecnologías en la reducción del uso de plásticos?
C	Contexto	¿En qué industrias se han aplicado estas tecnologías para la reducción en la emisión de plásticos?

TABLA 2
PALABRAS CLAVE

P	Población	"Plastics" OR "microplastics"
I	Intervención	"Technology" OR "sustainable technology" OR "technologies"
O	Resultados	"Reduction" OR "mitigation"
C	Contexto	Industry

Seguidamente, se utilizaron las palabras claves de la Tabla 1 para iniciar el proceso de búsqueda en Scopus. A su vez, se establecieron criterios de inclusión de acceso abierto, el idioma inglés y artículos entre los 2020 y 2025. A partir de estos parámetros nos dio como resultado la siguiente ecuación de búsqueda: (TITLE-ABS-KEY ("plastics" OR

"microplastics") AND TITLE-ABS-KEY ("technology" OR "sustainable technology" OR "technologies") AND TITLE-ABS-KEY ("reduction" OR "mitigation") AND TITLE-ABS-KEY (industry)) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")). Aplicando los mismos criterios en Scopus se procedió a determinar la cadena de búsqueda dentro de Web of Science, obteniéndose: (TS=("plastics" OR "microplastics") AND TS=("technology" OR "sustainable technology" OR "technologies") AND TS=("reduction" OR "mitigation") AND TS=(industry)) AND (PY=("2025" OR "2024" OR "2023" OR "2022" OR "2021" OR "2020") AND DT=("ARTICLE") AND LA=("ENGLISH") AND OAJ=("ALL OPEN ACCESS").

Después de definir los criterios de filtrado, se aplicó la metodología PRISMA [28], representada mediante un diagrama de flujo (Fig. 2). El diagrama se construyó siguiendo este proceso: se identificaron 141 artículos, considerando 113 en Scopus y 28 Web of Science, seguidamente, se procedió a identificar el número de investigaciones duplicadas de ambas revistas, dando como resultado 118 registros únicos. Posteriormente, se descartaron 55 de ellos tras analizar sus títulos, palabras clave y resúmenes, lo que redujo la cantidad a 63 registros. De estos, se excluyeron 2, debido a la falta de acceso abierto, resultando en un total de 61 publicaciones consideradas para la evaluación de su elegibilidad. Posteriormente se empleó los criterios de inclusión establecidos en la Fig. 1.

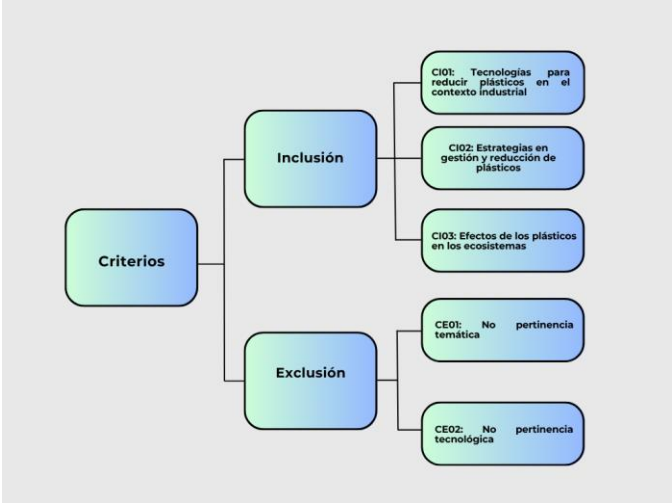


Fig. 1. Criterios de inclusión y exclusión

Tras aplicar los criterios de exclusión 1 (CE01), y 2 (CE02), se eliminaron un total de 4 y 3 publicaciones respectivamente. Finalmente, se incluyeron en la revisión 54 registros, sin que se incorporaran nuevos documentos adicionales.

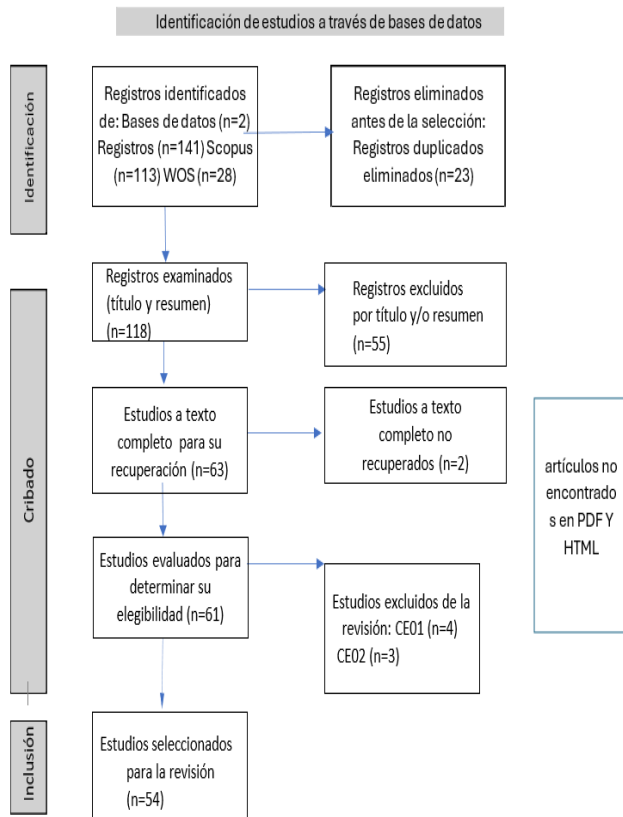


Fig. 2. Diagrama de flujo PRISMA

III. RESULTADOS

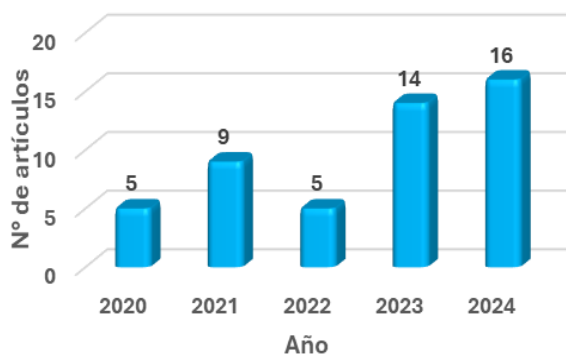


Fig. 3. Evolución de investigaciones sobre tecnologías para la reducción de plásticos en el sector industrial (2020–2024)

