



**Herramienta de Diagnóstico Multicriterio para la Transición de Plásticos de un
Solo Uso a Materiales Sostenibles en el Sector de Empaques y Envases de la Industria
del Plástico en Colombia**

Jorge Eliécer Del Valle Tapia

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Procesos

Bogotá D.C, Colombia

06/07/2026

**Herramienta de Diagnóstico Multicriterio para la Transición de Plásticos de un
Solo Uso a Materiales Sostenibles en el Sector de Empaques y Envases de la Industria
del Plástico en Colombia**

Jorge Eliécer Del Valle Tapia

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magíster en Ingeniería de Procesos

Directora:

Luisa Fernanda Carvajal Díaz

Modalidad:

Monografía

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Procesos

Bogotá D.C, Colombia

06/07/2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C, 06/07/2026

A mis hijos: Danna Sofía, Jorge Eduardo,
Lucas David y Matías, mi vida y en
quienes encuentro una razón para buscar
nuevos propósitos.

A mis padres, Jorge y Rosmira por
mostrarme el significado de lo que es la
familia y afrontar las adversidades.

A Mileidy, el amor de mi vida, gracias por
apoyarme, animarme y acompañarme de
manera incondicional a cumplir mis metas.

Agradecimientos

Al profesor Omar Alonso Patiño, de la Facultad de Administración, Finanzas y Ciencias Económicas de la Universidad EAN, por poner al servicio de este trabajo su experiencia, conocimiento y tiempo. Su guía, compromiso y disposición fueron esenciales para construir y fortalecer esta tesis de maestría, dejando una huella significativa en este proceso académico y personal.

Al Compromiso Empresarial para la Economía Circular (Cempre), que, a través de su directora ejecutiva, Laura Reyes y la jefe de comunicación, Diana Carolina Mora brindaron información sectorial de relevancia para el desarrollo del trabajo.

Resumen

La contaminación por plásticos de un solo uso (PSU) representa uno de los desafíos ambientales más urgentes a escala global. En Colombia, la Ley 2232 de 2022 y la Resolución 803 de 2024 establecen un calendario de prohibición progresiva de PSU, generando una presión de transición sobre las empresas de la cadena productiva del plástico: materias primas, producto intermedio y producto terminado, dentro de la cual se ubica el sector de empaques y envases. Sin embargo, los instrumentos de planificación existentes no especifican las condiciones técnicas y operativas bajo las cuales esas metas regulatorias resultan alcanzables. Esta investigación desarrolla una herramienta de diagnóstico multicriterio para orientar la transición de PSU a materiales sostenibles en el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana. Mediante un enfoque documental de alcance descriptivo, se construyeron trece criterios en cuatro categorías: técnico - ambiental, económica, regulatoria y operativa, estructurados a través del análisis MICMAC y organizados en tres capas siguiendo la arquitectura del Technology Roadmapping (TRM) y el Multi - Level Perspective (MLP). Los resultados evidencian condiciones heterogéneas de adaptación en el sector, con brechas significativas en infraestructura de fin de vida, capital humano especializado y competitividad de precios de los materiales sostenibles. Se concluye que la integración estructurada de las cuatro categorías de criterios permite desarrollar un instrumento diagnóstico pertinente y factible para orientar la transición sectorial.

Palabras clave: Plásticos de un Solo Uso, Materiales Sostenibles, Diagnóstico Multicriterio, Transición Sostenible, Empaques y Envases, MICMAC, Perspectiva Multinivel, Planificación Tecnológica.

Abstract

Single-use plastic (SUP) pollution represents one of the most urgent environmental challenges globally. In Colombia, Law 2232 of 2022 and Resolution 803 of 2024 established a timetable for the progressive prohibition of SUPs, generating transition pressure on companies throughout the plastics production chain: raw materials, intermediate products, and finished products, including the packaging sector. However, existing planning instruments do not specify the technical and operational conditions under which these regulatory goals can be achieved. This research develops a multi-criteria diagnostic tool to guide the transition from SUPs to sustainable materials in the packaging sector of the Colombian plastics industry. Using a descriptive, documentary approach, thirteen criteria were constructed in four categories: technical-environmental, economic, regulatory, and operational. These criteria were structured through MICMAC analysis and organized into three layers following the Technology Roadmapping (TRM) and Multi-Level Perspective (MLP) architectures. The results reveal heterogeneous adaptation conditions in the sector, with significant gaps in end-of-life infrastructure, specialized human capital, and price competitiveness of sustainable materials. It is concluded that the structured integration of the four criteria categories allows for the development of a relevant and feasible diagnostic tool to guide the sector's transition.

Keywords: Single-Use Plastics, Sustainable Materials, Multi-criteria Diagnosis, Sustainable Transition, Packaging, MICMAC, Multi – Level Perspective, Technology Roadmapping.

Contenido

Lista de Figuras.....	10
Lista de Tablas	11
Introducción.....	13
Objetivos.....	17
<i>Objetivo General.....</i>	<i>17</i>
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>17</i>
Justificación	18
Marco Teórico.....	20
<i>Fundamentos Conceptuales</i>	<i>20</i>
<i>Concepto.....</i>	<i>21</i>
<i>Clasificación de los Plásticos</i>	<i>22</i>
<i>Plásticos de un Solo Uso (PSU).....</i>	<i>28</i>
<i>Razones del Uso Industrial de los Plásticos de un Solo Uso.....</i>	<i>29</i>
<i>Propiedades de los Principales Plásticos de un Solo Uso.....</i>	<i>30</i>
<i>Impactos Ambientales de los Plásticos de un Solo Uso.....</i>	<i>35</i>
<i>Microplásticos</i>	<i>36</i>
<i>Impacto Marino.....</i>	<i>38</i>
<i>Impacto Terrestre</i>	<i>39</i>
<i>Impacto en la Salud Humana.....</i>	<i>40</i>

<i>Terminología para Materiales Sostenibles</i>	43
<i>Según el Origen de la Materia Prima</i>	45
<i>Según el Comportamiento al Final de Vida</i>	46
<i>Según la Estrategia de Sostenibilidad para los Plásticos</i>	48
<i>Alternativas de Materiales Sostenibles para Aplicaciones de Un Solo Uso</i>	51
<i>Evaluación Ambiental para Plásticos de un Solo Uso</i>	56
<i>Análisis de Ciclo de Vida</i>	56
<i>Normas y Estándares de Compostabilidad</i>	57
<i>Economía Circular y Plásticos de un Solo Uso</i>	58
<i>Marco Normativo Sobre Plásticos de un Solo Uso en Colombia</i>	60
<i>Marco Normativo Internacional Sobre Plásticos de un Solo Uso</i>	65
<i>Análisis Bibliométrico</i>	65
<i>Principales Estrategias Internacionales</i>	77
<i>Retos y Brechas Normativas para Colombia</i>	86
<i>Transiciones Sociotécnicas y Perspectiva Multinivel</i>	88
<i>Technology Roadmapping</i>	91
Hipótesis	93
Categorías de Análisis	94
Metodología	96
<i>Enfoque y Alcance de la Investigación</i>	96
<i>Muestra</i>	97
<i>Instrumentos</i>	98

HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO MULTICRITERIO PARA LA TRANSICIÓN DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO A MATERIALES SOSTENIBLES EN EL SECTOR DE EMPAQUES Y ENVASES DE LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO EN COLOMBIA	10
<i>Técnicas para el Análisis de Información</i>	98
Trabajo de Campo	101
<i>Diagnóstico General del Sector</i>	101
<i>Tamaño del Sector</i>	104
<i>Capacidad Productiva del Sector</i>	109
<i>Diagnóstico Técnico - Ambiental</i>	111
<i>Nivel de Madurez Tecnológica</i>	111
<i>Comparativo de Huella de Carbono</i>	115
<i>Síntesis de impactos ambientales reportados en estudios de ACV</i>	117
<i>Síntesis de los escenarios de fin de vida reportados en estudios de ACV</i>	119
<i>Cobertura Territorial Nacional</i>	120
<i>Diagnóstico Económico</i>	127
<i>Capacidad Económica</i>	127
<i>Tendencia de la Demanda de PSU y Materiales Sostenibles</i>	129
<i>Diferencial de Precios entre Materiales Sostenibles y PSU Convencionales</i>	134
<i>Costos de Adaptación para la Transición Empresarial</i>	135
<i>Diagnóstico Regulatorio</i>	137
<i>Instrumentos Legales, Fiscales y de Política Pública con Incidencia en la Transición</i>	137
<i>Vacíos Regulatorios</i>	138
<i>Diagnóstico Operativo</i>	141
<i>Estructura Empresarial y Capacidad de Adopción</i>	141
<i>Capital Humano y Brechas de Formación</i>	141
<i>Capacidad de I+D+i y Cadena de Suministro</i>	142

HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO MULTICRITERIO PARA LA TRANSICIÓN DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO A MATERIALES SOSTENIBLES EN EL SECTOR DE EMPAQUES Y ENVASES DE LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO EN COLOMBIA	11
<i>Análisis de Resultados</i>	144
<i>Criterios Técnico - Ambiental</i>	144
<i>Criterios Económicos</i>	149
<i>Criterios Regulatorios</i>	152
<i>Criterios Operativos</i>	155
<i>Interacción de Criterios</i>	158
<i>Propuesta de Solución a la Problemática</i>	162
<i>Capas TRM de la Herramienta Diagnóstico</i>	162
<i>Fases de la Herramienta Diagnóstico</i>	163
 Discusión	 167
 Conclusiones.....	 169
 Trabajo Futuro	 171
 Referencias.....	 172

Lista de Figuras

Figura 1	Representación del proceso de polimerización	21
Figura 2	Clasificación tradicional de los polímeros.....	22
Figura 3	Evolución norma ISO 1043	24
Figura 4	Ejemplo designación material plástico ISO 1043	25
Figura 5	Códigos de Identificación de Resinas según SPI	26
Figura 6	PIB vs Generación de residuos entre 2010 y 2020	35
Figura 7	Producción mundial de plásticos 2024.....	36
Figura 8	Tamaños comúnmente aceptados para clasificar los MP	37
Figura 9	Ejemplo análisis FTIR de algunos MP	38
Figura 10	Efectos de los MP en la salud humana	41
Figura 11	MP presentes en los análisis	42
Figura 12	Propuesta de clasificación terminológica para materiales sostenibles	44
Figura 13	Resultados de las ecuaciones de búsqueda en Scopus	67
Figura 14	Documentos por año - Global	68
Figura 15	Documentos por área temática – Global.....	69
Figura 16	Documentos por país - Global	70
Figura 17	Red de coautorías por países – Global.....	72
Figura 18	Coocurrencias de palabras claves - Global.....	73
Figura 19	Documentos por año - América Latina.....	74
Figura 20	Documentos por área - América Latina.....	75
Figura 21	Documentos por país - América Latina	76
Figura 22	Red de coautorías por países	76

Figura 23 Aplicación de la Perspectiva Multinivel al caso colombiano de transición de PSU	90
Figura 24 Organización jerárquica de los códigos CIIU	102
Figura 25 Consumo aparente de resinas plásticas en Colombia, 2024	110
Figura 26 Distribución geográfica de la infraestructura de reciclaje de plásticos en Colombia	124
Figura 27 Tendencia de importaciones colombianas de plásticos en valor y volumen 2009 - 2024	130
Figura 28 Balanza comercial de plásticos en Colombia	131
Figura 29 Plano Motricidad - Dependencia	160
Figura 30 Estructura de la herramienta de diagnóstico multicriterio propuesta	166

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Identificación RIC según ASTM D7611M-21</i>	27
Tabla 2 <i>Principales PSU de origen petroquímico</i>	32
Tabla 3 <i>Consolidación terminología asociada a materiales sostenibles: implicaciones y limitaciones conceptuales</i>	50
Tabla 4 <i>Alternativas de materiales sostenibles para aplicaciones de un solo uso</i>	52
Tabla 5 <i>Resumen normativo acerca de los plásticos en Colombia</i>	61
Tabla 6 <i>Principales estrategias sobre PSU - Nivel global</i>	80
Tabla 7 <i>Principales estrategias latinoamericanas</i>	84
Tabla 8 <i>Categorías identificadas</i>	95
Tabla 9 <i>Alineación de objetivos específicos con actividades y resultados esperados</i>	97
Tabla 10 <i>Identificación CIIU pertinente a la investigación</i>	103
Tabla 11 <i>Tamaño empresa según UVT manufactura</i>	105
Tabla 12 <i>Establecimientos, personal ocupado y producción bruta de las clases CIIU 2013, 2221 y 2229 frente al total manufacturero nacional, 2022 - 2024</i>	106
Tabla 13 <i>Distribución de empresas de las clases CIIU 2013, 2221 y 2229 por tamaño empresarial según Decreto 957 de 2019, año 2024</i>	108
Tabla 14 <i>Niveles de madurez tecnológicas - TRL</i>	112
Tabla 15 <i>TRL para PSU y materiales sostenibles</i>	113
Tabla 16 <i>Valores de referencia de GWP para PSU y alternativas sostenibles</i>	115
Tabla 17 <i>Matriz de impacto GWP</i>	116
Tabla 18 <i>Síntesis de categorías de impacto ambiental reportadas en estudios de ACV</i>	118
Tabla 19 <i>Síntesis del desempeño ambiental por escenario de fin de vida reportado en estudios de ACV</i>	119

Tabla 20 Distribución departamental de toneladas aprovechadas y familias de materiales reportadas.....	122
Tabla 21 Infraestructura de procesos de aprovechamiento alternativos	126
Tabla 22 Capacidad económica de la cadena de plásticos por clase CIIU, 2022 - 2024	128
Tabla 23 Proyección del mercado de bioplástico para Colombia 2022 - 2032.....	132
Tabla 24 Ecosistema empresarial de materiales sostenibles en Colombia.....	133
Tabla 25 Precios de referencia PSU según Acoplásticos 2025	134
Tabla 26 Diferencial de precios entre PSU de referencias y alternativas sostenibles	135
Tabla 27 Regulación pertinente para la transición de PSU a alternativas sostenibles	138
Tabla 28 Índice de carga ambiental para los estudios analizados	145
Tabla 29 Índice de flexibilidad de gestión ambiental al fin de vida por material sostenible .	147
Tabla 30 Criterios Técnico - Ambiental.....	148
Tabla 31 Criterios económicos	151
Tabla 32 Criterios regulatorios	154
Tabla 33 Criterios operativos	157
Tabla 34 Matriz de influencias directas - MID.....	159

Introducción

La ingeniería de procesos ha asumido un papel central en la búsqueda de soluciones sostenibles a los desafíos ambientales y productivos que enfrenta la sociedad moderna. Uno de los problemas críticos corresponde al uso desmedido de los denominados “Plásticos de un Solo Uso” (PSU), cuya producción y disposición final generan graves afectaciones a los ecosistemas terrestres, marinos y a la salud humana (Dzierżyński et al., 2024; Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2022).

El desarrollo tecnológico, el crecimiento poblacional, el bajo costo y el fácil acceso intensifican la problemática ambiental y la preferencia por los PSU (Mena et al., 2025; Méndez, 2023).

El resultado es una producción mundial acumulada, que para el año 2021 estuvo en 390,7 millones de toneladas de residuos plásticos, que evidencian la magnitud del problema ambiental, donde el 90,2% corresponden a plásticos de origen del petróleo, el 8,3% de reciclado y solo el 1,5% de origen sostenible (Plastics Europe, 2022). Un ejemplo claro, de cómo eventos específicos puede agravar esta situación, es que solo la pandemia por COVID-19, desde su inicio a finales de 2019 hasta mediados del 2022, adicionó 8.4 millones de toneladas de PSU (Peng et al., 2021).

Colombia, con un consumo anual de 1.341.000 toneladas de plástico, no puede estar al margen de esta problemática, ya que 737.550 toneladas corresponden a aplicaciones de PSU en empaques y envases. De lo anterior, 23.193 toneladas retornan como reciclado, pero el resto termina en rellenos sanitarios (Compromiso Empresarial para la Economía Circular [Cempre], 2024).

Teniendo claro el contexto de la situación, la presente investigación se enmarca en la línea de gestión y diseño de procesos y cadenas de suministro sostenibles de la Maestría en Ingeniería de Procesos, enfocándose en el desarrollo de una herramienta de diagnóstico

multicriterio para orientar la transición de PSU hacia materiales sostenibles en el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana. Para efectos de esta investigación, la transición se entiende como un proceso de sustitución progresiva o rediseño de materiales de origen petroquímico por alternativas sostenibles, evaluadas según criterios técnico-ambientales, económicos, regulatorios y operativos en el contexto nacional.

La industria del plástico en Colombia, según Garzón y Gil (2023), posee el potencial para el desarrollo de productos con base en materiales sostenibles, porque una fuente importante para la fabricación de estos, es la proveniente del almidón que se puede obtener a partir del aprovechamiento de los residuos del sector agrícola, en el cual Colombia se caracteriza por su riqueza.

Sin embargo, se presentan dificultades como, por ejemplo, la insuficiente inversión en Investigación y Desarrollo (I+D), que para el sector agropecuario, dada su importancia como fuente potencial de materia prima para alternativas sostenibles, en 2024 solo estuvo en el 0.21% del PIB (Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES], 2025).

Adicionalmente, las empresas de la industria del plástico que optan por materiales sostenibles en sus procesos productivos, representan menos del 2%, una cifra que limita el avance hacia un modelo circular y mantiene la dependencia de PSU. La situación se complica, por las dificultades que tienen las empresas para la capacitación de personal e implementar programas de sensibilización ambiental y gestionar procesos de economía circular que promuevan alternativas sostenibles para los PSU (Acoplásticos, 2024b; Gaviria, 2023).

Otro obstáculo que frena el avance de Colombia, tiene que ver con el marco legal: el impacto de la Ley 2232 de 2022, por la cual establece las medidas de reducción gradual de la producción y consumo de PSU, han generado afectaciones como el aumento de los costos de operación hasta un 30%, lo cual se ve reflejado en ajustes de precios o disminución de ganancias para las empresas. Adicionalmente, existe desconocimiento por parte de los

consumidores, lo que puede generar resistencia durante la implementación en el comercio e incluso en los hogares, debido a la falta de promoción y divulgación de la Ley 2232 (Leyton et al., 2024).

Asimismo, en los artículos 50 - 53 de la Ley 2277 de 2022 fue creado el impuesto nacional sobre los PSU utilizados para envasar, embalar o empacar bienes, no se tiene claridad y presenta contradicciones en cuanto a quién debe cobrar el impuesto, si el fabricante o el importador (Acoplásticos, 2023).

Para Rangel y Gracia (2024), la brecha entre la normativa y el sector productivo colombiano, se da porque la solución a la contaminación plástica no puede abordarse únicamente a través de medidas regulatorias: el país requiere de manera paralela investigación aplicada en materiales, tecnología y herramientas técnico-estratégicas que conviertan esas regulaciones en oportunidades para tomar decisiones que permitan reformar el sector productivo.

Es por eso, que la respuesta a esa brecha requiere instrumentos que traduzcan las exigencias normativas en criterios evaluables por la empresa, permitiéndole determinar su nivel de preparación para la transición antes de comprometer recursos.

Con base en lo anterior, la pregunta que orienta este estudio es:

¿Cuáles son los criterios y cómo se articulan para desarrollar un diagnóstico que oriente la transición de los Plásticos de un Solo Uso a materiales sostenibles en el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana?

Para dar respuesta a la pregunta de investigación, la presente monografía se estructura en las siguientes etapas: primero, la fundamentación teórica que permite obtener un panorama general de la situación actual. En segundo lugar, se describirán los elementos metodológicos e instrumentos empleados. La tercera etapa corresponde al trabajo de campo, que comprende el procesamiento de la información, el análisis de los resultados y la formulación de una

propuesta de solución a la problemática. Para concluir, se desarrollarán las discusiones, conclusiones y se plantearán las perspectivas de trabajo futuro.

Al final, la presente investigación propondrá una herramienta de diagnóstico multicriterio estructurada en las categorías técnico-ambientales, económicas, regulatorias y operativas, para orientar la transición de PSU a materiales sostenibles en el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana, lo que constituye el aporte diferencial de la investigación y su contribución a la producción científica nacional sobre PSU.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una herramienta de diagnóstico multicriterio para orientar la transición de los plásticos de un solo uso a materiales sostenibles en el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana.

Objetivos Específicos

Analizar el estado del arte y el marco normativo, tanto nacional como internacional aplicable a la transición de los plásticos de un solo uso en el sector de empaques y envases.

Caracterizar las aplicaciones, barreras y capacidades del contexto colombiano para la sustitución o el rediseño de plásticos de un solo uso en el sector de empaques y envases.

Construir los criterios técnico-ambientales, económicos, regulatorios y operativos que estructuran la herramienta de diagnóstico multicriterio.

Justificación

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada por los países miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015, establece los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como marco de referencia global para la sostenibilidad (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], s.f.). Pero Naciones Unidas (2023), advierte que el seguimiento a las políticas sostenibles disminuye precisamente en el ODS 12 de Producción y Consumo Responsables, que es el más directamente vinculado con la problemática de los PSU.

En Colombia, los esfuerzos en ese marco están respaldados por la Ley 2232 de 2022, cuyo objetivo es que el 100% de los PSU sean reutilizables, compostables o reciclables para 2030 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Ambiente], 2024). Sin embargo, según Quiceno et al. (2023), las empresas colombianas enfrentan dificultades estructurales derivadas de la insuficiente consolidación de estrategias orientadas al desarrollo tecnológico e innovación, lo que limita su capacidad real para responder a esas exigencias normativas.

Esta monografía realiza un aporte en tres aspectos complementarios: el aporte académico, establece una estructura de criterios técnico-ambientales, económicos, regulatorios y operativos para comparar alternativas sostenibles, generando así un marco de referencia para que futuras investigaciones puedan aplicarlo, replicarlo o ampliarlo a otros sectores industriales del país.

Desde el punto de vista sectorial, orienta la toma de decisiones de las empresas del sector de empaques y envases sobre qué materiales sostenibles pueden sustituir o rediseñar sus aplicaciones de un solo uso y bajo qué condiciones técnico-ambientales, económicas, regulatorias y operativas es posible hacerlo.

Finalmente, en el plano de la política pública, traduce los mandatos de la Ley 2232 de 2022 y su reglamentación en un instrumento aplicable a la reconversión productiva,

contribuyendo a cerrar la brecha entre la ambición normativa del Estado colombiano y la capacidad real del sector productivo para cumplir las metas establecidas.

Los tres aportes descritos convergen en una herramienta de diagnóstico multicriterio que integra simultáneamente las categorías técnico-ambientales, económicas, regulatorias y operativas de la transición, respondiendo a una necesidad documentada del sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana. Esta integración constituye la contribución central de la investigación.

Marco Teórico

El presente capítulo aborda los fundamentos conceptuales, técnicos y normativos que sustentan la investigación. Empezando por los conceptos principales relacionados con la naturaleza de los materiales plásticos, su clasificación, propiedades e impactos ambientales asociados a su uso.

Se propone una clasificación terminológica estructurada en tres dimensiones: origen de la materia prima, comportamiento al final de vida y estrategia de sostenibilidad. Lo anterior, con el fin de precisar el alcance conceptual de cada término y evitar ambigüedades en su uso dentro del análisis investigativo. Este apartado resulta fundamental, dado que la literatura científica tiende a emplear estos términos indistintamente, lo que puede generar confusión en la interpretación de resultados y en la formulación de estrategias de transición.

Adicionalmente, el capítulo incorpora el análisis del marco normativo colombiano en materia de gestión de plásticos, así como la revisión de estrategias internacionales implementadas en distintos países, lo que permite contextualizar la problemática desde una perspectiva comparada. Este enfoque facilita la identificación de tendencias, oportunidades y limitaciones que inciden en la adopción de alternativas sostenibles.

Finalmente, se incluye una revisión de instrumentos existentes de planificación y de transición hacia materiales sostenibles, con el propósito de identificar sus componentes estructurales, sus limitaciones y los vacíos que fundamentan la necesidad de la herramienta de diagnóstico multicriterio propuesta en esta investigación. Todos estos elementos proporcionan una base teórica que orienta y sustenta el desarrollo de la investigación.

Fundamentos Conceptuales

Para lograr establecer los parámetros de transición desde materiales plásticos, en aquellos denominados PSU hacia alternativas más sostenibles, es importante comprender

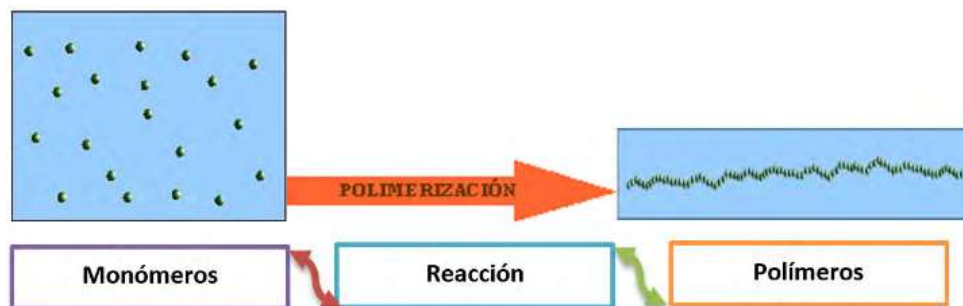
aspectos fundamentales como concepto, clasificación y las normas asociadas que permiten su identificación.

Concepto

Históricamente, materiales naturales como el caucho y la goma, se consideran los predecesores en la obtención de plásticos, los cuales son considerados un tipo de polímeros sintéticos, porque la fuente principal para su obtención, es la proveniente del gas natural o del petróleo, que al ser sometidos al proceso de polimerización (ver Figura 1), forman cadenas más largas conocidas como polímeros, cada una con propiedades específicas según el monómero y los aditivos utilizados (Gil et al., 2020; Torres-Agullo et al., 2021).

Figura 1

Representación del proceso de polimerización



Nota: Adaptado de “Los envases de plástico y su impacto”, por Gil et al., 2020, Semilla científica.

Desde la baquelita, el primer plástico totalmente sintético, desarrollado en 1907 por el químico Leo Baekeland, estos no han dejado de estar presentes en cada una de las actividades y sectores que contribuyen a la evolución de la sociedad y de la industria. La facilidad de conformación, moldeo y su bajo costo permitió que los plásticos se desarrollaran de una manera acelerada (Stanley et al., 2025).

Clasificación de los Plásticos

Según Pilapitiya y Ratnayake (2024), las maneras de clasificar los polímeros dependen de variables como su origen, la forma de la estructura, las fuerzas moleculares y por el método de polimerización. En la Figura 2, se presenta un resumen de la forma tradicional de clasificar los polímeros.

Figura 2

Clasificación tradicional de los polímeros



Nota: Adaptado de *The world of plastic waste: A review*, por Pilapitiya y Ratnayake., 2024, Elsevier.

La clasificación tradicional de los polímeros, aunque sistemática, no es la única forma de organizar los materiales plásticos. Para fines industriales y de gestión de materiales, resulta más operativa una clasificación basada en el comportamiento del material frente al calor, que distingue entre materiales termoestables y termoplásticos. Los termoestables se descomponen de forma irreversible al calentarse, lo que impide su reprocesamiento. Los termoplásticos, en cambio, pueden fundirse y moldearse nuevamente sin perder sus propiedades, característica que explica que concentren el 80% del consumo global de plásticos y que constituyan la principal fuente de los PSU (Pilapitiya & Ratnayake, 2024; Walter Pack, 2025).

Esta superioridad industrial de los termoplásticos, junto con la diversificación acelerada de las resinas, hizo evidente la necesidad de sistemas de nomenclatura estandarizados que permitieran identificar con precisión el tipo de material a lo largo de toda la cadena productiva. En ese contexto surge la norma ISO 1043, que constituye el referente de mayor alcance para la nomenclatura y la designación de los materiales plásticos.

En 1969, Según International Organization for Standardization [ISO] (n.d.), a través del comité ISO/TC 61, el cual establece nomenclaturas, pruebas y lo relacionado con los materiales plásticos, crea la primera recomendación R 1043-1969. Luego, esta recomendación fue transformada a norma y en 1975 se publica la primera edición de la ISO 1043:1975 Plásticos – Símbolos y revisada para su segunda edición en 1978 con el documento ISO 1043:1978.

El creciente desarrollo de los materiales, generó que la norma evolucionara y se restructurara en 4 partes:

ISO 1043-1:2011 – Parte 1: Polímeros Básicos y Características Especiales. Define términos abreviados para los polímeros básicos utilizados en plásticos, símbolos para los componentes de estos términos y símbolos para las características especiales de los plásticos. Incluye únicamente los términos abreviados de uso consolidado y su objetivo es evitar que aparezca más de un término abreviado para un plástico determinado y que un término abreviado se interprete de varias maneras.

ISO 1043-2:2011 – Parte 2: Rellenos y Materiales de Refuerzo. Especifica símbolos uniformes para los términos relativos a los materiales de relleno y de refuerzo. Incluye únicamente los símbolos de uso consolidado y su objetivo principal es evitar la aparición de más de un símbolo para un material de relleno o de refuerzo determinado, así como la interpretación errónea de estos.

ISO 1043-3:2016 – Parte 3: Plastificantes. Proporciona símbolos uniformes para los componentes de los términos relacionados con los plastificantes, lo que permite formar términos abreviados. En general, solo incluye los términos abreviados ya consolidados.

El objetivo es evitar que aparezca más de un término abreviado para un plastificante determinado. Los símbolos están pensados principalmente para ser una forma abreviada y práctica de escribir nombres químicos en publicaciones y otros documentos escritos.

ISO 1043-4:2021 – Parte 4: Retardantes de Llama. Este documento proporciona símbolos uniformes para los retardantes de llama añadidos a los materiales plásticos.

En la Figura 3, se observa el desarrollo de la norma a lo largo del tiempo.

Figura 3

Evolución norma ISO 1043



Nota: Adaptado de *International Organization for Standardization*, por ISO, 2026,

<https://www.iso.org/home.html>

En la Figura 4, Rossel & Saul (2023), muestra un ejemplo acerca del uso de la norma ISO 1043, para la identificación de un material de poliuretano reforzado con fibra de vidrio al 18%.

Figura 4

Ejemplo designación material plástico ISO 1043



Nota: Adaptado de *Normalización de plásticos*, por Rossel & Saúl, 2023, [Normalización de Plásticos y Códigos SPI | PDF | El plástico | Reciclaje](#)

Sin embargo, la identificación técnica de los polímeros no es suficiente para gestionar su ciclo de vida en las cadenas productivas y en los sistemas de gestión de residuos. Con ese propósito surge otro sistema de clasificación, de carácter funcional, orientado no a la composición química del material sino a su identificación rápida por parte de operadores, recicladores y consumidores a lo largo de la cadena de valor.

Por lo anterior, según Clauson (2016) en 1988 la Society of Plastics Industry (SPI), en los Estados Unidos, desarrolló el Código de Identificación de Resinas (RIC) ante la creciente necesidad de recicladores y fabricantes de establecer programas de reciclaje para gestionar la recuperación de residuos y gestionar el final de la vida útil de los materiales plásticos, vinculando también a los consumidores.

La identificación consiste en un triángulo formado por flechas de persecución que simbolizan el cierre de ciclo, un número del 1 al 7 que identifica el código de la resina plástica y su abreviatura correspondiente (Compromiso Empresarial para la Economía Circular [Cempre], 2020). En la Figura 5, se pueden observar los plásticos que hacen parte de cada grupo, con

una descripción de sus principales características y uso que los hacen apropiados para diversas aplicaciones en la industria y el hogar (Walter Pack, 2023).