En la Fig. 3 se observa el número de investigaciones vinculadas con la reducción de plásticos en el sector industrial. Los resultados muestran un interés creciente por la comunidad científica generada por los factores políticos, regulatorios y tecnológicos que han inducido la investigación en este campo. Las políticas regionales como la Directiva (UE) 2019/904 de la Unión Europea restringe productos plásticos de un solo uso y exige contenidos mínimos de reciclado en envases industriales [28]. Además, otros de los principales impulsores

ha sido la enmienda al Convenio de Basilea, el cual fue modificado en el 2019 durante la catorceava conferencia de las partes (COP-14); la enmienda incluyó a los residuos plásticos dentro del régimen legal internacional donde fueron clasificados en peligrosos, limpios y reciclables, incorporando obligaciones y normas para su importación y exportación [29]. Asimismo, otras de las principales variables fue el comienzo de las negociaciones del Tratado Mundial de Contaminación por Plásticos (PNUMA) mediante la Resolución 5/14 en marzo de 2022 [30]. Este acuerdo global ratificó el compromiso de 175 naciones para elaborar un instrumento legal obligatorio que trate todo el ciclo de vida de los plásticos, desde su fabricación hasta su eliminación definitiva [31]. Todo lo mencionado podría haber generado un entorno favorable para investigar sobre tecnologías para la reducción de residuos plásticos en el sector industrial.

TABLA 3
Efectos de los residuos plásticos en los ecosistemas

EFFECTOS	FUENTE
Alteración de cadenas alimenticias	[15], [16], [17], [32], [33], [34]
Muerte y acumulación de toxinas en especies marinas	[15], [32], [35], [36], [37]
Alteración en la reproducción de especies marinas	[35], [38]
Daños físicos y alteraciones de microbiota	[32], [34], [39]
Bloquean o reducen la entrada de luz solar a las plantas	[20]
Altera la estructura y descomposición del suelo	[23], [32], [39], [40], [41]
Problemas de salud	[17], [32], [33], [37]
Aumenta en un 4.4% CO ₂	[17], [18], [19], [23], [24], [42], [43], [44], [45]
Emiten dioxinas y furanos, contaminación de aguas subterráneas	[46]
Obstrucción de sistemas de drenaje y alcantarillado	[23], [35], [38]

En la Tabla 3 se presentan los efectos provocados por la emisión de los residuos plásticos en los ecosistemas. Estos efectos no solo se generan por la resistencia a la degradación de polímeros sintéticos como el polietileno (PE), polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET) [36], [39], [47], sino también por su inadecuada gestión, poca reciclabilidad, elevado consumo de polímeros de un solo uso, y las limitaciones estructurales del sistema de producción y reciclaje [15], [22], [24], [33], [48].

Uno de los efectos más recurrentes como la alteración de cadenas alimenticias, muerte de peces, la acumulación de toxinas en especies marinas, así como las alteraciones reproductivas se originan por el ingreso anual de más de 11 millones de toneladas de plástico al océano [41]. Estos

plásticos debido a su baja degradabilidad, se fragmentan en microplásticos por acción del calor, el oleaje y la abrasión mecánica; dichos fragmentos actúan como vectores de contaminantes como el bisfenol A (BPA), ftalatos y metales pesados como el plomo y el cadmio, los cuales bioacumulan en la fauna marina y terrestre y posteriormente ingresan al organismo a través de la cadena alimenticia [22], [34], [39], [47], [49]. A ello se suma la limitada capacidad de reciclaje a nivel global. A pesar de los esfuerzos recientes, solo alrededor del 9 % de los residuos plásticos generados desde 1950 ha sido reciclado, el 79% incinerado, y lo restante depositado en vertederos o arrojado al ambiente [38], [45], [50].

Por otro lado, otro efecto crítico es el aumento del 4.4% en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), esto se explica por el carácter intensivo de carbono de todo el ciclo de vida de los plásticos. Aproximadamente el 10% del petróleo mundial está destinado a su producción, y solo en China, la fabricación de plásticos fósiles como PE, PET y PS generó 2,78 millones de toneladas de CO₂ en 2020, proyectando un aumento a 4.10 millones de toneladas en 2050 [51]. Esta alta huella se debe a procesos emisivos como el craqueo del petróleo, el uso de nafta y gas natural, y el transporte de insumos [18]. Además, los residuos plásticos, al ser incinerados o dispuestos en vertederos, liberan CO₂, CH₄ e incluso H₂, tanto por descomposición térmica como microbiana, contribuyendo directamente al calentamiento global [19], [44].

El modelo de análisis de ciclo de vida (LCA) muestra que incluso con recuperación energética, la incineración sigue siendo el método más contaminante, y que los residuos plásticos sin valorización adecuada solo aumentan la acumulación neta de carbono en la atmósfera [41], [45]. Un ejemplo claro, se observa en el uso masivo de envases de un solo uso como como el polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno de alta densidad (HDPE) dado que generan 0.68 kg de CO₂. [17].

Otro de los efectos más visibles es la obstrucción de drenaje y sistema de alcantarillado. Este efecto se deriva de la acumulación de bolsas desechables, embalajes, envoltorios, tapa y contenedores, que al no ser recolectados ni tratados de forma adecuada termina en calles, canales pluviales, impidiendo el flujo normal del agua [12], [40]. La situación se agrava dado que más de 60 millones de envases se producen al día, los cuales la mayoría no se recicla ni se reutiliza, debido a que están contaminados por residuos orgánicos [12]. Además, estos residuos son fácilmente transportados por el viento y al quedar atrapados bloquean los sistemas de evacuación de drenaje [41], [45]. Por ello, en muchos países, las tasas de reciclaje no superan el 10 %, y hasta el 42 % de los residuos plásticos son directamente incinerados o enviados a vertederos. Cuando estos sistemas colapsan, el excedente acaba en cuerpos de agua o sistemas de drenaje urbano, agravando aún más el problema [18], [19]. En general, estos

efectos demuestran que los residuos plásticos no solo alteran los ecosistemas, sino que están profundamente ligados a la salud humana, el cambio climático y la eficiencia de los sistemas urbanos. Comprender sus causas permite desarrollar tecnologías efectivas para eliminar y/o reducir la emisión de plásticos en nuestro ecosistema.