Figura 5

Códigos de Identificación de Resinas según SPI

						
PET	PEAD	PVC	PEBD	PP	PS	O
Tereftalato de polietileno	Poliétileno (alta densidad)	Cloruro de polivinilo	Poliétileno (baja densidad)	Polipropileno	Poliestireno	Bisfenol-A y otros
PET es comúnmente usado en botellas de condimentos o de bebidas como agua, refresco y energéticos.	PEAD es comúnmente usado en botellas de leche, jugo o champú, contenedores de detergente, bolsas de supermercado, y bolsas de cereal.	PVC puede ser flexible o rígido, y es usado para tuberías de drenaje, empaques para comida transparentes, plástico para envolver, juguetes de niños, manteles, pisos de vinilo, tapetes de juego para niños, y empaques de medicamentos en cápsula.	PEBD es usado para bolsas para lavandería, para pan, para periódico, para frutas y verduras, y para basura, así como para vasos de "papel" para bebidas y envases de "papel" para leche.	PP es usado para contenedores de yogurt, contenedores de comida de cafetería, muebles, maletas y aislamiento para ropa de invierno.	También llamado plumavit, unicol y más nombres, es usado para vasos, platos, contenedores para comida a domicilio, charolas para carne cruda, y material de relleno para envíos.	Cualquier artículo de plástico que no sea de los seis mencionados se pone en una misma categoría múltiple de plástico #7. Cosas como discos compactos, biberones de bebé, y faros de coche.
						

Nota: Adaptado de *6 Tipos de plásticos y sus características*, por Walter Pack, 2023.

En el año 2008, la SPI empezó a trabajar con la American Society for Testing and Materials (ASTM) para el mantenimiento y actualización el sistema RIC, involucrando a actores técnicos e industriales para responder de mejor manera a los avances tecnológicos de las resinas plásticas y a las necesidades sociales cambiantes. Es por eso que en el año 2010 se emitió por primera vez la norma denominada como Práctica Estándar para la Codificación de Artículos Plásticos Manufacturados para la Identificación de Resina, ASTM D7611, cuya última versión es ASTM D7611M-21. La principal novedad desde que ASTM apoya el proceso de revisión de la norma, tiene que ver con el cambio de las flechas de persecución por un triángulo equilátero sólido, la razón es que la misión central del sistema RIC es la identificación de la

resina, más que la reciclabilidad del producto (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2013).

En la Tabla 1, se encuentran la identificación RIC para ASTM D7611 (ASTM, 2021a).

Tabla 1

Identificación RIC según ASTM D7611M-21

Número de identificación de resina	Resina	Código de identificación de resina Opción A	Código de identificación de resina Opción B
1	Tereftalato de polietileno	 PETE	 PET
2	Polietileno de alta densidad	 HDPE	 PE-HD
3	Policloruro de vinilo	 V	 PVC
4	Polietileno de baja densidad	 LDPE	 PE-LD
5	Polipropileno	 PP	 PP
6	Poliestireno	 PS	 PS
7	Otras resinas	 OTHER	 O

Nota: Adaptado de ASTM D7611/D7611M-21 *Práctica*

estándar para la codificación de productos plásticos para identificación de resina, por ASTM, 2021, <https://www.antpedia.com/standard/1743203139.html>

La identificación RIC según ASTM compagina con la antigua designación establecida por SPI (flechas de persecución). Sin embargo, los países pueden priorizar alguna de las dos prácticas. Por ejemplo, para el caso de Colombia, el Icontec en su NTC 3205, adopta como base la ASTM D7611, pero todavía utiliza las flechas de persecución para formar el triángulo (Garzón, 2023)

Ambos sistemas resultan complementarios y no excluyentes. Mientras la ISO 1043 proporciona el lenguaje técnico-ingenieril necesario para el diseño, formulación y especificación de materiales plásticos en procesos industriales, el sistema RIC según ASTM D7611 opera como herramienta de trazabilidad funcional en las etapas de uso, separación y aprovechamiento (ASTM, 2021a).

Para los fines de esta investigación, el criterio de clasificación más relevante es el basado en el tipo de material, dado que permite establecer la correspondencia entre las resinas de mayor producción y consumo y las categorías de PSU que son objeto de la transición propuesta.

Plásticos de un Solo Uso (PSU)

Más allá de su composición química o de su clasificación industrial, también ha surgido otra categoría funcional específica: los plásticos de un solo uso. Estos materiales no se definen únicamente por su tipo de resina, sino por su concepción para cumplir un único ciclo de servicio de corta duración antes de su disposición final.

La principal fuente de PSU, es la proveniente de los termoplásticos por su facilidad de reprocesamiento para la obtención de nuevos productos (Oladele et al., 2023).

Por definición, entidades como Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (2018a), establecen que “Los plásticos de un solo uso, también llamados a menudo plásticos desechables, se suelen utilizar para envases plásticos e incluyen artículos destinados a ser utilizados una sola vez antes de ser descartados o reciclados” (p. 2).

La Unión Europea (2019), también menciona que los PSU son:

Un producto fabricado total o parcialmente con plástico y que no ha sido concebido, diseñado o introducido en el mercado para completar, dentro de su período de vida, múltiples circuitos o rotaciones mediante su devolución a un productor para ser rellenado o reutilizado con el mismo fin para el que fue concebido. (p. 8)

Por su parte, en Colombia, Ambiente (2022), en la Ley 2232 de 2022 establece que son: Productos de plástico que no han sido concebidos, diseñados o introducidos en el mercado para realizar múltiples circuitos, rotaciones o usos a lo largo de su ciclo de vida, independientemente del uso repetido que les otorgue el consumidor. Son diseñados para ser usados una sola vez y con corto tiempo de vida útil, entendiendo por vida útil el tiempo promedio durante el cual el producto cumple su función. (p. 3)

Esta característica funcional de los plásticos, combinada con altos volúmenes de producción y consumo, ha generado implicaciones ambientales, regulatorias y tecnológicas que requieren ser abordadas desde una perspectiva que integre diseño, función, ciclo de vida y transformación de procesos.

Razones del Uso Industrial de los Plásticos de un Solo Uso

La adopción industrial responde a motivaciones concretas y que han sido documentadas desde contextos específicos. Por ejemplo, en el sector biofarmacéutico, según Goggin et al. (2025) señalan que, los PSU facilitan la economía de escala, eficiencia de procesos, flexibilidad, garantía de esterilidad y reducen los riesgos derivados de los procesos de limpieza requeridos. En este sector, las aplicaciones principales de PSU se encuentran en biorreactores, sistemas de filtración y contenedores de proceso. Adicionalmente, como ventaja operativa directa, los PSU reducen los requerimientos de agua y energía en comparación con los sistemas reutilizables convencionales de acero inoxidable.

En cuanto a los envases, el sector de alimentos, bebidas, belleza y cuidado del hogar alimentos son un usuario extensivo de PSU. En el año 2020, los envases para el sector de alimentos, representaron el 64% de las ventas globales. La pandemia de COVID-19 influyó en el sector, incrementando la demanda de envases que protegieran contra la contaminación y generando un crecimiento significativo para la entrega de alimentos a domicilio y el comercio electrónico (Dolci et al., 2025; Operato et al., 2025).

Económicamente, la razón de uso se basa en la producción masiva a bajo costo. Según Kalauni et al. (2025), el valor del mercado global del plástico fue de 593.000 millones de USD en 2021, con proyección a más de 810.000 millones de USD para 2030. Adicionalmente, la producción mundial de plástico supera los 300 millones de toneladas métricas, pero presenta una baja tasa de recuperación al final de su ciclo de vida. Lo anterior, consolida la lógica de conveniencia económica a corto plazo en la que se sustenta el sector.

Finalmente, Dolci et al. (2025), menciona de manera relevante que: la percepción del consumidor sobre la menor sostenibilidad del plástico no siempre se alinea con los hallazgos de los análisis de ciclo de vida. Por ejemplo, materiales como el vidrio ven afectado su rendimiento medioambiental por el peso; si se consideran los plásticos, que son muy ligeros, la opción de reutilización del vidrio no es suficiente para superar los PSU.

Propiedades de los Principales Plásticos de un Solo Uso

Los PSU constituyen uno de los grupos de materiales poliméricos de mayor producción y distribución global, abarcando polímeros de origen petroquímico como: el tereftalato de polietileno (PET), el polietileno de alta y baja densidad (HDPE/LDPE), el polipropileno (PP) o el poliestireno (PS). Su uso masivo en envases alimentarios, vajillas desechables, películas de embalaje y artículos de consumo se debe a una combinación de propiedades físicoquímicas: bajo peso específico, versatilidad en el procesamiento y un costo reducido. La Tabla 2 resume,

las propiedades clave, aplicaciones en PSU y las principales ventajas y limitantes, con el fin de mostrar una referencia técnica comparativa.

Para los PSU, la principal limitación estructural es la persistencia ambiental: ninguno de estos materiales es amigable con el medio ambiente, y su reciclaje, aunque técnicamente viable en varios casos (especialmente PET y HDPE), enfrenta barreras logísticas, económicas y de contaminación que reducen significativamente las tasas de recuperación efectiva a nivel global.

Tabla 2

Principales PSU de origen petroquímico

Nombre	Abreviatura	Clasificación RIC	Propiedades físicas	Propiedades químicas	Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones
Tereftalato de polietileno	PET	1	Densidad: 1.33 - 1.39 g/cm ³ (semi - cristalino) / 1.33 g/cm ³ (amorfo)	Resistencia química: buena frente a ácidos diluidos, hidrocarburos alifáticos y alcoholes; susceptible a ácidos/bases fuertes y cetonas concentradas	• Botellas de agua de 500 mL y 1 L desechables	Alta claridad óptica Buena resistencia mecánica Barrera a gases Reciclable	Hidrólisis en condiciones húmedo-calurosas No biodegradable Residuos de acetaldehído en botellas
			Punto de fusión: aprox. 250 °C (semi - cristalino)		• Botellas de refrescos / bebidas carbonatadas		
			Tg: 75 - 80 °C		• Vasos y copas desechables para bebidas frías		
			Resistencia a la tracción: 55 - 75 MPa	Estabilidad térmica: estable hasta aprox. 250 °C; hidrólisis acelerada por humedad + calor	• Bandejas desechables para ensaladas y alimentos preparados		
			Transparencia: alta en estado amorfo	Barrera: buenas propiedades barrera a O ₂ y CO ₂	• Empaques blíster de alimentos (film termoformado)		
Polietileno de alta densidad	HDPE	2	Flexibilidad: rígido en envases; flexible como film orientado		• Tapas desechables de vasos (combinadas con PP o PS)	Alta relación resistencia/peso Excelente resistencia química Bajo costo Reciclable	No biodegradable Barrera a gases baja Menor transparencia Susceptible a UV sin estabilizantes
			Densidad: 0.941 - 0.967 g/cm ³	Resistencia química: excelente frente a ácidos, álcalis, alcoholes y solventes polares; susceptible a hidrocarburos aromáticos a altas temperaturas	• Bolsas de supermercado y tiendas de un solo uso		
			Punto de fusión: 120 - 140 °C		• Tapas desechables de botellas de agua y leche		
			Resistencia a la tracción: 21 - 38 MPa		• Pitillos rígidos desechables		
			Transparencia: opaco o traslúcido	Estabilidad térmica: degradación máxima a aprox. 467 °C (Análisis Termogravimétrico - TGA, virgen)	• Botellas de leche desechables		
			Flexibilidad: rígido; mayor rigidez que LDPE	Termogravimétrico - TGA, virgen)	• Envases desechables para yogur y crema		
				Cristalinidad: alta (70 - 90 %)	• Contenedores desechables para comida para llevar		

Policloruro de vinilo	PVC	3	Densidad: 1.30 - 1.45 g/cm ³ Temperatura de ablandamiento: 80 - 105 °C (rígido)	Resistencia química: buena frente a ácidos diluidos y álcalis; susceptible a cetonas y solventes aromáticos	• Film transparente estirable para envolver alimentos en comercios • Blísters desechables de medicamentos y complementos	Alta durabilidad	Toxicidad: produce dioxinas, furanos y PCBs en incineración
			Resistencia a la tracción: 40 - 60 MPa (rígido) / 10 - 25 MPa (flexible) Transparencia: variable (formulación) Flexibilidad: rígido (uPVC) o muy flexible con plastificantes	Riesgos: liberación de dioxinas/furanos/PCBs en incineración Estabilidad térmica: degradación >150 - 160 °C sin estabilizantes; libera ácido clorhídrico (HCl) al calentarse	• Envolturas individuales de queso, embutidos y snacks • Guantes desechables de PVC para uso alimentario y limpieza • Contenedores y vasos desechables transparentes (rígido)	Resistencia a la llama Versatilidad rígido - flexible Bajo costo	Plastificantes (ftalatos) con toxicidad endocrina Reciclaje muy complejo
Polietileno de baja densidad	LDPE	4	Densidad: 0.910 - 0.940 g/cm ³ Punto de fusión: 105 - 115 °C	Resistencia química: excelente frente a ácidos y álcalis; susceptible a hidrocarburos alifáticos y aromáticos	• Bolsas de compra desechables finas (de supermercado) • Bolsas de congelación y almacenamiento de un solo uso	Alta flexibilidad	Resistencia mecánica baja
			Resistencia a la tracción: 8 - 20 MPa Transparencia: muy alta Flexibilidad: muy alta; alta ramificación produce baja cristalinidad	Estabilidad térmica: degradación 360 - 550 °C; máx. 469 - 494 °C (TGA, virgen) Permeabilidad: alta a gases y vapores de agua	• Vasos desechables de papel con recubrimiento interior de LDPE • Cartones de leche y zumo (capa LDPE interior) • Bolsas para frutas y verduras en supermercados • Film estirable para bandejas de alimentos	Bajo costo Barrera excelente a la humedad Sellable por calor	No biodegradable Alta permeabilidad a gases Reciclaje limitado

Polipropileno	PP	5	Densidad: 0.895 - 0.920 g/cm ³	Resistencia química: excelente frente a ácidos, álcalis y solventes polares; susceptible a hidrocarburos clorados a altas temperaturas	• Pitillos desechables para bebidas • Cubiertos desechables (tenedores, cucharas, cuchillos) • Vasos desechables para café caliente y bebidas calientes • Tapas desechables de vasos de café	Resistencia a temperatura superior a PE	No biodegradable
			Punto de fusión: 130 - 171 °C	Estabilidad térmica: degradación 400 - 500 °C; aprox. 447 °C (TGA, virgen)	• Vasos desechables para café caliente y bebidas calientes	Buena resistencia química	Frágil a bajas temperaturas
			Resistencia a la tracción: 25 - 40 MPa	Cristalinidad: alta (45–55 %)	• Bandejas desechables de un solo uso para microondas	Ligero	Baja barrera a gases
			Transparencia: traslúcido (homopolímero) a opaco		• Platos desechables (mercados de baja-media gama)	Reciclable	Susceptible a UV sin estabilizantes
			Flexibilidad: rígido; excelente resistencia a la fatiga por flexión		• Envases desechables para comida para llevar (tipo tupper de un uso)	Apto para microondas	
					• Vasos de café y bebidas calientes de foam (EPS/poliestireno expandido)		
Poliestireno (general y expandido)	PS (GPPS) / EPS	6	Densidad GPPS: 1.04 - 1.06 g/cm ³	Resistencia química: resistente a ácidos diluidos, álcalis y sales; NO resistente a solventes orgánicos (acetona, hidrocarburos aromáticos)	• Platos desechables blancos de foam	Muy bajo costo	No biodegradable
			Densidad EPS: 11 - 32 kg/m ³ (foam)	Estabilidad térmica: punto de ablandamiento aprox. 100 °C (Tg) limita usos térmicos	• Bandejas desechables de supermercado para carne, frutas y verduras	GPPS con alta transparencia	Reciclaje muy difícil (EPS)
			Tg: aprox. 100 °C; Degradación (TGA, virgen): aprox. 425 °C	Barrera: pobre a O ₂ y vapor de agua	• Cubiertos desechables transparentes (GPPS)	EPS: excelente aislamiento térmico	Fragmentación en microplásticos
			Resistencia a la tracción GPPS: 30 - 60 MPa		• Tazas y contenedores para comida rápida (EPS)	Ligero	Baja resistencia a solventes orgánicos
			Transparencia: alta (GPPS); opaco (EPS)		• Cajas de pizza y empaques de comida rápida (EPS)		
			Flexibilidad: rígido y frágil		• Vasos desechables para máquinas expendedoras de café		