TABLA 4
Tecnologías para la reducción de plásticos en el sector industrial

TECNOLOGÍA	INDUSTRIA	FUENTE
Pirólisis	Química y energética	[22], [44], [47], [52], [53]
Tecnología verde		[16], [17], [32], [34], [54]
Biodegradación enzimática	Empaques biomédicos y alimentarios	[36], [55]
Filtración mecánica	Textil, agrícola y química	[35]
Micronización	Aditivos y pinturas	[47]
Recombustión	Cementera y siderúrgica	[23]
Despolimerización degradativa	Energética, química y refinerías	[56]
Craqueo químico	Petroquímica	[48]

En la tabla. 4 observamos que el sector industrial ha desarrollado varias tecnologías con el objetivo de disminuir el uso y acumulación de plásticos, ya sea a través de su reemplazo, modificación, degradación o reutilización. Una de las tecnologías más utilizadas es la pirólisis, la cual ofrece una solución eficaz para los plásticos no reciclables, contribuyendo a la economía circular al disminuir los costos de conversión de residuos en recursos útiles. Este proceso se realiza sin necesidad de incineración, lo que evita emisiones tóxicas y reduce la dependencia de plásticos vírgenes [22]. Su aplicación se ha expandido en industrias como el transporte, la energía y la gestión de residuos, donde se ha reportado una valorización de hasta el 98 % de los residuos plásticos, evitando su disposición en vertederos o su incineración [53]

En el ámbito de la tecnología verde, el reciclaje convencional continúa siendo una de las estrategias más implementadas, tanto por su eficacia ambiental comprobada como por los beneficios directos que aporta a la salud pública al eliminar toxinas peligrosas y mitigar riesgos sanitarios; en China y Alemania han adoptado sistemas de reciclaje mediante envases reutilizables, lo que ha permitido reducir millones de unidades de desechos [17]. De manera similar, en la Universidad de *Shuangti*, se logró reemplazar 500 envases diarios por alternativas reutilizables, generando un impacto ambiental positivo a partir del séptimo uso de cada envase. Esta iniciativa podría contribuir significativamente a reducir los más de 60 millones de envases plásticos que se desechan diariamente.[17], [57]

Por otro lado, la biodegradación enzimática ha cobrado relevancia en las industrias de empaques biomédicos y alimentarios, especialmente durante la pandemia de COVID-19, en la gestión de residuos como mascarillas quirúrgicas, envases y productos desechables [55]. Esta tecnología ha demostrado ser eficaz, evidenciando una reducción del 10 % del peso del polipropileno en condiciones de vertedero en el plazo de un año, así como una degradación del 22 % del polietileno en tan solo dos semanas, gracias a la acción microbiana y enzimática [36], [55]

Otra tecnología ampliamente aplicada es la filtración mecánica, reconocida por su alta eficacia en la remoción de partículas de microplásticos, su bajo costo relativo y su compatibilidad con otros métodos como la coagulación o el uso de membranas es común en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde se han reportado eficiencias de remoción del 98.5% con filtros de discos, 97 % con filtros de arena, 95 % con biochar y 75 % con sistemas de membranas (ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa)[35]. Asimismo, la micronización también ha mostrado una alta efectividad en la reducción del tamaño de partículas, alcanzando hasta un 67.7 % en residuos multicomponentes como los envases *Tetra Pak*, sin requerir separación previa, lo que demuestra su versatilidad, rentabilidad y sostenibilidad en sectores como el de aditivos y pinturas, el uso de molinos de bolas ha logrado eficiencias de hasta el 70 % en la reducción de pinturas tradicionales, quien ha permitido reutilizar los parachoques de los autos a base de plástico en partículas pequeñas para su reutilización.[47].

La tecnología de recombustión es ampliamente utilizada en plantas de energía, calderas industriales e incineradores, destacando por su alta eficiencia utilizando el polietileno para la reducción de emisiones de NO_x en un 82 %, superior al 80 % obtenido con carbón y 65 % con biomasa o gas natural; asimismo, tiene un incremento en la eficiencia energética hasta un 18% debido al poder calorífico que presenta (47 MJ/kg frente a 25 MJ/kg), sin dejar de lado a su bajo costo operativo en 51 millones de dólares anuales con polietileno, apenas 6 millones más que con carbón; su versatilidad para integrar diversos combustibles, incluidos residuos plásticos, la convierte en una opción viable favoreciendo una gestión más sostenible de residuos que, de otro modo, terminarían en vertederos con un 79 % actualmente.[58]

También, la despolimerización degradativa se ha consolidado como una tecnología eficaz en los sectores energético, petroquímico y de reciclaje, por su sostenibilidad, rentabilidad y flexibilidad, lo que permite una conversión de hasta el 90 % de los residuos y podría disminuir el porcentaje de emisión de plásticos en el ecosistema; por ejemplo en Polonia, se procesa 50 toneladas diarias con una eficiencia del 90 % y pérdidas mínimas (entre el 1 % y 5 %), generando productos como combustibles líquidos, ceras y otros hidrocarburos.[56].

Finalmente, el reciclaje químico es una tecnología en auge que, según estimaciones de la Unión Europea, podría representar hasta el 30 % del tratamiento de residuos plásticos

para 2030, entre sus técnicas más relevantes se encuentra el craqueo químico, que complementa el reciclaje mecánico al permitir la reutilización del 100 % de los plásticos desechados, en contraste con el hecho de que actualmente solo el 25 % de las botellas de plástico se elaboran con material reciclado [15]. Este proceso es esencial en la producción de olefinas como etileno y propileno, mostrando una alta eficiencia energética (56.7 GJ/tonelada), aunque con emisiones elevadas de CO₂ (1.29 Mt/tonelada), a pesar de la competencia de tecnologías emergentes como el craqueo eléctrico, aún en fase de demostración, el craqueo químico domina el mercado (37 % de la demanda de calor) gracias a su escalabilidad e infraestructura existente; sin embargo, en escenarios de descarbonización, se proyecta que la electrificación industrial alcance un 68 % para 2050, reduciendo las emisiones hasta en un 82 % aunque presenta un impacto ambiental considerable, el craqueo químico continúa siendo, por el momento, la alternativa más viable [55].