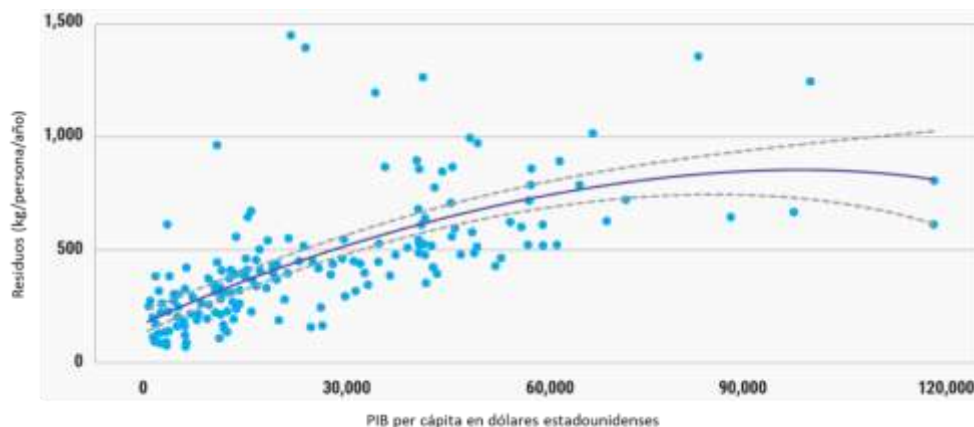
Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, (de Jesus et al., 2023; McClements, 2022; Rikhter et al., 2022; Singh et al., 2025),

Impactos Ambientales de los Plásticos de un Solo Uso

Según United Nations Environment Programme [UNEP] & International Solid Waste Association [ISWA] (2024), la generación de residuos está estrechamente vinculada al desarrollo económico de los países. En la Figura 6, se muestra la relación creciente entre el Producto Interno Bruto (PIB), de 114 países analizados (puntos azules) entre 2010 y 2020, según el reporte y el promedio de residuos generados por kilogramo/persona/año. Lo anterior, porque los consumidores con mayores ingresos priorizan la comodidad, esto genera un aumento en la presencia de productos y envases de PSU en entregas de domicilio y empaques de comida.

Figura 6

PIB vs Generación de residuos entre 2010 y 2020



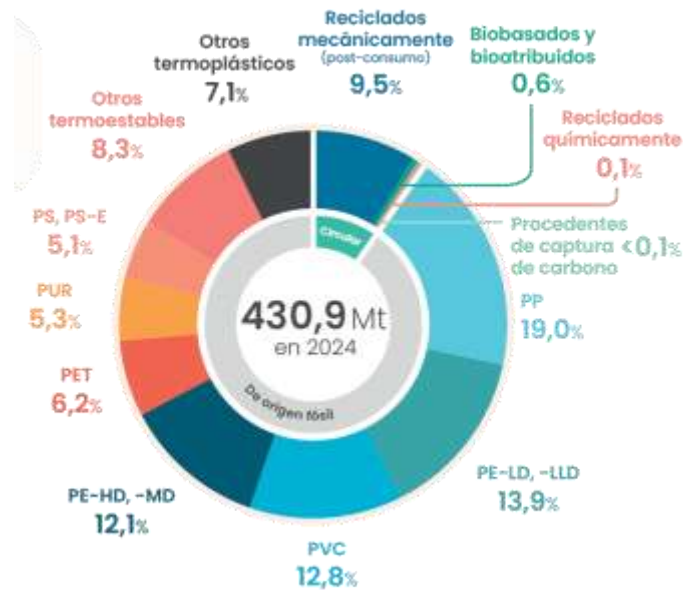
Nota: Adaptado de *Beyond an age of waste Turning rubbish into a resource*, por UNEP & ISWA, 2024.

Por otra parte, desde sus inicios, la mitad de los plásticos se ha producido en los últimos 20 años. En 1950, la producción se estimó en 2.3 millones de toneladas, pero según el último reporte de Plastics Europe (2025) y como se puede observar en la Figura 7, la producción mundial de plásticos acumulada en el año 2024 fue de 430,9 millones de toneladas, de los cuales el 89,8% corresponde a plásticos de origen fósil y también muestra que el 76,2% son de

características termoplásticas, los cuales recordemos, son la principal fuente de PSU. Esta cifra espera que se duplique para 2050, adicionando que los procesos de descomposición pueden durar hasta 400 años en los plásticos que se han venido produciendo (Parker, 2024; Plastics Europe, 2025).

Figura 7

Producción mundial de plásticos 2024



Nota: Adaptado de *Producción de plásticos a nivel mundial y europeo e indicadores económicos*, por Plastics Europe, 2025.

Esta problemática afecta desde los ecosistemas de nuestro planeta, debido a la contaminación que genera, hasta la salud humana por los efectos de los microplástico.

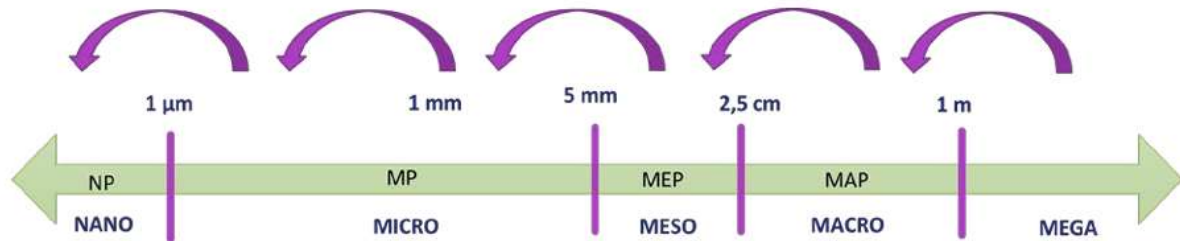
Microplásticos

Según Manrique (2020), no hay una definición específica para los microplásticos (MP), en general, múltiples investigaciones concuerdan que los MP, son aquellos que se encuentran entre 1 μm y 1000 μm , incluso hasta 5 mm, es decir, en función de su tamaño. Lo anterior, se debe a que los MP son los mismos polímeros que componen los plásticos que se degradan o fragmentan. Por lo tanto, mantienen la estructura, la composición, el color y las propiedades del

plástico de origen. En la Figura 8, se observa la clasificación más aceptada de los MP, según su tamaño.

Figura 8

Tamaños comúnmente aceptados para clasificar los MP



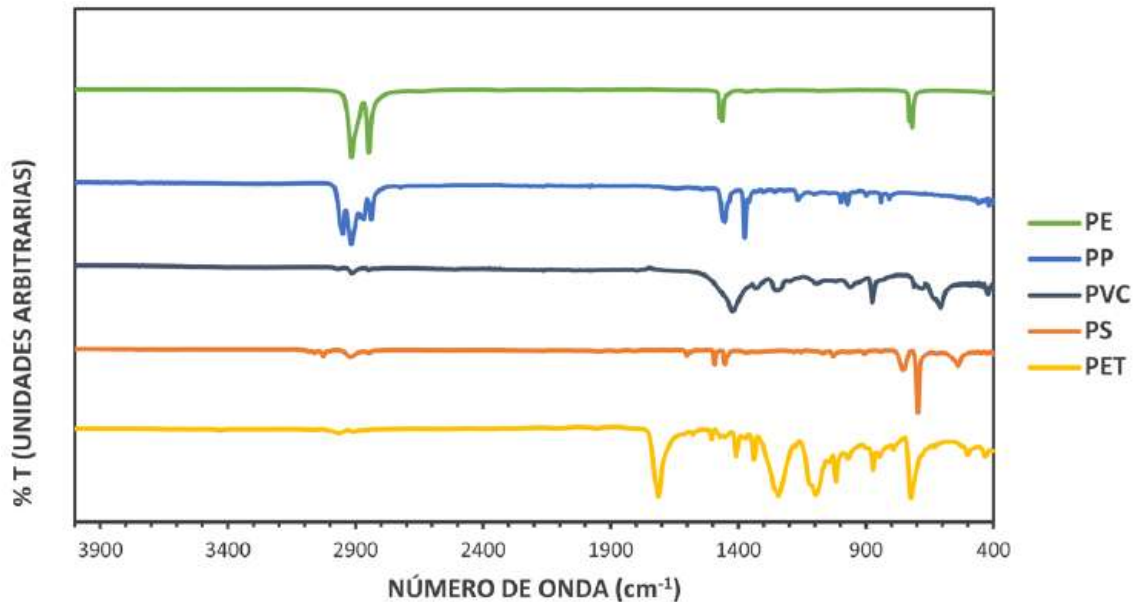
Nota: Adaptado de *Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición*, por Castañeta et al., 2020, Revista Boliviana de Química.

Adicionalmente, los MP se consideran primarios, cuando se producen en tamaño pequeño, para luego fabricar productos más grandes. Por ejemplo, los pellets, para el posterior proceso de conformado de envases, las microperlas utilizadas en el ámbito de la estética como exfoliante y en pastas dentales. Los MP secundarios, son fragmentos de artículos más grandes. Las microfibras sintéticas presentes en la industria textil como el poliéster, nylon, entre otros, también hacen parte de este grupo (Ríos et al., 2020).

Los MP mayormente analizados y que más se encuentran presentes, dado su nivel de aplicaciones, producción y utilización, son los provenientes del polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS) y politereftalato de etileno (PET). Herramientas como la espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier de reflectancia total atenuada (FTIR-ATR), para tamaños entre 50 – 500 µm y la espectroscopía Raman, para MP entre 1 y 50 µm, permiten analizar la presencia de los MP. En la Figura 9, se observa cómo se ven los espectros en los análisis de algunos MP (Manrique, 2020).

Figura 9

Ejemplo análisis FTIR de algunos MP



Nota: Adaptado de *Microplásticos: el enorme problema de las pequeñas partículas de plástico*, por Manrique, 2020, Revista de Química - PUPC.

La gran preocupación en torno a los MP, es que se consideran vectores de contaminación por su capacidad de absorber, transportar y liberar otras sustancias, que pueden ser orgánicas e inorgánicas, al medio ambiente y los seres vivos (Zambrano-Pinto et al., 2024).

Impacto Marino

Se estima que entre 75 y 199 millones de toneladas de plástico se acumulan actualmente en los océanos, con proyecciones que indican una triplicación de los vertidos anuales para 2040 si no se adoptan medidas urgentes (PNUMA, 2021b).

Según Alcázar (2024), la presencia de MP en los océanos afecta el comportamiento de las especies marinas. En el caso de las medusas, los estudios muestran que disminuyen las pulsaciones, lo que afecta su capacidad de nadar y de capturar presas. Al igual que en los ecosistemas terrestres, estos cambios comprometen la cadena alimenticia en los niveles

tróficos superiores, incluso hasta las personas que consumen alimentos provenientes de esta fuente.

Organismos como el plancton, que son fundamentales en la exportación de carbono al fondo del océano: si estos no cumplen su función debido a la contaminación por MP, habrá repercusiones en el cambio climático porque se afectan los procesos biogeoquímicos en los océanos.

Impacto Terrestre

Aunque el foco de los efectos de la contaminación por plásticos, gira principalmente alrededor de los océanos, son varios los estudios que sugieren que a nivel terrestre, esta puede llegar a ser entre 4 y 23 veces más, dependiendo del punto de comparación con respecto a los océanos (PNUMA, 2021a).

Los MP son absorbidos por el suelo a través de fertilizantes, lodos, lixiviados o la propia degradación de plásticos más grandes, lo que afecta la estructura y fertilidad del suelo. Polímeros como el HDPE reducen el pH del suelo cuando se exponen a la luz y al calor. Un efecto preocupante es que los MP pueden obstruir los poros de las semillas, inhibiendo la absorción de agua, reduciendo las tasas de germinación. En organismos como las lombrices, pueden confundir los MP con alimento, lo que puede causarles desde alteraciones en ciclos reproductivos hasta la muerte (Rashid et al., 2025).

A nivel de la cadena alimenticia, esta perturba el proceso natural de depredación, los animales más pequeños suelen consumir MP y por acumulación, al ser presas de animales más grandes, van transmitiendo la contaminación, lo que influye en la disminución de la disponibilidad y calidad de alimentos en los niveles tróficos superiores (Ruíz-Santoyo et al., 2025).

Sin embargo, Rashid et al. (2025), sugieren que a nivel de ecosistema terrestre aún queda mucho campo por explorar, porque en ocasiones hay efectos favorables parciales para

algunos organismos del suelo. Por ejemplo, algunos tipos de MP como PE, PP y PS incrementan la materia orgánica del suelo; el poliéster mejora la capacidad de retención de agua; ciertos MP estimulan la actividad de enzimas como la ureasa y la fosfatasa ácida; algunos polímeros como PES y PP aumentan la colonización de raíces por hongos micorrícicos beneficiosos; y en colémbolos (*Enchytraeus crypticus*), la exposición a PS se asoció con mayor reproducción.

Impacto en la Salud Humana

La contaminación por residuos plásticos, tienen un alcance que van más allá de los ecosistemas terrestres y marinos. Como ya se mencionó, los MP presentes en animales y fuentes hídricas, aumentan las probabilidades de toxicidad en la salud humana por el proceso alimenticio. Por otro lado, aditivos químicos asociados a los plásticos, como el Bisfenol A (BPA), está altamente relacionado con enfermedades cardiovasculares, cáncer, daños renales hasta malformaciones en nacimientos porque el BPA permea el tejido placentario. En el caso de los niños pequeños, la principal fuente de exposición a BPA es el material de los teteros donde ellos se alimentan (Stanley et al., 2025). En la Figura 10, se puede observar un resumen de algunas de las afectaciones en la salud humana.

Figura 10

Efectos de los MP en la salud humana

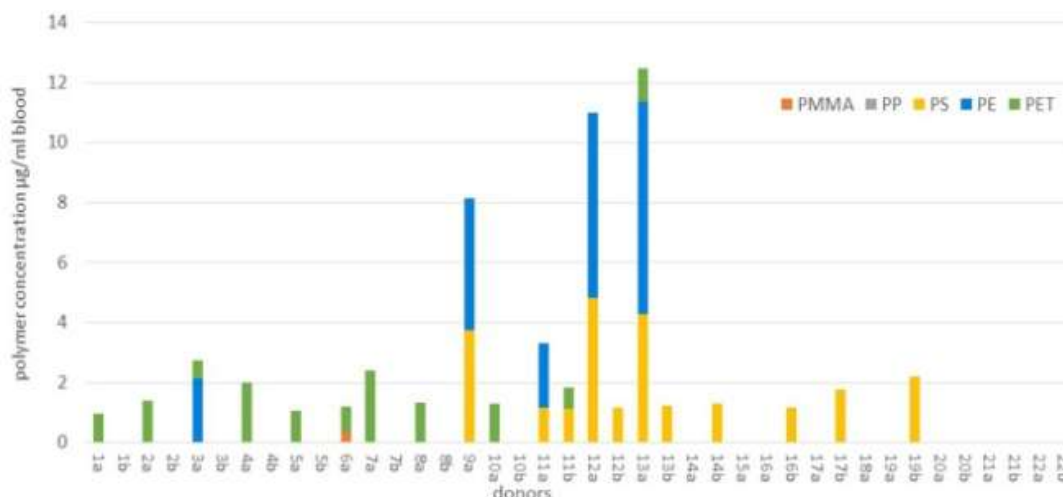


Nota: Adaptado de *El viaje de los plásticos: evolución histórica, desafíos ambientales y el surgimiento de los bioplásticos para productos de un solo uso*, por Stanley et al, 2025, Revista de Ingeniería Verde para el Desarrollo Sostenible.