TABLA 5
Limitaciones de las tecnologías para la reducción de plásticos

TECNOLOGÍA	LIMITACIONES	FUENTE
Pirolisis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto consumo energético ✓ Necesidad de una clasificación rigurosa de los residuos plásticos ✓ Genera subproductos contaminantes 	[22], [44], [53]
Tecnología verde	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gestión inadecuada de residuos plásticos ✓ Falta de políticas y normativas ✓ Costos elevados ✓ Disponibilidad de infraestructura 	[16], [17], [19], [32], [54], [59]
Biodegradación enzimática	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Altos costos ✓ Falta de escalabilidad ✓ Generación de subproductos no deseados 	[36], [55]
Filtración mecánica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Costos operativos elevados ✓ Eficiencia limitada para partículas menores a 1 µm 	[35]
Micronización	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No elimina plásticos, solo los pulveriza ✓ Consumo energético elevado 	[47]
Recombustión	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Opera a temperaturas elevadas 	[23]
Despolimerización degradativa	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Altas temperaturas 	[56]
Reducción térmica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Altas temperaturas ✓ Genera gases como CO, CO₂ y CH₄ 	[46]

En la tabla 5 se observa las limitaciones de las diversas tecnologías para la reducción de los residuos plásticos. En la pirolisis, recombustión, despolimerización degradativa, micronización y la reducción térmica, se identifica el alto consumo energético. Estas restricción, se debe a que los monómeros de los polímeros plásticos están unidos por enlaces covalentes altamente estables, los cuales necesitan elevadas temperaturas, generalmente entre a 400 a 2000 °C

para ser separados [19], [23], [46], [56]. Además, se le suma la necesidad de hacer una estricta clasificación previa a estos tipos de residuos, dado que pueden contener composiciones y temperaturas de descomposición diferentes [45], [47], [55], [60].

En la tecnología verde se observa elevados costos operativos. Estos se presentan debido al elevado costo de las materias primas [61] como la nano celulosa bacteriana (BNC) utilizada para la fabricación de films biodegradables, lo cual requiere un medio nutritivo especializado para cultivar este tipo de bacterias y un monitoreo de temperatura de 28°C [54]. Por otro lado, está la disponibilidad limitada de la biomasa, el cual se utiliza para producir materiales o empaques biodegradables [19]. Además, están las poliamidas y fibras de carbono cuyo precio es relativamente alto en la fabricación aditiva: asimismo, está el uso de equipos especializados, como los sintetizadores láser y los módulos de integración de fibra continua que requieren inversiones elevadas [32]. Por otra parte, está la producción de membranas filtrantes, aunque la adquisición de botellas plásticas (PET) tiene un menor costo, se utilizan aditivos como LiCl y polietilenglicol 400 (PEG-400) que no son económico [16]. No obstante, en la filtración mecánica se debe a que se necesitan otras tecnologías complementarias para retener partículas más pequeñas, por esta razón se obliga a utilizar procesos industriales más complejos que incrementan más a un los costos [35].

En cuanto a la micronización la gran limitación que presenta es que no es una solución definitiva para la grandes cantidades de acumulación, sino que solo es utilizada para brindar una segunda vida a los plásticos a través de la pulverización debido a que solo llega a romper mecánicamente los plásticos en partículas más pequeñas pero no altera su estructura molecular, es decir, los polímeros de PE, PET y PVC siguen siendo lo mismo solo que en forma de polvo lo que no resuelve el problema debido a que seguirán teniendo contaminantes por lo que requerirá etapas de limpieza, compatibilización y métodos adicionales, si bien ayuda a controlar la dispersión de microplásticos encapsulándolos, estos si no se controlan correctamente estas pueden liberarse al ambiente a través del agua o el aire durante su proceso [47].

IV. DISCUSIÓN

A. Efectos de los residuos plásticos en los ecosistemas

En esta investigación se dio a conocer que los plásticos al fragmentarse en microplásticos ocasionan alteraciones en la cadena alimenticia, muerte de peces, acumulación de toxinas y alteraciones reproductivas en las especies marinas. Sin embargo, otro estudio nos menciona que reducen la penetración de la luz solar impactando directamente en la actividad fotosintética del fitoplancton, debido a concentraciones de 31,000 partículas microplásticas /m³ en agregados de *Melosira arctica*, [62]. Además, otro estudio

demostró que no solo se generan estos efectos, sino también reducen la actividad de enzimas en un 50%, como la β -glucosidasa y la ureasa [63]. Asimismo, se descubrió que la exposición prolongada a residuos plásticos reduce la diversidad de nematodos y microartrópodos en suelos agrícolas, lo que pone en peligro su capacidad para descomponer materia orgánica [64].

También, se dio a conocer que los residuos plásticos son responsables de un aumento de 4.4% de la emisión de CO₂. Esto concuerda con el hallazgo referente a [65], quien informó que concentraciones de poliestireno expandido al 1% disminuyen la estabilidad de los agregados en más de un 20% y aumentan las emisiones de gases como CO₂ y CH₄.

B. Nivel de eficacia de las tecnologías en la reducción de plásticos

Los resultados muestran que las industrias han desarrollado una variedad de tecnologías para reducir los desechos plásticos. La pirólisis se presenta como una de las tecnologías predominantes para transformar estos residuos, reduciendo en un 98% [22]. Además, otros estudios corroboran que la pirólisis logra una eficacia del 88% en la transformación de estos, en comparación con el 58% alcanzado por reciclaje mecánico [66].

La filtración mecánica tiene un rendimiento en la eliminación de microplásticos de 98 %, sin embargo, esta disminuye al tratar partículas menores de 1 μ m [35]. Aun así, se ha confirmado que pueden retener hasta un 100% de partículas con diferentes formas, tamaños y tipo de polímeros, debido a la adición de tecnologías complementarias [67]. Por otro lado, los resultados sobre la biodegradación enzimática se corroboran por el estudio realizado con diversas bacterias y enzimas como petasas, cutinazas y lipasas quienes logran descomponer diferentes tipo de plásticos como PET, PU y PE. [68].

Con respecto a la recombustión un estudio nos muestra que la despolimerización degradativa supera notablemente la recombustión que, aunque reduce el volumen de residuos entre un 70 y 85% no permite la recuperación de materiales útiles lo cual limita la valorización y conversión de energía [69]. Asimismo, otro estudio confirma que la recombustión se limita a la generación de energía y la despolimerización favorece a un modelo de economía circular [2], [70].

En cuanto a la micronización los resultados se alinean con un estudio que utilizó un proceso combinado de micronización y calentamiento por microondas para convertir residuos multicomponentes en materiales termoplásticos aplicables en la construcción, obteniendo propiedades mecánicas comparables al PVC [71]. Ambos estudios enfoques muestran que la micronización no solo es una forma de acondicionamiento físico, sino que también convierte residuos plásticos difíciles de tratar en productos con valor agregado lo que podría reducir el porcentaje de emisión de plásticos en nuestro ecosistema.

C. Limitaciones de las tecnologías para la reducción de plásticos

En nuestra investigación, la pirólisis posee el potencial para procesar plásticos que son difíciles de reciclar mecánicamente; no obstante, esta tecnología enfrenta limitaciones para su viabilidad económica y ambiental, enfrentando desafíos como el alto consumo energético, lo cual incrementa costos operativos [72], [73]. Asimismo, diversas evaluaciones indican que tiene restricciones con la infraestructura industrial necesarias para el procesamiento continuo, el tratamiento de gases y la gestión de residuos secundarios, por lo que se restringe en economías en desarrollo [74], [75].

En cuanto a la filtración mecánica, se observó limitación al desarrollar filtros textiles que, a pesar de ser eficaces y sostenibles, aún requieren pruebas a largo plazo en entornos industriales [76]. Del mismo modo, la liberación de microfibras plásticas que no siempre con contenidos genera una contaminación secundaria ambiental [77]. Además, los procesos mecánicos repetidos conducen a una degradación termo mecánica afectando a la calidad del producto reciclado según el estudio realizado referente a [78].

V. CONCLUSIONES

Los residuos plásticos tienen efectos perjudiciales para el medio ambiente, afectando tanto a los ecosistemas marinos como a los terrestres. Se han observado indicios de alteración de los niveles tróficos, acumulación de toxinas en las especies, obstrucción de los sistemas de drenaje urbano y un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. La presencia de microplásticos en alimentos, agua potable e incluso en la sangre pone en riesgo la salud humana, además de poner en peligro la biodiversidad. Por lo tanto, abordar este problema requiere un enfoque sistemático y urgente.

La pirólisis, la recombustión, la despolimerización degradativa, el reciclaje químico y la biodegradación enzimática son algunas de las tecnologías que se han utilizado para reducir los residuos plásticos. Cada una actúa desde diferentes frentes: conversión energética, reutilización, degradación o transformación en productos útiles. Aunque estas tecnologías han hecho grandes avances, su efectividad depende de muchos factores, como el tipo de polímero, la escala de implementación y las condiciones del entorno industrial. La eficacia de las tecnologías varía mucho. Algunas, como la pirólisis o la filtración mecánica, tienen eficiencias superiores al 90%, mientras que otras, como la micronización o la biodegradación, tienen limitaciones en su alcance o escalabilidad. Además, factores como el alto consumo energético, los altos costos operativos y los subproductos dificultan su uso a gran escala. Las soluciones tecnológicas se han usado en muchos tipos de industrias, como la química, la energía, el tratamiento de aguas, alimentos, textiles y embalaje. Esta variedad muestra que las tecnologías son flexibles, pero también hace hincapié en la necesidad de adaptar su uso a las características y residuos que genera cada

industria. En ese sentido, la integración de estas tecnologías necesita ser apoyada por políticas públicas, inversión en infraestructura y compromiso empresarial para lograr resultados sostenibles en el largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] M. Raza, J.-Y. Lee, y J. Cha, «Microplastics in soil and freshwater: Understanding sources, distribution, potential impacts, and regulations for management», *Sci. Prog.*, vol. 105, n.º 3, p. 00368504221126676, jul. 2022, doi: 10.1177/00368504221126676.
- [2] Plastics Europe AISBL, «Plásticos – Situación en 2022». 9 de abril de 2025. Accedido: 10 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://plasticseurope.org/>
- [3] M. Dewika *et al.*, «Integrating the quintuple helix approach into atmospheric microplastics management policies for planetary health preservation», *Sci. TOTAL Environ.*, vol. 954, p. 176063, dic. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.176063.
- [4] L. A. Hamilton y S. Feit, «Plastic & Climate: The hidden costs of a plastic planet», 2019, Accedido: 10 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://policycommons.net/artifacts/2485040/untitled/3507468/>
- [5] M. A. Fayshal, «Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management», *Heliyon*, vol. 10, n.º 23, p. e40838, dic. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40838.
- [6] G. Alak, A. Uçar, V. Parlak, y M. Atamanalp, «Identification, characterisation of microplastic and their effects on aquatic organisms», *Chem. Ecol.*, vol. 38, n.º 10, pp. 967-987, 2022, doi: 10.1080/02757540.2022.2126461.
- [7] T. L. Jolaosho *et al.*, «Microplastics in freshwater and marine ecosystems: Occurrence, characterization, sources, distribution dynamics, fate, transport processes, potential mitigation strategies, and policy interventions», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 294, p. 118036, abr. 2025, doi: 10.1016/j.ecoenv.2025.118036.
- [8] V. Siracusa y I. Blanco, «Bio-polyethylene (Bio-PE), Biopolypropylene (Bio-PP) and Bio-poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications», *Polymers*, vol. 12, n.º 8, 2020, doi: 10.3390/polym12081641.
- [9] I. M. Jaikumar *et al.*, «A comprehensive review of microplastic pollution in freshwater and marine environments», *Green Anal. Chem.*, vol. 12, p. 100202, mar. 2025, doi: 10.1016/j.greeac.2024.100202.
- [10] A. Adewuyi y Q. Li, «Emergence of microplastics in African environmental drinking water sources: A review on sources, analysis and treatment strategies», *J. Hazard. Mater. Adv.*, vol. 16, p. 100465, nov. 2024, doi: 10.1016/j.hazadv.2024.100465.
- [11] Y. Zhang, M. B. Wolosker, Y. Zhao, H. Ren, y B. Lemos, «Exposure to microplastics cause gut damage, locomotor dysfunction, epigenetic silencing, and aggravate cadmium (Cd) toxicity in *Drosophila*», *Sci. Total Environ.*, vol. 744, p. 140979, nov. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140979.
- [12] Z. Wang, H. Dong, Y. Wang, R. Ren, X. Qin, y S. Wang, «Effects of microplastics and their adsorption of cadmium as vectors on the cladoceran *Moina monogolica* Daday: Implications for plastic-ingesting organisms», *J. Hazard. Mater.*, vol. 400, p. 123239, dic. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123239.
- [13] T. Yang, J. Luo, y B. Nowack, «Characterization of Nanoplastics, Fibrils, and Microplastics Released during Washing and Abrasion of Polyester Textiles», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, n.º 23, pp. 15873-15881, dic. 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c04826.
- [14] D. R. Osuna-Laveaga, V. Ojeda-Castillo, V. Flores-Payan, A. Gutierrez-Becerra, y E. D. Moreno-Medrano, «Micro- and nanoplastics current status: legislation, gaps, limitations and socio-economic prospects for future», *Front. Environ. Sci.*, vol. 11, p. 1241939, ago. 2023, doi: 10.3389/fenvs.2023.1241939.
- [15] D. Kasznik y Z. Łapniewska, «The end of plastic? The EU's directive on single-use plastics and its implementation in Poland», *Environ. Sci.*