En los Países Bajos se llevó a cabo un estudio en 22 personas sanas, para analizar la presencia de MP en la sangre. Utilizando el método llamado pirólisis cromatografía de gases espectrometría de masas (Py-GC/MS), detectaron que el 77% de las personas presentaban valores significativos en la presencia de MP, especialmente del PET (Leslie et al., 2022). La Figura 11 muestra la concentración de los MP encontrados en la sangre de las personas analizadas.

Figura 11

MP presentes en los análisis



Nota: Adaptado de *Descubrimiento y cuantificación de la contaminación por partículas plásticas en la sangre humana*, por Leslie et al, 2022, Medio Ambiente Internacional.

Los PSU representan una de las problemáticas ambientales más críticas de la actualidad, cuyas consecuencias trascienden los ecosistemas terrestres y marinos para afectar directamente la salud humana. Su acelerada producción, que se proyecta duplicarse para 2050, combinada con tiempos de descomposición de hasta 400 años, ha favorecido la proliferación de microplásticos en suelos, océanos y organismos vivos, alterando cadenas alimenticias, procesos biogeoquímicos y equilibrios ecológicos esenciales. A nivel humano, la exposición a estos contaminantes, ya sea a través de la alimentación o de aditivos como el BPA, se vincula con enfermedades cardiovasculares, daño renal, cáncer y malformaciones congénitas, siendo especialmente preocupante que el 77% de personas analizadas en estudios recientes presenten microplásticos en sangre. Ante este panorama, resulta urgente adoptar medidas concretas que reduzcan la producción y el consumo de plásticos, promuevan materiales alternativos y fortalezcan políticas ambientales que protejan tanto los ecosistemas como la salud pública.

Terminología para Materiales Sostenibles

En la búsqueda de materiales sostenibles, han surgido diferentes términos que se utilizan con frecuencia de manera indistinta sin una definición clara, lo que genera confusión. Por ejemplo, según Velásquez et al. (2025), un número significativo de consumidores y la misma industria, experimentan confusión terminológica respecto a las características y beneficios de los materiales denominados bioplásticos, siendo frecuentemente inducidos al error sobre sus propiedades.

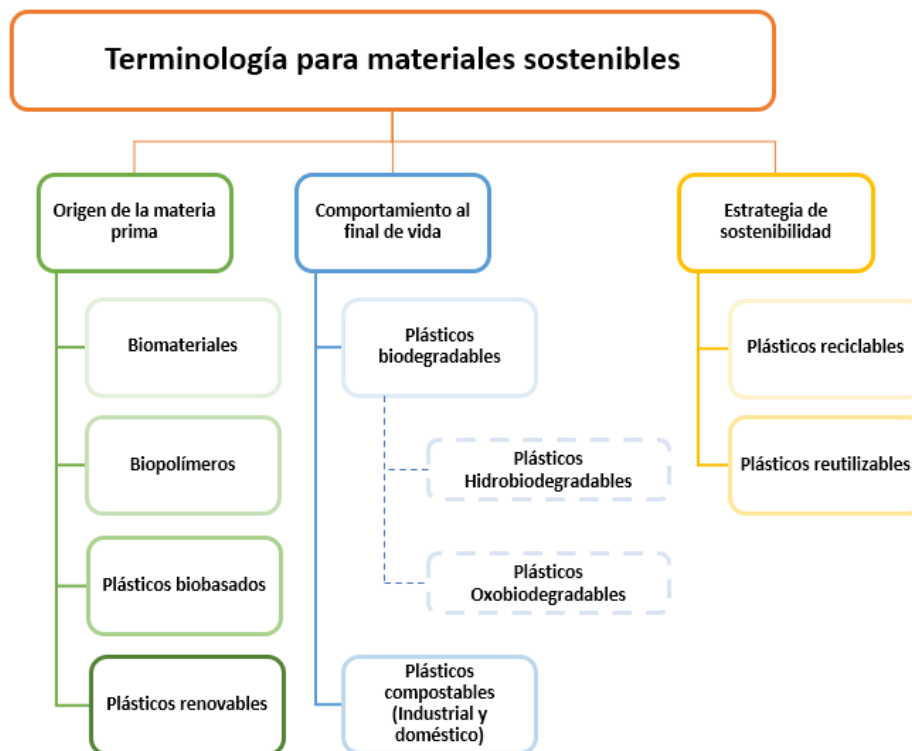
Dada la complejidad terminológica, resulta necesario establecer una organización conceptual clara que permita interpretar adecuadamente las características de los materiales sostenibles. Un material mal definido puede generar evaluaciones erróneas del impacto ambiental y tecnológico, e incluso del cumplimiento normativo.

Por ejemplo, el término "bioplásticos" ilustra con claridad esta problemática. Aunque es de uso frecuente en el discurso público, comercial y normativo, su imprecisión conceptual es reconocida tanto por la industria como por los organismos reguladores. Según European Bioplastics (2024), un material plástico se define como bioplástico si es biobasado, biodegradable, o reúne ambas propiedades simultáneamente. Organismos como la Comisión Europea (2023a), reconoce que el término puede resultar engañoso para los consumidores y recomienda evitar su uso sin especificación adicional en comunicaciones comerciales. Por esta razón, en el presente trabajo el término no se emplea como categoría, sino que se descompone en sus propiedades constitutivas.

Después de la revisión bibliográfica, se propone una clasificación terminológica basada en tres dimensiones principales (ver Figura 12): el origen de la materia prima, el comportamiento del material al final de su vida útil y las estrategias de sostenibilidad aplicadas a los materiales plásticos.

Figura 12

Propuesta de clasificación terminológica para materiales sostenibles



Nota: Elaboración propia después de revisión bibliográfica, 2026.

La clasificación presentada, propone una distinción más específica que la empleada en el marco normativo colombiano. La Ley 2232 de 2022 propone tres términos fundamentales que categorizan las alternativas válidas para la sustitución de los PSU: materiales reutilizables, reciclables o compostables (Ambiente, 2022).

Precisar esas diferencias terminológicas propuestas, es crucial para evaluar la viabilidad técnica de cada alternativa en el contexto colombiano y para fundamentar los criterios de selección que orientarán la herramienta de diagnóstico multicriterio.

A continuación, se desarrolla el conjunto de definiciones propuesto en la estructura. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para efectos de esta investigación, el término "materiales sostenibles" se emplea como concepto integrador que agrupa las alternativas

técnicamente viables para sustituir los PSU. A excepción de los biomateriales, cuyo campo de aplicación corresponde al ámbito médico (Chong et al., 2023), y de los plásticos oxobiodegradables, cuya prohibición en la Ley colombiana 2232 de 2022 (Ambiente, 2022) y en mercados como la Unión Europea, responde a evidencia científica de que no completan el proceso de biodegradación y generan microplásticos persistentes (Filiciotto & Rothenberg, 2021), los demás términos desarrollados en este apartado representan alternativas técnicamente viables para la sustitución de PSU (PNUMA, 2023).

Según el Origen de la Materia Prima

Esta categoría describe la procedencia del material.

Biomateriales. Es un concepto amplio, utilizado principalmente en el ámbito médico y se refiere a la relación entre el material utilizado y su interacción con el tejido vivo: en este caso, lo importante es la aplicación e interacción con el cuerpo humano. Estos pueden ser metálicos, cerámicos, naturales, semisintéticos o sintéticos. Por ejemplo, los implantes de rodilla o cadera que suelen ser de aleaciones de titanio, los hidrogeles como el alginato (natural) o el alcohol vinílico (sintético) que se han utilizado para transportar ADN o en el tratamiento de enfermedades (Chong et al., 2023).

Dado que su campo de aplicación corresponde al ámbito médico y no al de los materiales de empaque ni al de los productos de un solo uso, el término biomaterial no se emplea como categoría operativa en el presente trabajo.

Biopolímeros. Son obtenidos a partir de recursos biológicos renovables, ya sea directamente de organismos vivos como plantas, animales o microorganismos como la celulosa, el almidón o las proteínas; o mediante el procesamiento industrial de biomasa para obtener polímeros de base biológica como el Ácido Poliláctico (PLA) o los Polihidroxialcanoatos (PHA). La distinción esencial respecto de los polímeros sintéticos convencionales es que los biopolímeros no requieren petróleo ni gas natural como materia prima. Sin embargo, no todos

los biopolímeros son biodegradables: por ejemplo, el bio-PE es químicamente idéntico al PE convencional pero no se biodegrada (Dutta & Sit, 2024; Edo et al., 2025).

Plásticos Biobasados. Son materiales plásticos en los que la totalidad o una parte significativa de su contenido de carbono proviene de biomasa, es decir, de recursos de origen biológico como la caña de azúcar, el maíz o la celulosa. El término describe una propiedad del material resultante, medible y certificable mediante normas como por ejemplo la ASTM D6866 y no implica biodegradabilidad al final de la vida útil. Existen plásticos biobasados no biodegradables, como el bio-PE o el bio-PET, y plásticos biobasados biodegradables, como el PLA o el PHA (Rosenboom et al., 2022).

Materiales Renovables. El término 'renovable' describe una propiedad de la fuente o materia prima, no del material resultante: una fuente es renovable cuando se regenera de forma natural en escalas de tiempo humanas, a diferencia de los recursos fósiles que requieren millones de años (Rosenboom et al., 2022). Por lo tanto, todos los plásticos biobasados provienen de fuentes renovables, pero no toda fuente renovable produce plásticos: la madera, el papel y las fibras naturales también son renovables, aunque no son plásticos.

Según el Comportamiento al Final de Vida

Esta categoría describe lo que le ocurre al material al llegar a su fin de vida útil.

Plásticos Biodegradables. La particularidad de estos materiales es la capacidad de degradación, el origen no importa, por lo tanto, pueden ser biológicos o derivados del petróleo como algunos poliésteres sintéticos, porque son expuestos a microorganismos o condiciones de compostaje especial para su degradación (Comisión Europea, 2023b). Hay dos subcategorías según el mecanismo que inicia el proceso de degradación:

Plásticos Hidrobiodegradables. Constituyen el grupo de mayor relevancia para la sustitución de PSU. Son materiales poliméricos cuya degradación se inicia mediante un mecanismo abiótico de hidrólisis: las moléculas de agua atacan los enlaces químicos de la

cadena principal del polímero (principalmente enlaces éster, amida, anhídrido o carbonato) lo que provoca su fragmentación en oligómeros y monómeros solubles. Esta etapa inicial de degradación hidrolítica facilita la posterior mineralización biológica de los fragmentos por los microorganismos. Los polímeros más representativos de esta clase son el PLA, el Polibutileno Succinato (PBS), los PHA y la Policaprolactona (PCL). La tasa de hidrólisis depende de factores como el pH del medio, la temperatura, la cristalinidad del polímero y el área superficial expuesta (Silva et al., 2023).

Plásticos Oxobiodegradables. Como se mencionó, los plásticos oxobiodegradables no constituyen una alternativa viable para la sustitución de PSU. La Unión Europea prohibió explícitamente su comercialización y la Ley 2232 de 2022 los excluye como opción de sustitución en Colombia.

Solo para tener clara la definición, son plásticos convencionales (principalmente PE, PP) a los que se les incorporan aditivos prooxidantes como sales de cobalto, manganeso, cerio, hierro. Los cuales, debido a los efectos del calor, de la luz UV y del oxígeno, fragmentan el material. La propuesta comercial de sus fabricantes es que estos fragmentos serán asimilados posteriormente por microorganismos en una segunda etapa biótica. Sin embargo, la literatura científica ha demostrado consistentemente que: la segunda etapa de biodegradación no ocurre de forma completa ni en plazos razonables; la fragmentación genera microplásticos persistentes en el entorno; los metales empleados como aditivos pueden acumularse en suelos y causar efectos ecotóxicos (Filiciotto & Rothenberg, 2021).

Plásticos Compostables – Industrial y Doméstico. Está definida por la capacidad de desintegrarse y mineralizarse en condiciones controladas, sin generar residuos visibles ni sustancias ecotóxicas en el compost resultante. Se distinguen dos subtipos clave: Compostables industrialmente, que se degradan en instalaciones de compostaje a escala industrial (temperaturas termofílicas de 55–60 °C, humedad superior al 50%, agitación

mecánica y presencia de microorganismos específicos), logrando la desintegración física en 90 días y al menos el 90% de conversión a CO₂ en 180 días. Las normas de referencia son EN 13432 (Europa) y ASTM D6400 (EE. UU.). Compostables domésticos: se degradan en pilas de compostaje doméstico a temperaturas más bajas (20–30 °C), con plazos más prolongados. Es fundamental comprender que todos los plásticos compostables son biodegradables, pero no todos los plásticos biodegradables son compostables (Filiciotto & Rothenberg, 2021).

Según la Estrategia de Sostenibilidad para los Plásticos

Agrupar los términos que describen el enfoque sistémico adoptado para la gestión de los materiales plásticos.

Plásticos Reciclables. Son aquellos que, al final de su vida útil, pueden ser sometidos a un proceso de recuperación y revalorización para producir materias primas secundarias o nuevos productos, manteniendo el valor del material en el sistema económico. El reciclaje de plásticos se clasifica en cuatro modalidades: Reciclaje mecánico: proceso físico de trituración, lavado, fundición y repeletizado; Reciclaje químico: despolimerización mediante hidrólisis, pirólisis o solvolisis que recupera los monómeros originales; Reciclaje energético: recuperación del contenido calorífico mediante incineración controlada; Reciclaje biológico: degradación enzimática de polímeros susceptibles. Para que un plástico sea considerado 'reciclable' en la práctica industrial, deben cumplirse tres condiciones: el material debe poder separarse de la corriente de residuos mediante sistemas de clasificación disponibles; debe existir tecnología de reciclaje viable; y debe haber mercado para el material recuperado (Jiang & Bateer, 2025).

El reciclaje de plásticos es la estrategia de fin de vida más desarrollada industrialmente y la que cuenta con la mayor infraestructura global, aunque con tasas efectivas mundiales inferiores al 10% del total producido.

Plásticos Reutilizables. Los plásticos reutilizables son materiales diseñados, fabricados y comercializados para ser usados en múltiples ciclos de uso, manteniendo su

función original, sin necesidad de procesamiento industrial intermedio (a diferencia del reciclaje). La reutilización es la estrategia prioritaria en la jerarquía de gestión de residuos (antes que el reciclaje y la valorización energética) porque retiene el máximo valor del material y de la energía invertida en su fabricación. Un producto plástico es reutilizable cuando cumple tres condiciones técnicas: cuenta con un diseño físico y mecánico suficiente para resistir múltiples ciclos de uso sin degradación funcional; dispone de un sistema logístico de retorno, limpieza y redistribución; y su huella ambiental por unidad funcional es inferior a la del producto de un solo uso equivalente, tras un número mínimo de usos (Altenburger et al., 2024).

En resumen, los términos presentados no son mutuamente excluyentes. Un mismo material puede ser descrito simultáneamente por varios de ellos porque cada término captura una dimensión diferente: el origen de la materia prima, el comportamiento al final de vida o la estrategia de sostenibilidad adoptada. La Tabla 3 ofrece un panorama consolidado de estas implicaciones y limitaciones para facilitar su comprensión de manera integrada.