- Policy*, vol. 145, pp. 151-163, jul. 2023, doi: 10.1016/j.envsci.2023.04.005.
- [16] B. T. Ibnu Ali, Y. Kusumawati, J. Jaafar, D. Oktavia Sulistiono, y N. Widiastuti, «Low-cost membrane from polyethylene terephthalate bottle waste for water purification and chromium removal: modification and application», *RSC Adv.*, vol. 13, n.º 13, pp. 8985-8995, 2023, doi: 10.1039/D3RA00827D.
- [17] W. Sha, «Literature review on waste management of online food delivery industry in China», *Chin. J. Popul. Resour. Environ.*, vol. 21, n.º 3, pp. 197-202, sep. 2023, doi: 10.1016/j.cjpre.2023.09.009.
- [18] M. Zanon-Zotin, L. B. Baptista, R. Draeger, P. R. R. Rochedo, A. Szklo, y R. Schaeffer, «Unaddressed non-energy use in the chemical industry can undermine fossil fuels phase-out», *Nat. Commun.*, vol. 15, n.º 1, p. 8050, sep. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-52434-y.
- [19] N. Rinke Dias de Souza *et al.*, «Challenges and opportunities toward a sustainable bio-based chemical sector in Europe», *WIREs Energy Environ.*, vol. 13, n.º 4, p. e534, 2024, doi: 10.1002/wene.534.
- [20] S. Thompson, C. King, J. Rodwell, S. Rayburg, y M. Neave, «Life Cycle Cost and Assessment of Alternative Railway Sleeper Materials», *Sustainability*, vol. 14, n.º 14, Art. n.º 14, ene. 2022, doi: 10.3390/su14148814.
- [21] Á. Pérez-García, T. H. M. van Emmerik, A. Mata, P. F. Tasseron, y J. F. López, «Efficient plastic detection in coastal areas with selected spectral bands», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 207, p. 116914, oct. 2024, doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116914.
- [22] A. Pacheco-López, F. Lechtenberg, A. Somoza-Tornos, M. Graells, y A. Espuña, «Economic and Environmental Assessment of Plastic Waste Pyrolysis Products and Biofuels as Substitutes for Fossil-Based Fuels», *Front. Energy Res.*, vol. 9, jun. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.676233.
- [23] I. Oluwoye, Z. Zeng, S. Mosallanejad, M. Altarawneh, J. Gore, y B. Z. Dlugogorski, «Controlling NOx emission from boilers using waste polyethylene as reburning fuel», *Chem. Eng. J.*, vol. 411, p. 128427, may 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.128427.
- [24] N. Belsare y S. Nandi, «Sustainable polyurethane foam formulation with bio-polyol blends for automotive seating applications», *Ind. Crops Prod.*, vol. 226, p. 120672, abr. 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.120672.
- [25] W. H. Abuwatfa, D. Al-Muqbel, A. Al-Othman, N. Halalshah, y M. Tawalbeh, «Insights into the removal of microplastics from water using biochar in the era of COVID-19: A mini review», *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 4, p. 100151, dic. 2021, doi: 10.1016/j.csee.2021.100151.
- [26] S. Tang, L. Lin, X. Wang, X. Sun, y A. Yu, «Adsorption of fulvic acid onto polyamide 6 microplastics: Influencing factors, kinetics modeling, site energy distribution and interaction mechanisms», *Chemosphere*, vol. 272, p. 129638, jun. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129638.
- [27] M. S. Cumpston, J. E. McKenzie, J. Thomas, y S. E. Brennan, «The use of 'PICO for synthesis' and methods for synthesis without meta-analysis: protocol for a survey of current practice in systematic reviews of health interventions», *F1000Research*, vol. 9, p. 678, ene. 2021, doi: 10.12688/f1000research.24469.2.
- [28] European Parliament and Council, «Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment». Accedido: 24 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj/eng>
- [29] United Nations Environment Programme, «Amendments to Annexes II, VIII and IX to the Basel Convention (Decision UNEP/CHW.14/12)», Basel Convention, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.informea.org/en/decision/amendments-annexes-ii-viii-and-ix-basel-convention-advance>
- [30] UNEP, «Informe del Comité Intergubernamental de Negociación para desarrollar un instrumento jurídicamente vinculante sobre la contaminación por plásticos». marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/events/conference/inter-governmental-negotiating-committee-meeting-inc-1>
- [31] United Nations Environment Programme, «Historic day in the campaign to beat plastic pollution: Nations commit to develop a legally binding agreement». Accedido: 24 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/historic-day-campaign-beat-plastic-pollution-nations-commit-develop>
- [32] M. Baranowski, Z. Shao, A. Spintzyk, F. Kößler, y J. Fleischer, «Simulation-Based Identification of Operating Point Range for a Novel Laser-Sintering Machine for Additive Manufacturing of Continuous Carbon-Fibre-Reinforced Polymer Parts», *Polymers*, vol. 15, n.º 19, Art. n.º 19, ene. 2023, doi: 10.3390/polym15193975.
- [33] I. Cañete Vela, T. Berdugo Vilches, G. Berndes, F. Johnsson, y H. Thunman, «Co-recycling of natural and synthetic carbon materials for a sustainable circular economy», *J. Clean. Prod.*, vol. 365, p. 132674, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132674.
- [34] C. Stone, F. M. Windsor, M. Munday, y I. Durance, «Natural or synthetic – how global trends in textile usage threaten freshwater environments», *Sci. Total Environ.*, vol. 718, p. 134689, may 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134689.
- [35] N. S. Mokgalaka-Fleischmann *et al.*, «Microplastic occurrence and fate in the South African environment: a review», *Environ. Syst. Res.*, vol. 13, n.º 1, p. 59, dic. 2024, doi: 10.1186/s40068-024-00389-w.
- [36] A. L. Patrício Silva, J. C. Prata, A. C. Duarte, D. Barceló, y T. Rocha-Santos, «An urgent call to think globally and act locally on landfill disposable plastics under and after covid-19 pandemic: Pollution prevention and technological (Bio) remediation solutions», *Chem. Eng. J.*, vol. 426, p. 131201, dic. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.131201.
- [37] N. Wrońska, N. Katir, M. Nowak-Lange, A. El Kadib, y K. Lisowska, «Biodegradable Chitosan-Based Films as an Alternative to Plastic Packaging», *Foods*, vol. 12, n.º 18, Art. n.º 18, ene. 2023, doi: 10.3390/foods12183519.
- [38] F. T. Jahromi *et al.*, «Additive manufacturing of polypropylene micro and nano composites through fused filament fabrication for automotive repair applications», *Polym. Adv. Technol.*, vol. 34, n.º 3, pp. 1059-1074, 2023, doi: 10.1002/pat.5952.
- [39] R. Poddar, D. Bose, N. Nambiar, y S. Poddar, «Bioplastics from Kitchen Wastes: A Developing Green Technology», *Pak. J. Anal. Environ. Chem.*, vol. 24, pp. 1-12, jun. 2023, doi: 10.21743/pjaec/2023.06.01.
- [40] J. Regin *et al.*, «Effective Utilization of Bio and Industry Wastes to Produce Thermal Insulation Concrete: A Novel Solution for Energy-Saving Buildings». Accedido: 13 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://neptjournal.com/upload-images/\(26\)D-1537.pdf](https://neptjournal.com/upload-images/(26)D-1537.pdf)
- [41] C. Zhao, B. Wang, M. Saidula, Y. Gong, y M. Alharithi, «Digitally-Enabled Carbon Reduction in Plastics Supply Chain Based on Literature Review Method», *Sustainability*, vol. 17, n.º 6, Art. n.º 6, ene. 2025, doi: 10.3390/su17062472.
- [42] B. Girginer Ozunlu y F. S. Guner, «An Industrial Case for Polypropylene Nanocomposite Foams: Lightweight, Soundproof Exterior Automotive Parts», *Polymers*, vol. 14, n.º 6, Art. n.º 6, ene. 2022, doi: 10.3390/polym14061192.
- [43] Z. Li, M. Åhman, L. J. Nilsson, y F. Bauer, «Towards carbon neutrality: Transition pathways for the Chinese ethylene industry», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 199, p. 114540, jul. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114540.
- [44] E. Pawelczyk, I. Wysocka, T. Dymerski, y J. Gebicki, «Catalytic activity of Ni-MgAl₂O₄ modified with transition metal (Ti, Mo, W) carbides as potential catalysts for resource recovery via dry reforming of waste plastics», *Catal. Today*, vol. 427, p. 114414, feb. 2024, doi: 10.1016/j.cattod.2023.114414.
- [45] A. E. Schwarz, T. N. Ligthart, D. Godoi Bizarro, P. De Wild, B. Vreugdenhil, y T. van Harmelen, «Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach», *Waste Manag.*, vol. 121, pp. 331-342, feb. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.12.020.
- [46] R. Khayyam Nekouei, S. Maroufi, M. Assefi, F. Pahlevani, y V. Sahajwalla, «Thermal Isolation of a Clean Alloy from Waste Slag and Polymeric Residue of Electronic Waste», *Processes*, vol. 8, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2020, doi: 10.3390/pr8010053.
- [47] B. Wei, L. Li, S. Ding, N. Chen, S. Bai, y S. Yang, «Solid-State Shear Milling for Recycling Aluminum-Plastic Packaging Waste: A