Tabla 3

Consolidación terminología asociada a materiales sostenibles: implicaciones y limitaciones conceptuales

Término	Dimensión que lo define	Qué implica	Qué NO implica	Ejemplo
Biopolímeros	Origen	Materia prima de organismos vivos o recursos biológicos, sin petróleo como fuente principal	Biodegradabilidad ni compostabilidad (ej. Bio - PE no se biodegrada)	<i>PLA, PHA, bio-PE, celulosa</i>
Plásticos biobasados		Carbono de recursos biológicos renovables; menor huella de carbono en producción	Biodegradabilidad (bio-PE es idéntico al PE fósil en su comportamiento al final de vida)	<i>Bio-PE, bio-PET, PLA</i>
Materiales renovables		Materia prima regenerable en escala humana, no fósil	Que el material resultante sea plástico, biodegradable o reciclable	<i>Celulosa, bio-PE, fibras naturales</i>
Plásticos biodegradables	Fin de vida	Conversión en sustancias naturales por microorganismos bajo condiciones específicas	Compostabilidad (biodegradable ≠ compostable) ni origen renovable (PBAT es fósil y biodegradable)	<i>PLA, PBAT, PHA</i>
Hidrobiodegradables		Degradación iniciada por hidrólisis, luego mineralización microbiana	Degradación en cualquier entorno sin condiciones controladas	<i>PLA, PBS, PHA</i>
Plásticos compostables industrial		Degradación ≥ 90% en 180 días bajo condiciones termofílicas controladas (EN 13432, ASTM D6400)	Compostabilidad doméstica ni degradación en entorno natural	<i>PLA, PHA, mezclas TPS</i>
Plásticos compostables doméstico		Degradación a temperatura ambiente (20 - 30 °C) sin instalación industrial	Velocidad equivalente al compostaje industrial	<i>Mezclas PLA/TPS optimizados</i>
Plásticos reciclables	Estrategia de sostenibilidad	Recuperación y revalorización en ciclo técnico con infraestructura disponible	Biodegradabilidad ni origen renovable	<i>PET, HDPE, PP, bio-PET</i>
Plásticos reutilizables		Múltiples ciclos de uso sin reprocesamiento industrial intermedio	Biodegradabilidad ni reciclabilidad entre usos	<i>PP, PC, HDPE</i>

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas en la terminología, 2026.

El PLA ilustra con claridad esta superposición conceptual. Desde la dimensión del origen, es un biopolímero y un plástico biobasado, porque su monómero precursor, el ácido láctico, se obtiene mediante fermentación microbiana a partir de azúcares de cultivos renovables como maíz o caña de azúcar. Desde la dimensión del comportamiento al final de vida, es un plástico hidrobiodegradable y compostable industrial, ya que bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y actividad microbiana se transforma en dióxido de carbono, agua y biomasa. Ninguno de estos términos contradice a los demás: cada uno describe una propiedad distinta del mismo material.

Alternativas de Materiales Sostenibles para Aplicaciones de Un Solo Uso

A continuación, se muestra la Tabla 4, que presenta las principales alternativas de materiales de tipo sostenible en aplicaciones de un solo uso. Se pueden observar las características más relevantes de cada tipo de material, como sus propiedades, aplicaciones, sus ventajas y desventajas para lograr establecer una referencia comparativa con los plásticos de origen petroquímico.

Tabla 4

Alternativas de materiales sostenibles para aplicaciones de un solo uso

Nombre	Abreviatura	Propiedades físicas	Propiedades químicas	Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones
Ácido poliláctico	PLA	Densidad: 1.21 - 1.25 g/cm ³		• Vasos desechables compostables para bebidas frías		
		Punto de fusión: 150 - 180 °C	Resistencia química: buena frente a grasas y aceites; susceptible a hidrólisis en humedad + calor; soluble en CHCl ₃ , DCM y THF	• Cubiertos desechables compostables (tenedor, cuchara, cuchillo)	Bio-basado	Frágil (aprox. 6 % elongación)
		Tg: 55 - 60 °C		• Pitillos compostables	Biodegradable en compostaje industrial	Tg baja deformación en bebidas calientes
		Resistencia a la tracción: 59.2 MPa (ISO 527)	Estabilidad térmica: degradación acelerada por encima de Tg (55 - 60 °C) en presencia de humedad	• Platos y bandejas desechables compostables	Alta transparencia	Requiere compostaje industrial (NO doméstico habitual)
		Módulo de Young: aprox. 4.119 MPa Elongación a ruptura: aprox. 5.8 %		• Bolsas para alimentos y sándwiches de un solo uso	Baja toxicidad	
		Transparencia: alta en estado amorfo	Barrera: media a gases; inferior a PET	• Tapas de vasos compostables		Mayor costo que PP/PET
Polihidroxicanoatos	PHA/PHB/PHBV	Flexibilidad: rígido y quebradizo sin modificar		• Film compostable para envolver alimentos en mostradores y secciones deli		
		Densidad PHB: 1.18 - 1.26 g/cm ³	Resistencia química: insoluble en agua; soluble en solventes halogenados; resistente a UV	• Film compostable de un solo uso para envolver alimentos	Bio-basado (bacterias)	Costo de producción muy elevado
		Punto de fusión: 173 - 180 °C (PHB) / 40 - 180 °C (en general)		• Vasos y contenedores desechables de mayor rendimiento térmico que PLA	Biodegradable en suelo, marino e industrial	PHB frágil
		Resistencia a la tracción PHB: aprox. 40 MPa Módulo Young: aprox. 3.5 GPa	Estabilidad térmica: ventana de procesamiento estrecha (Tdeg aproximadamente igual a Tf en PHB)	• Bolsas de basura orgánica compostables y biodegradables	Buena barrera a gases	Ventana de procesamiento estrecha
		Transparencia: opaco (semi-cristalino)	Barrera: buenas propiedades barrera a O ₂ y compuestos aromáticos; aprobado FDA	• Cápsulas y cápsulas de café de un solo uso biodegradables	Biocompatible	Escala industrial limitada vs. PLA
		Flexibilidad: rígido y quebradizo (PHB); PHBV más flexible; MCL - PHA elastomérico		• Pitillos y cubiertos desechables de alta resistencia térmica	Propiedades similares a PP	
				• Envases de un solo uso para alimentos calientes		

Polibutileno adipato tereftalato	PBAT	Densidad: 1.21 - 1.26 g/cm³		• Bolsas de basura orgánica compostables (más resistentes que PLA solo)		
		Punto de fusión: 115 - 130 °C	Resistencia química: moderada a solventes comunes; degradable por esterases en compostaje industrial	• Bolsas de compra de un solo uso compostables	Altísima elongación (700 - 1238 %)	Baja resistencia a la tracción (aprox. 11 MPa)
		Resistencia a la tracción: aprox. 10.7 MPa		• Film compostable de envasado de frutas y verduras	Biodegradable	No bio-basado en versión convencional
		Módulo elástico: aprox. 87.7 MPa Elongación a ruptura: 700 - 1238 %	Estabilidad térmica: estable en ciclado mecánico (FTIR) estable tras 7 ciclos	• Bolsas de frutas y verduras en supermercados (con marcado compostable)	Compatible con PLA	Requiere compostaje industrial
		Transparencia: baja a media	Cristalinidad: baja; copoliéster aleatorio alifático-aromático	• Bandejas desechables compostables para alimentos frescos	Propiedades similares a LDPE	Mayor costo que LDPE
		Flexibilidad: muy alta; comportamiento similar a LDPE		• Film de cobertura compostable para bandejas de carne		
Polibutileno succinato	PBS	Densidad: 1.23 - 1.26 g/cm³		• Bolsas de un solo uso compostables para alimentos frescos	Biodegradable en suelo y compost	Baja estabilidad en reciclado mecánico (desde 2.º ciclo)
		Punto de fusión: 113 - 115 °C	Resistencia química: buena frente a aceites y grasas; susceptible a hidrólisis en entornos húmedos y calurosos	• Film compostable de envolver para sándwiches y bocadillos	Mejor ductilidad que PLA	Costo superior a poliolefinas
		Tg: aprox. -32 °C		• Bolsas de basura orgánica biodegradables	Tg baja: flexible a temperatura ambiente	Propiedades de barrera inferiores a PET
		Resistencia a la tracción: 20 - 40 MPa	Estabilidad térmica: propiedades mecánicas se reducen a partir del 2.º ciclo de extrusión	• Cubiertos desechables compostables (mezcla con PLA)		
		Elongación a ruptura: 200 - 400 %		• Film de cobertura de bandeja para alimentos compostable	Compatible con PLA	
		Transparencia: translúcido a blanco	Cristalinidad: semi-cristalino; mejor barrera que PLA amorfo			
		Flexibilidad: moderada; más dúctil que PLA				

Almidón termoplástico	TPS	Densidad: aprox. 1.2 - 1.4 g/cm ³ (variable según plastificante y fuente)	Resistencia química: alta higroscopicidad; susceptible a humedad	• Bolsas de compra compostables de un solo uso • Film compostable para envolver alimentos • Bolsas para frutas y verduras (supermercado) • Cubiertos desechables compostables (mezcla TPS/PLA) • 'Cacahuetes' de embalaje disolubles en agua (packing peanuts) • Film de cobertura compostable para bandejas de alimentos • Bolsas de basura para residuos orgánicos	100 % bio-basado y renovable	Alta sensibilidad a la humedad
		Resistencia a la tracción: 15 - 30 MPa (puro); hasta 30 - 60 MPa en mezclas con PLA	Estabilidad térmica: mejora con nanopartículas de arcilla y fibras celulósicas		Muy bajo costo (almidón abundante)	Retrogradación (aumento de rigidez con el tiempo)
		Elongación: hasta 154 % con aditivos (CaCO ₃ + sorbitol)	Barrera: pobre a vapor de agua; mejorable con recubrimientos o mezclas con PBS o PBAT		Biodegradable en suelo y compost	Baja resistencia mecánica pura (requiere Blends)
		Transparencia: variable (traslúcido a opaco)	Compatibilidad: miscible con PLA, PBS y PBAT para Blends funcionales		Compatible con maquinaria de procesamiento convencional	Propiedades de barrera deficientes
		Flexibilidad: alta con plastificantes (glicerol/sorbitol)				
Policaprolactona	PCL	Densidad: 1.10 g/cm ³	Resistencia química: hidrofóbico; resistente a la humedad; degradable por esterasas/lipasas microbianas (Firmicutes, Proteobacteria, hongos Penicillium y Aspergillus)	• Film compostable doméstico de un solo uso para envolver alimentos • Bolsas de basura orgánica biodegradables en suelo (sin necesidad de compostaje industrial) • Film de cobertura biodegradable para bandejas de alimentos frescos • Envolturas individuales biodegradables para alimentos (mezcla con PLA) • Bolsas de frutas y verduras biodegradables de supermercado	Biodegradable en suelo, marino y doméstico (NO requiere compostaje industrial)	Tf muy baja (aprox. 60 °C): inadecuado para alimentos calientes sin mezclas
		Punto de fusión: 58 - 64 °C Tg: -62 a -58 °C				
		Resistencia a la tracción: aprox. 14 - 23 MPa	Estabilidad térmica: degradación térmica aprox. 250 °C; ventana de procesamiento amplia		Muy alta elongación (700-800 %)	Origen petroquímico
		Elongación: 700 - 800 %	Biodegradabilidad: degradación completa en suelo y marino en semanas/meses; en entornos in vivo 2 - 3 años		Flexible a temperatura ambiente	Costo superior a LDPE
		Transparencia: translúcido				Degradación in vivo muy lenta (2-3 años) si se usa en implantes
		Flexibilidad: muy alta; polímero elastomérico y semicristalino			Biocompatible y aprobado FDA para dispositivos	

Polietileno bio-basado	Bio - PE	Densidad: 0.910 - 0.967 g/cm ³ (según tipo LDPE/HDPE)		• Bolsas de compra desechables (mismas aplicaciones que LDPE/HDPE)	Menor huella de carbono Reciclable en los mismos flujos que PE convencional Fuente renovable	NO biodegradable
		Punto de fusión: 105 - 140 °C (según variante)	Resistencia química: excelente vs. ácidos, álcalis y solventes polares	• Botellas de agua y bebidas de un solo uso (bio-HDPE)		No resuelve el problema de residuos plásticos
		Resistencia a la tracción: 8 - 38 MPa		• Tapas desechables de botellas		Mayor costo que PE convencional
		Transparencia: variable (traslúcido a opaco)	Estabilidad térmica: igual que PE fósil	• Film de envolver para alimentos frescos		Dependencia de cultivos energéticos
		Flexibilidad: de muy flexible (Bio-LDPE) a rígido (Bio-HDPE)		• Envases desechables para comida para llevar		
Polietileno tereftalato bio-basado	Bio - PET	Densidad: 1.33 - 1.39 g/cm ³	Resistencia química: buena vs. ácidos diluidos y alcoholes	• Botellas de agua desechables bio-basadas	Reciclable en mismos flujos que PET convencional Menor huella de carbono Transparencia y barrera equivalentes a PET fósil	Solo aprox. 30 % bio-basado en versiones comerciales actuales
		Punto de fusión: aprox. 250 °C Tg: 75 - 80 °C	Barrera: buena a O ₂ y CO ₂	• Botellas de refrescos y bebidas carbonatadas bio-basadas		NO biodegradable
		Resistencia a la tracción: 55 - 75 MPa		• Vasos desechables para bebidas frías		No resuelve el problema de residuos
		Transparencia: alta (amorfo)	Estabilidad térmica: igual que PET fósil	• Film blíster para alimentos (versión bio)		Mayor costo que PET convencional
				• Bandejas para ensaladas y alimentos preparados (versión bio)		

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, (Bianchi et al., 2023; Deshpande et al., 2023; Dmitruk et al., 2023; Miu et al.,

2022; Naser et al., 2021; Nomadolo et al., 2024; Sehgal & Gupta, 2020; Siracusa & Blanco, 2020; Surendren et al., 2022), 2026.

Es de aclarar que, ningún material representa una solución ideal por sí solo. La transición hacia alternativas sostenibles requiere, no solo de la mejora en las formulaciones, sino también el desarrollo de sistemas de gestión de residuos adaptados a las propiedades de degradación específicas de cada material, políticas regulatorias claras y una mayor inversión en infraestructura de compostaje industrial.

Evaluación Ambiental para Plásticos de un Solo Uso

El aumento de la presión ambiental y regulatoria, sobre los efectos de la contaminación, han promovido la investigación de alternativas y herramientas analíticas que permitan evaluar el desempeño ambiental de los PSU. En este contexto, tres marcos conceptuales han adquirido relevancia: el análisis de ciclo de vida (ACV), los estándares de compostabilidad para materiales alternativos y los modelos de economía circular aplicados al sistema de producción y gestión de residuos plásticos.

Análisis de Ciclo de Vida

Según Larasati et al. (2024), es una de las metodologías más aplicadas para evaluar los impactos ambientales de productos a lo largo de su existencia, desde la extracción hasta su disposición final. Las normas ISO 14040 (principios y marco de referencia) e ISO 14044 (define cómo ejecutar un ACV de manera detallada y verificable) establecen cuatro fases metodológicas:

Definición del Objetivo y Alcance, donde se precisan la unidad funcional, los límites del sistema y las categorías de impacto.

Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), que cuantifica los flujos de materia y energía.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), que transforma los datos del inventario en indicadores de impacto como el potencial de calentamiento global (GWP) o el agotamiento de recursos.

Interpretación, donde se integran los hallazgos y se identifican las limitaciones del estudio.

En aplicaciones de un solo uso, los envases PET constituyen uno de los materiales más estudiados, especialmente en el caso de botellas para bebidas. La elección del PET como material mejor documentado se justifica por factores como: alta producción global en

aplicaciones de envasado, amplia disponibilidad de datos industriales y bases de datos de ACV y relevancia en políticas de reciclaje y economía circular (Jeswani et al., 2021).

Por ejemplo, estudios indican que el uso de PET reciclado (rPET) puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre 30 % y 70 % en comparación con el PET virgen, dependiendo de la eficiencia del sistema de reciclaje (Hahladakis & Iacovidou, 2018).

Normas y Estándares de Compostabilidad

Establecen los criterios técnicos bajo los cuales un plástico puede ser certificado como compostable industrialmente, es decir, capaz de biodegradarse y desintegrarse en condiciones controladas de temperatura, humedad y actividad microbiana características de una planta industrial de compostaje. Tres normas son las más referenciadas y aplicadas:

ISO 17088:2021: Especificaciones para Plásticos Compostables. Establece los requisitos para que un plástico sea calificado como compostable en los siguientes cuatro aspectos: desintegración; biodegradación aeróbica; ausencia de efectos adversos en el compost producido y control de los constituyentes. Técnicamente es equivalente a la ASTM D6400 y constituye la referencia internacional de uso preferente en mercados fuera de Europa y Norteamérica (ISO, 2021).