- Sustainable Solution for Mixed Plastic Waste», *Sustainability*, vol. 15, n.º 7, Art. n.º 7, ene. 2023, doi: 10.3390/su15076144.
- [48] M. Feenstra, S. Talwar, y S. Teske, «A Paris aligned 1.5 °C mitigation pathway for the chemical industry based on 100% renewable energy and novel production technologies», *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, n.º 11, p. 596, nov. 2024, doi: 10.1007/s42452-024-06308-z.
- [49] M. T. Sturm, E. Myers, D. Schober, A. Korzin, y K. Schuhen, «Beyond Microplastics: Implementation of a Two-Stage Removal Process for Microplastics and Chemical Oxygen Demand in Industrial Wastewater Streams», *Water*, vol. 16, n.º 2, Art. n.º 2, ene. 2024, doi: 10.3390/w16020268.
- [50] C. Suescun Gonzalez, F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, C. Nouvel, y J. M. Pearce, «Multi-material distributed recycling via material extrusion: recycled high density polyethylene and poly (ethylene terephthalate) mixture», *Polym. Eng. Sci.*, vol. 64, n.º 4, pp. 1555-1570, 2024, doi: 10.1002/pen.26643.
- [51] M. Tamoor, N. A. Samak, y J. Xing, «Life cycle assessment and policy for the improvement of net-zero emissions in China», *Clean. Eng. Technol.*, vol. 15, p. 100663, ago. 2023, doi: 10.1016/j.clet.2023.100663.
- [52] I. Bardarov *et al.*, «Flash graphene from carbon fiber composites: A sustainable and high-performance electrocatalyst for hydrogen peroxide production», *Electrochimica Acta*, vol. 517, p. 145754, mar. 2025, doi: 10.1016/j.electacta.2025.145754.
- [53] R. Hossain *et al.*, «Plastic Waste Management in India: Challenges, Opportunities, and Roadmap for Circular Economy», *SUSTAINABILITY*, vol. 14, n.º 8, p. 4425, abr. 2022, doi: 10.3390/su14084425.
- [54] T. Almeida *et al.*, «Biobased ternary films of thermoplastic starch, bacterial nanocellulose and gallic acid for active food packaging», *Food Hydrocoll.*, vol. 144, p. 108934, nov. 2023, doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108934.
- [55] V. Costantini, M. D'Angeli, M. Mancini, C. Martini, y E. Paglialunga, «An Econometric Analysis of the Energy-Saving Performance of the Italian Plastic Manufacturing Sector», *Energies*, vol. 17, n.º 4, Art. n.º 4, ene. 2024, doi: 10.3390/en17040811.
- [56] A. Duda, A. Fenicki, P. Molski, E. Szostak, y P. Duda, «Design and Operation of a Modern Polish Plant for Plastic Waste Recycling through the Degradative Depolymerization Process. A Case Study», *Energies*, vol. 13, n.º 24, Art. n.º 24, ene. 2020, doi: 10.3390/en13246620.
- [57] Y. Zhang y Z. Wen, «Mapping the environmental impacts and policy effectiveness of takeaway food industry in China», *Sci. Total Environ.*, vol. 808, p. 152023, feb. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152023.
- [58] I. Oluwoye, Z. Zeng, S. Mosallanejad, M. Altarawneh, J. Gore, y B. Z. Dlugogorski, «Controlling NOx emission from boilers using waste polyethylene as reburning fuel», *Chem. Eng. J.*, vol. 411, p. 128427, may 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.128427.
- [59] C. Skinner *et al.*, «Life cycle assessment of pulp-moulded and thermoformed oil palm fibre-based food tray», *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, n.º 12, p. 632, nov. 2024, doi: 10.1007/s42452-024-06335-w.
- [60] R. Hossain, A. Ghose, y V. Sahajwalla, «Circular economy of the materials in the healthcare industry: Opportunities and challenges», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 215, p. 108041, abr. 2025, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.108041.
- [61] W. Sha, «Literature review on waste management of online food delivery industry in China», *Chin. J. Popul. Resour. Environ.*, vol. 21, n.º 3, pp. 197-202, sep. 2023, doi: 10.1016/j.cjpre.2023.09.009.
- [62] M. Bergmann, S. Allen, T. Krumpfen, y D. Allen, «High Levels of Microplastics in the Arctic Sea Ice Alga *Melosira arctica*, a Vector to Ice-Associated and Benthic Food Webs», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, n.º 17, pp. 6799-6807, abr. 2023, doi: 10.1021/acs.est.2c08010.
- [63] T. F. Khan y A. H. F. Sikder, «Microplastic Can Decrease Enzyme Activities and Microbes in Soil», *Open J. Soil Sci.*, vol. 14, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2024, doi: 10.4236/ojss.2024.141001.
- [64] B. Yang, P. Li, W. Entemake, Z. Guo, y S. Xue, «Concentration-Dependent Impacts of Microplastics on Soil Nematode Community in Bulk Soils of Maize: Evidence From a Pot Experiment», *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, jun. 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.872898.
- [65] S. Chang *et al.*, «Microplastics alter soil carbon cycling: Effects on carbon storage, CO2 and CH4 emission and microbial community», *Camb. Prisms Plast.*, vol. 2, p. e5, ene. 2024, doi: 10.1017/plc.2024.5.
- [66] D.-A. Koumpakis, C. Vlachokostas, A. Tsakirakis, y S. Petridis, «Evaluating Plastic Waste Management Strategies: Logistic Regression Insights on Pyrolysis vs. Recycling», *Recycling*, vol. 10, n.º 2, Art. n.º 2, abr. 2025, doi: 10.3390/recycling10020033.
- [67] S. Vijayshanthi *et al.*, «Performance of polyvinyl alcohol graphene oxide membrane for microplastic removal in wastewater with an IoT based monitoring approach», *Sci. Rep.*, vol. 15, n.º 1, p. 20774, jul. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-06072-z.
- [68] M. A. Akram, R. Savitha, G. K. Kinsella, K. Nolan, B. J. Ryan, y G. T. Henahan, «Microbial and Enzymatic Biodegradation of Plastic Waste for a Circular Economy», *Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 24, Art. n.º 24, ene. 2024, doi: 10.3390/app14241942.
- [69] A. Vlasopoulos, J. Malinauskaitė, A. Žabnieńska-Góra, y H. Jouhara, «Life cycle assessment of plastic waste and energy recovery», *Energy*, vol. 277, p. 127576, ago. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127576.
- [70] J. F. Highmoore, L. S. Kariyawasam, S. R. Trenor, y Y. Yang, «Design of depolymerizable polymers toward a circular economy», *Green Chem.*, vol. 26, n.º 5, pp. 2384-2420, mar. 2024, doi: 10.1039/D3GC04215D.
- [71] R. C. Ciobanu, C. Schreiner, A. R. Caramitu, S. Aradoaei, y M. Aradoaei, «Sustainability of the Technology for Obtaining Thermoplastic Building Materials from Non-Recyclable Mixed Plastic-Paper Packaging Waste», *Sustainability*, vol. 16, n.º 8, Art. n.º 8, ene. 2024, doi: 10.3390/su16083430.
- [72] X. Jiang y B. Bateer, «A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation», *Waste Manag. Res. J. Int. Solid Wastes Public Clean. Assoc. ISWA*, p. 734242X241310658, ene. 2025, doi: 10.1177/0734242X241310658.
- [73] C. Stallkamp, M. Hennig, R. Volk, D. Stapf, y F. Schultmann, «Pyrolysis of mixed engineering plastics: Economic challenges for automotive plastic waste», *Waste Manag.*, vol. 176, pp. 105-116, mar. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.01.035.
- [74] L. M. Cafiero, D. De Angelis, L. Tuccinardi, y R. Tuffi, «Current State of Chemical Recycling of Plastic Waste: A Focus on the Italian Experience», *Sustainability*, vol. 17, n.º 3, Art. n.º 3, ene. 2025, doi: 10.3390/su17031293.
- [75] A. Fivga y I. Dimitriou, «Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment», *Energy*, vol. 149, pp. 865-874, abr. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.094.
- [76] J. Sarsour, B. Ewert, B. Janisch, T. Stegmaier, y G. T. Gresser, «Efficient Filtration Systems for Microplastic Elimination in Wastewater», *Microplastics*, vol. 4, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2025, doi: 10.3390/microplastics4030036.
- [77] F. De Falco, E. Di Pace, M. Cocca, y M. Avella, «The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution», *Sci. Rep.*, vol. 9, n.º 1, p. 6633, abr. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-43023-x.
- [78] A. Lamtai, S. Elkoun, M. Robert, F. Mighri, y C. Diez, «Mechanical Recycling of Thermoplastics: A Review of Key Issues», *Waste*, vol. 1, n.º 4, Art. n.º 4, dic. 2023, doi: 10.3390/waste1040050.