EN 13432:2001: Requisitos para el Embalaje Recuperable Mediante Compostaje y Biodegradación. Es la norma armonizada del Comité Europeo de Normalización (CEN) y la más exigida en los mercados europeos para la certificación de materiales de empaque compostables. Sus criterios son equivalentes a los de ISO 17088 en cuanto a biodegradación (≥ 90 % en 180 días) y desintegración, pero añade requisitos específicos sobre el contenido mínimo de sólidos volátiles (≥ 50 %) y una evaluación ecotoxicológica del compost resultante mediante ensayos con plantas (Mhaddolkar et al., 2025).

ASTM D6400-21: Especificación Estándar para el Etiquetado de Plásticos Diseñados para ser Compostados Aeróbicamente en Instalaciones Municipales o

Industriales. Emitida por ASTM, esta norma es la referencia principal en el mercado norteamericano. Técnicamente equivalente a ISO 17088, establece especificaciones para plásticos diseñados para ser compostados en instalaciones industriales. Esta norma se centra principalmente en envases y productos desechables fabricados con polímeros biodegradables (ASTM, 2021b).

Los estándares de compostabilidad cumplen varias funciones dentro de la transición hacia materiales alternativos: garantizan la degradación en sistemas de compostaje controlado, evitan la presencia de sustancias tóxicas en el compost y facilitan la certificación y el etiquetado de productos. Sin embargo, la efectividad de los plásticos compostables depende de la disponibilidad de infraestructura de compostaje industrial, la cual aún es limitada en muchos países (Comisión Europea, 2022).

Economía Circular y Plásticos de un Solo Uso

Es un modelo de producción y consumo que busca mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible, reduciendo la generación de residuos y el consumo de recursos naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Alrededor de la economía circular se han desarrollado diferentes modelos, dentro de los principales están:

Nueva Economía de los Plásticos. Por Ellen MacArthur Foundation y desarrollado en colaboración con el Foro Económico Mundial y con apoyo analítico de McKinsey & Company, este marco reconceptualiza el flujo global de plásticos como un sistema que puede volverse circular mediante tres estrategias convergentes: eliminar el plástico problemático e innecesario a través del rediseño; innovar en los modelos de negocio para que los plásticos sean reutilizables, reciclables o compostables y escalar la circulación de los plásticos manteniendo sus materiales en la economía (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Marco ReSOLVE. Por la Ellen MacArthur Foundation y McKinsey, el marco ReSOLVE operacionaliza las estrategias circulares en seis acciones: Regenerar (restaurar capital natural), Compartir (maximizar el uso de activos), Optimizar (mejorar el rendimiento de productos y procesos), Ciclar (mantener materiales y componentes en uso), Virtualizar (desmaterializar servicios) e Intercambiar (reemplazar materiales y tecnologías convencionales) (Iyer-Raniga, 2019).

De la Cuna a la Cuna - Cradle to Cradle (C2C). Según McDonough y Braungart, el modelo C2C propone que todos los materiales deben fluir en ciclos continuos de dos tipos: el ciclo biológico, en el que los materiales de base orgánica regresan a la biosfera como nutrientes sin residuos tóxicos, y el ciclo técnico, en el que los materiales sintéticos de alto valor se mantienen en circulación indefinida mediante sistemas de recuperación y reciclaje de calidad. Para los PSU, C2C implica que los empaques de base biológica (PLA, PHA) deben ser diseñados para integrarse al ciclo biológico mediante compostaje certificado, mientras que los empaques sintéticos (PET, HDPE) deben diseñarse para el ciclo técnico con reutilización y reciclaje de alta calidad (Tang, 2025).

La economía circular implica rediseñar los sistemas industriales para optimizar el uso de los recursos y minimizar los residuos. Ejemplos relevantes incluyen: sistemas de reciclaje mecánico de polímeros, procesos de reciclaje químico, uso de biopolímeros compostables en aplicaciones específicas (Hahladakis & Iacovidou, 2018).

La afinidad entre el ACV, las normas de compostabilidad y la economía circular no es solo conceptual; se articula en un sistema de retroalimentaciones técnicas y normativas que solo puede comprenderse de forma integrada. Sin embargo, existen brechas como: limitada disponibilidad de datos de ACV para materiales alternativos, lo que dificulta la comparación objetiva con plásticos convencionales; la dependencia y falta de infraestructura de gestión de residuos e integrar mejor el ACV en las políticas de economía circular, ya que ciertas

estrategias de sustitución de materiales pueden generar impactos ambientales en otras etapas del ciclo de vida si no se evalúan adecuadamente (Comisión Europea, 2022; Hahladakis & Iacovidou, 2018; Jeswani et al., 2021).

Marco Normativo Sobre Plásticos de un Solo Uso en Colombia

La evidencia científica acerca de la contaminación por PSU, ha impulsado un cambio en las políticas públicas hacia enfoques de economía circular, responsabilidad extendida del productor (REP) y reducción en la fuente, particularmente en relación con envases y empaques plásticos. Estas estrategias buscan disminuir la producción de residuos mediante prohibiciones graduales de productos problemáticos, promoción del reciclaje y sustitución por materiales reutilizables o compostables (Nielsen et al., 2019; PNUMA, 2021b).

En el caso de Colombia, el debate regulatorio se intensificó a raíz de la creciente generación de residuos plásticos y de su impacto ambiental. El país ha desarrollado un marco normativo progresivo que combina instrumentos de gestión de residuos, la responsabilidad del productor y restricciones directas a ciertos productos de plástico de un solo uso. La culminación de este proceso regulatorio se materializa en la Ley 2232 de 2022, que establece la reducción gradual y prohibición de varios productos plásticos de un solo uso hasta el año 2030 (Cancillería, 2022).

La Tabla 5 presenta, en orden cronológico, los instrumentos normativos y de política pública en Colombia relacionados directa o indirectamente con los PSU, desde el marco fundacional del derecho ambiental (1974) hasta los lineamientos más recientes (2026). Incluye CONPES, leyes, decretos, resoluciones y planes nacionales.

Tabla 5

Resumen normativo acerca de los plásticos en Colombia

Política	Nombre oficial	Breve Descripción	Vigencia	Fuente
Resolución DIAN 000005/2026	Por la cual se establece la forma en la que se declara y paga el Impuesto Nacional sobre Productos Plásticos de un Solo Uso en la Importación (IPUSUI)	Precisa exclusiones, definiciones técnicas de envase, empaque y embalaje, el concepto de PSU y la documentación que deben conservar los importadores para sustentar las exclusiones del impuesto. El Ministerio de Ambiente delimita su competencia a la emisión de conceptos ambientales; la liquidación y fiscalización del impuesto es competencia exclusiva de la DIAN.	Vigente	(Ambiente, 2026)
Resolución 591 de 2024	Por la cual se adopta el Manual para la Gestión Integral de Residuos Generados en la Atención en Salud y Otras Actividades	Regula los materiales plásticos que pueden estar en contacto con alimentos, estableciendo requisitos sanitarios y de seguridad alimentaria.	Vigente	(Ministerio de Salud y Protección Social, 2024)
Resolución 0803 de 2024	Por la cual se desarrollan parcialmente las disposiciones de la Ley 2232 de 2022, sobre la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso, el artículo 2.2.7C.7 del Decreto 1076 de 2015 que establece medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos plásticos de un solo uso y se adoptan otras disposiciones	Detalla los procedimientos, plazos específicos y mecanismos de implementación para la reducción de plásticos de un solo uso. Establece metas específicas como 80% de materia prima reciclada en construcción para 2025, aumentando a 90% para 2030.	Vigente	(Ambiente, 2024b)
Decreto 2192 de 2023	Por el cual se adiciona el Decreto N° 1076 de 2015 en desarrollo de lo dispuesto en la Ley 2232 de 2022	Reglamenta los artículos 12, 16 y 34 de la Ley 2232/2022. Formaliza la prohibición de ingreso de plásticos de un solo uso a todo el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), Sistema Regional de Áreas Protegidas, humedales Ramsar, ecosistemas de páramos, marinos sensibles y reservas de biósfera. Establece excepciones para comunidades y guardaparques residentes. Define responsabilidades para fortalecer la cadena de valor con recicladores de oficio y lineamientos de biodegradabilidad y compostabilidad.	Vigente	(SUIN Juriscol, s/f)

Ley 2277 de 2022	Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria para la igualdad y la justicia social y se dictan otras disposiciones	En sus artículos 50 a 53 crea el IPUSUI utilizados para envasar, embalar o empacar bienes. El hecho generador es la venta, el retiro para consumo propio o la importación de dichos productos. La tarifa es de 0,00005 UVT por gramo de envase o empaque plástico. El recaudo y administración del impuesto corresponde a la DIAN. La Sentencia C-506 de 2023 de la Corte Constitucional declaró exequible el artículo 51, y la Sentencia C-099 de 2025 amplió su alcance a todas las importaciones de bienes con empaques PSU.	Vigente	(SUIN Juriscol, s/f)
Ley 2232 de 2022	Por la cual se establecen medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso y se dictan otras disposiciones.	Ley marco que establece la prohibición gradual de PSU en Colombia. Define cronograma de prohibiciones iniciando con 6 productos a partir del 7 de julio de 2024. Establece metas de reciclaje para botellas PET (50% para 2025).	Vigente	(Ambiente, 2022)
Resolución 1342 de 2020	Por la cual se modifica la Resolución 1407 de 2018	Ajusta metas y requisitos del sistema de REP para envases y empaques.	Vigente	(Ambiente, 2020)
Resolución 2184 de 2019	Por la cual se modifica la Resolución 668 de 2016 y se establece el código de colores para la separación de residuos en la fuente	Define el sistema nacional de separación de residuos en la fuente mediante código de colores, fortaleciendo la gestión de residuos reciclables.	Vigente	(Ambiente, 2019)
Estrategia Nacional de Economía Circular – ENEC	Estrategia Nacional de Economía Circular	Instrumento de política pública formulado conjuntamente por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Busca impulsar la transformación de los sectores productivos del país de esquemas lineales hacia modelos circulares, en concordancia con los compromisos internacionales de Colombia y las políticas nacionales de gestión integral de residuos. No tiene carácter normativo vinculante sino de orientación estratégica.	Vigente	(Gobierno de la Republica de Colombia, 2019)
Resolución 1407 de 2018	Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones	Establece el régimen de responsabilidad extendida del productor para envases y empaques plásticos. Define planes de gestión ambiental y metas de aprovechamiento progresivas.	Vigente con modificaciones	(Ambiente, 2018)

Decreto 2198 de 2017	Por el cual se modifica y adiciona el Decreto Único Reglamentario en Materia Tributaria en relación con el Impuesto Nacional al Consumo de Bolsas Plásticas	Reglamenta las tarifas diferenciales del artículo 512-15 del Estatuto Tributario y los requisitos técnicos para la certificación de bolsas que ofrecen soluciones ambientales (biodegradables y reutilizables). Define criterios de biodegradabilidad (mínimo 30 % según normas NTC, ASTM, ISO) y establece que la certificación debe ser emitida por la ANLA, con vigencia anual.	Vigente	(SUIN Juriscol, s/f)
Ley 1819 de 2016 (art. 207)	Por la cual se reglamenta el uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones	Primera norma específica en Colombia sobre bolsas plásticas. Obliga a los grandes distribuidores (almacenes de cadena, supermercados, farmacias de cadena) a formular e implementar un Programa de Uso Racional de Bolsas Plásticas en puntos de pago. Establece restricciones de tamaño y calibre mínimo, así como mensajes educativos obligatorios. Fue derogada a partir del 7 de julio de 2024 por la Resolución 803 de 2024.	Derogada	(SUIN Juriscol, s/f)
Resolución 668 de 2016	Por la cual se reglamenta el uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones	Establece programas obligatorios para el uso racional de bolsas plásticas en establecimientos comerciales y promueve su reducción progresiva.	Derogada	(Ambiente, 2016)
CONPES 3874 de 2016	Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos	Define lineamientos estratégicos para mejorar la gestión de residuos sólidos en Colombia, promover el aprovechamiento y fortalecer la economía circular.	Vigente (política pública)	(CONPES, 2016)
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Compila la normativa ambiental colombiana e integra disposiciones sobre gestión de residuos, prevención de contaminación y regulación ambiental.	Vigente	(SUIN Juriscol, s/f)

CONPES 3530 de 2008	Lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de los residuos sólidos	Primer documento de política pública del CONPES enfocado en la gestión integral de residuos sólidos (MAVDT, CRA, DNP, 23 de junio de 2008). Define cinco objetivos: desarrollo normativo, condiciones técnicas del aseo, fortalecimiento empresarial municipal, eficiencia financiera y esquemas organizados de aprovechamiento y reciclaje. Aunque no menciona los plásticos de forma específica, sienta las bases institucionales del servicio público de aseo sobre las que se aplican hoy las restricciones de la Ley 2232/2022.	Vigente	(CONPES, 2008)
Decreto 1713 de 2002	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos	Marco general para la gestión integral de residuos sólidos, incluyendo residuos plásticos. Establece principios de manejo sostenible y responsabilidades de los actores.	Derogado (integrado posteriormente en el Decreto 1077 de 2015 del sector vivienda)	(Función Pública, 2002)
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reorganiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones	Crea la institucionalidad ambiental moderna en Colombia y establece los principios de política ambiental que orientan la gestión de residuos y la prevención de la contaminación.	Vigente parcialmente	(SUIN Juriscol, s/f)
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Marco jurídico fundamental que incluye disposiciones sobre contaminación por residuos sólidos, incluyendo plásticos. Base constitucional del derecho ambiental colombiano.	Vigente parcialmente (marco general ambiental)	(Función Pública, 1974)

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

El análisis del marco normativo colombiano evidencia una evolución progresiva desde regulaciones generales de protección ambiental hacia instrumentos específicos de reducción de PSU, y refleja una transición hacia políticas ambientales más integrales y alineadas con la economía circular, que combinan instrumentos regulatorios, fiscales y de responsabilidad extendida del productor (REP). La consolidación de la regulación sobre plásticos de un solo uso dependerá de la articulación entre el Estado, el sector productivo y la ciudadanía, así como del fortalecimiento de las infraestructuras de reciclaje y de la innovación en materiales sostenibles.

Marco Normativo Internacional Sobre Plásticos de un Solo Uso

Para el desarrollo del marco normativo internacional, se propone realizar un análisis bibliométrico, que nos permita conocer las tendencias y la evolución con respecto de la temática de los PSU. El análisis se hará en dos bloques: el primero, a nivel mundial para conocer cuáles son los principales países vinculados al desarrollo de estrategias para contrarrestar los efectos de los PSU y luego, un segundo bloque, pero enfocado en América Latina, para saber con qué países de la región nos podríamos comparar.

Luego de realizar el análisis bibliométrico, se procederá a elaborar las tablas comparativas de las principales políticas, estrategias y/o alianzas, tanto a nivel mundial como en América Latina.

Análisis Bibliométrico

Es una herramienta importante en los procesos de desarrollo investigativo, que permite analizar de manera cuantitativa las publicaciones científicas, evaluando tendencias y patrones del campo específico en estudio. Lo anterior, teniendo en cuenta factores como la cantidad de publicaciones, citaciones, autores, revistas relevantes e incluso vacíos temáticos (Donthu et al., 2021).

Para este análisis bibliométrico se utilizarán las herramientas Scopus y VOSviewer. La primera, se caracteriza por ser una de las bases de datos bibliográficas más completas a nivel mundial, reconocida por su cobertura multidisciplinaria y rigurosos criterios de indexación (Elsevier, 2025). Para el caso de VOSviewer, es una herramienta basada en la visualización de similitudes (VOS - Visualization of Similarities), que permite analizar de manera visual redes bibliométricas (Campos, 2023).

A continuación, se presenta el análisis realizado en conjunto con las herramientas bibliométricas.

Scopus – Nivel Global. Se realizó un proceso exploratorio entre diferentes ecuaciones de búsqueda, con la finalidad de encontrar la más óptima para el análisis bibliométrico y que, además, se adaptara mejor a la temática investigada. Una búsqueda preliminar definida como, “single AND use AND plastics AND biomaterials AND bioplastics AND biopolymers”, está relacionada con las palabras claves utilizadas en la definición de los términos para materiales sostenibles, que fueron tratados en el desarrollo del marco teórico. El resultado, 6 documentos entre el 2020 y 2026.

Según lo analizado en el marco teórico, es usual utilizar indistintamente los términos asociados a materiales sostenibles, como biomateriales, bioplásticos, plásticos biodegradables y biopolímeros. Por esta razón, se añade a la ecuación de búsqueda mediante el operador booleano OR para combinar estos términos. Adicionalmente, se incorporan variantes del términos “plásticos de un solo uso” y palabras clave relacionadas con políticas, regulaciones, economía circular y alternativas sostenibles. Finalmente, la ecuación de búsqueda con la cual se realizó el análisis bibliométrico entre los años 2020 y 2026, quedo definida como, ("single-use plastic*" OR "single use plastic*" OR "SUP" OR "one-use plastic*") AND ("regulat*" OR "legislat*" OR "environmental policy" OR "international alliance*" OR "circular economy" OR "extended producer responsibility" OR "EPR" OR "producer responsibility" OR "sustainable alternative*" OR "bioplastic*" OR "biodegradable" OR "waste reduction" OR "recycling policy"), la cual arrojó 1344 resultados. Cantidad, que se cree adecuada para el soporte investigativo del trabajo. En la Figura 13, se muestran los resultados de las dos ecuaciones propuestas.

Figura 13

Resultados de las ecuaciones de búsqueda en Scopus

TITLE-ABS-KEY (single AND use AND plastics AND biomaterials AND bioplastics AND biopolymers) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2027 **6 results**
[Show less](#) ^

TITLE-ABS-KEY (("single-use plastic*" OR "single use plastic*" OR "sup" OR "one-use plastic*") AND ("regulat*" OR "legislat*" OR "environmental policy" OR "international alliance*" OR "circular economy" OR "extended producer responsibility" OR "epr" OR "producer responsibility" OR "sustainable alternative*" OR "bioplastic*" OR "biodegradable" OR "waste reduction" OR "recycling policy")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2027 **1,344 results**
[Show less](#) ^

Nota: Adaptado de la búsqueda realizada en Scopus, 2026.

Documentos por Año. Muestra una tendencia creciente en la producción científica sobre plásticos de un solo uso y estrategias regulatorias entre 2020 y 2026, ver Figura 14. En 2020 se registran aproximadamente 115 publicaciones, cifra que aumenta significativamente en 2021 con cerca de 200 documentos, lo que evidencia un incremento del interés académico en la temática. Este crecimiento continúa en 2022 y 2023, cuando la producción se mantiene relativamente estable en torno a 215–220 publicaciones, lo que indica una fase de consolidación del campo de investigación.

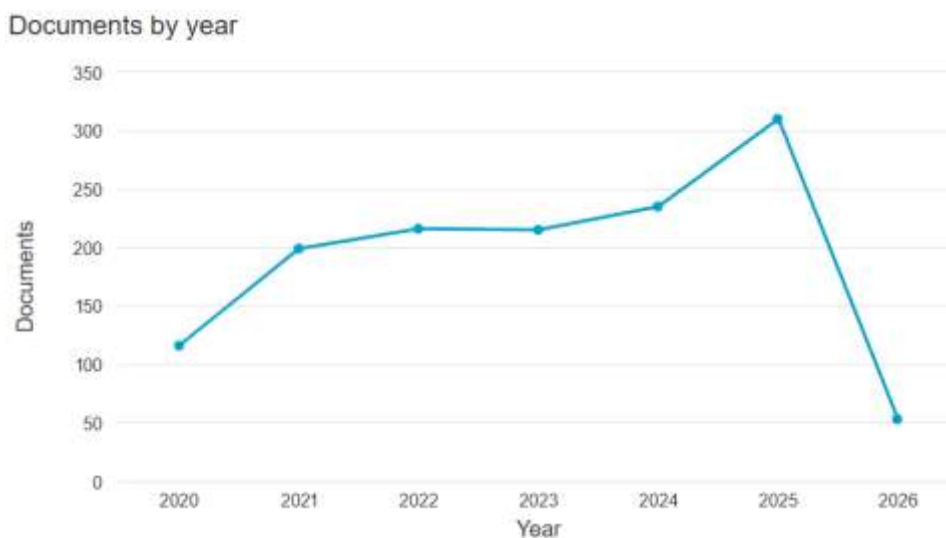
A partir de 2024 se observa un nuevo impulso, alcanzando cerca de 235 publicaciones, y culminando en 2025 con el mayor número de documentos (más de 300). Este aumento puede asociarse al fortalecimiento de las políticas internacionales sobre la reducción de plásticos, la economía circular y la REP, que han impulsado el desarrollo de investigaciones en el área.

En general, la tendencia evidencia un interés creciente a nivel global en abordar el problema de los PSU mediante enfoques regulatorios, tecnológicos y de sostenibilidad.

El 2026, evidentemente muestra una disminución porque el año se todavía encuentra en curso (marzo 2026), sin embargo, al primer trimestre ya se muestra una producción de 53 documentos.

Figura 14

Documentos por año - Global



Nota: Adaptado de la búsqueda realizada en Scopus, 2026.

Documentos por Área Temática. Se evidencia el carácter multidisciplinario de la investigación sobre PSU, ver Figura 15. La mayor concentración de publicaciones se ubica en Ciencias Ambientales (18,4%), lo que indica que el problema se aborda principalmente desde la perspectiva del impacto ambiental, la gestión de residuos y la sostenibilidad.

En segundo lugar aparece Ingeniería (9,1%), lo que refleja el interés en soluciones técnicas relacionadas con gestión de residuos, procesos de reciclaje y el desarrollo de alternativas materiales. Otras áreas relevantes son Medicina (7,9%), Bioquímica y Genética (7,4%) y Agricultura (7,0%), lo cual sugiere que la investigación también analiza efectos sobre salud humana, contaminación por microplásticos y aplicaciones de biomateriales de origen biológico.

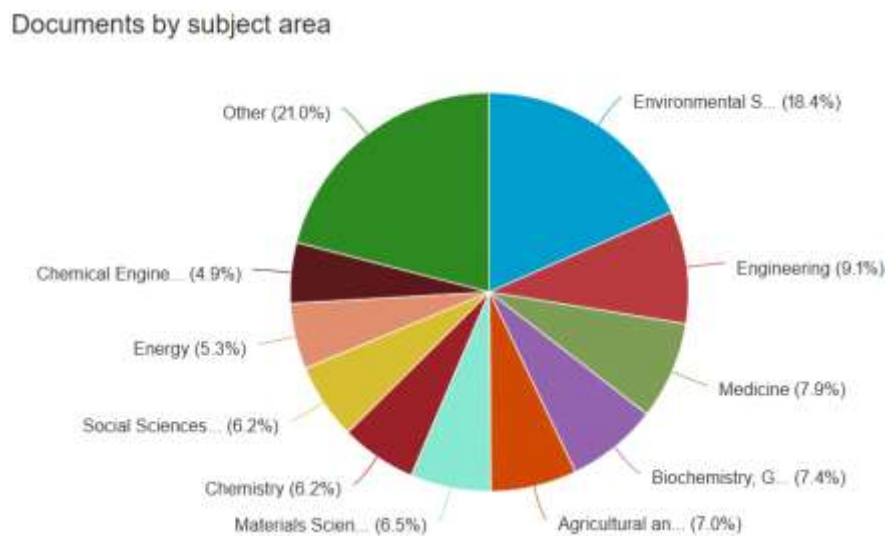
Las áreas de Ciencia de Materiales (6,5%), Química (6,2%) y Ciencias Sociales (6,2%) muestran que el debate integra tanto el desarrollo de nuevos materiales y bioplásticos como el

estudio de políticas públicas, la regulación y el comportamiento social frente al consumo de plásticos.

Finalmente, las contribuciones en Energía (5,3%) e Ingeniería Química (4,9%) evidencian interés en valorización energética, el reciclaje químico y los procesos industriales. En conjunto, la distribución confirma que la problemática de los PSU requiere enfoques ambientales, tecnológicos y socioeconómicos integrados.

Figura 15

Documentos por área temática – Global



Nota: Adaptado de la búsqueda realizada en Scopus, 2026.

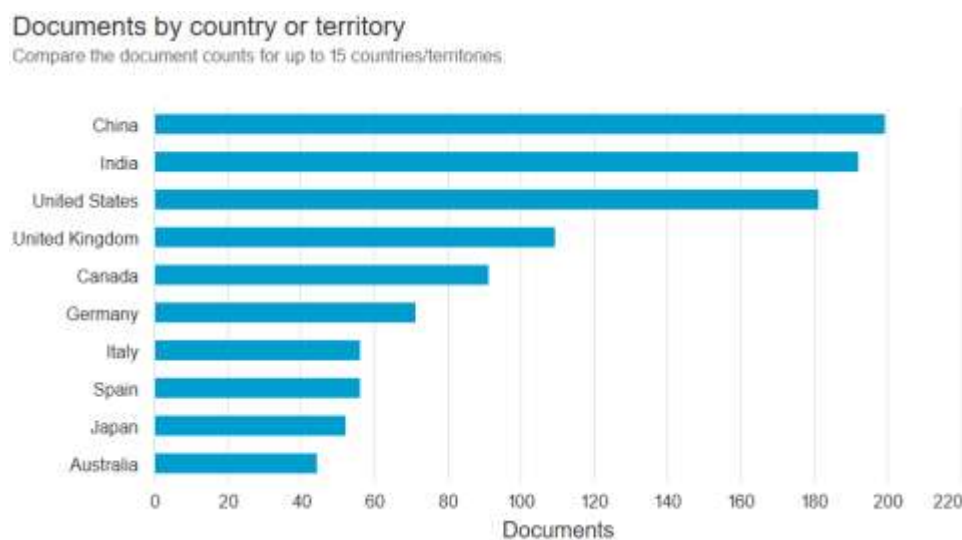
Documentos por País. Se observa una clara concentración de la producción científica en economías con alta capacidad investigativa y una fuerte participación en la agenda ambiental global (ver Figura 16). China lidera la producción con aproximadamente 200 publicaciones, seguida de India con cerca de 190 y de Estados Unidos con alrededor de 180 documentos. Este liderazgo refleja tanto el tamaño de sus sistemas científicos como la relevancia del problema de los plásticos en sus contextos industriales y ambientales.

En un segundo nivel se ubican Canadá y los países europeos, destacándose el Reino Unido con aproximadamente 110 publicaciones, seguido de Canadá (cerca de 90) y Alemania (alrededor de 70). Estos países se caracterizan por impulsar políticas avanzadas relacionadas con la economía circular, la reducción de residuos plásticos y la REP. Otros países, como Italia, España, Japón y Australia presentan entre 45 y 60 contribuciones, lo que evidencia una participación científica relevante aunque menor.

En conjunto, la distribución geográfica sugiere que la investigación sobre PSU está liderada por Asia, América del Norte y Europa, regiones que también han desarrollado marcos regulatorios y estrategias internacionales para reducir el impacto ambiental de estos materiales. Es pertinente mencionar, que ningún país latinoamericano aparece en el top 10, dato que justifica metodológicamente la necesidad de un análisis específico para la región.

Figura 16

Documentos por país - Global



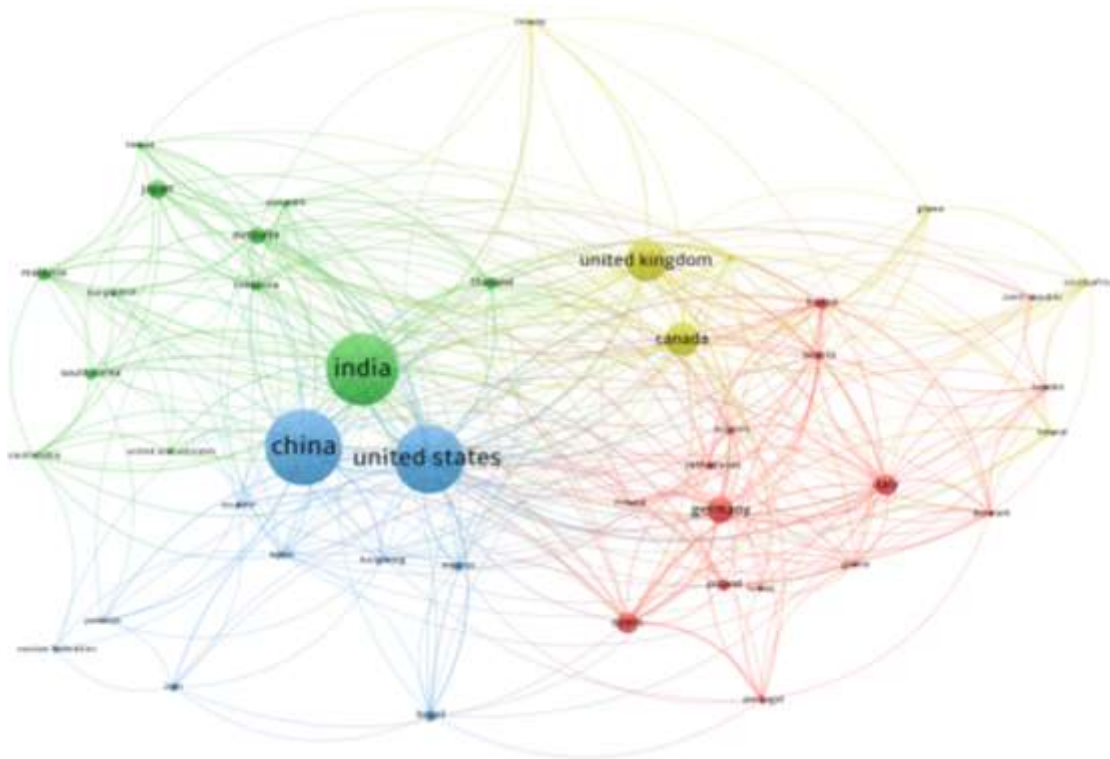
Nota: Adaptado de la búsqueda realizada en Scopus, 2026.

VOSviewer – Nivel Global. El análisis de redes realizado con VOSviewer permite identificar patrones de colaboración científica y tendencias temáticas en la literatura sobre PSU.

En la Figura 17, correspondiente a la red de coautoría por países, se observan varios clústeres que reflejan comunidades de colaboración científica. El clúster azul, liderado por China y Estados Unidos, concentra una parte importante de la producción científica y actúa como nodo central que conecta con otros países como Brasil y México. El clúster verde, dominado por India, incluye principalmente países asiáticos como Japón, Indonesia, Malasia y Australia, lo que evidencia una fuerte red regional de investigación. Por su parte, el clúster rojo agrupa a países europeos como Alemania, Italia, España y los Países Bajos, lo que evidencia una colaboración consolidada en Europa. Finalmente, el clúster amarillo, centrado en Reino Unido y Canadá, actúa como un puente entre las redes europeas y otras regiones. Esta estructura evidencia que la investigación sobre PSU se organiza en redes geográficas de cooperación científica, con Asia, Europa y América del Norte como principales polos de producción.

Figura 17

Red de coautorías por países – Global



Nota: Adaptado del análisis realizado en VOSviewer, 2026.

En la Figura 18, que muestra la coocurrencia de palabras clave, se identifican dos grandes clústeres temáticos. El clúster rojo se centra en aspectos ambientales y de gestión de residuos, destacando términos como plastic waste, single use, circular economy, plastic pollution y sustainability. Este grupo refleja investigaciones orientadas a políticas públicas, a la economía circular y a la mitigación de impactos ambientales. El clúster verde, en cambio, está asociado a estudios de carácter biomédico y experimental, en los que aparecen términos como controlled study, metabolism, genetics y cell proliferation, lo que indica investigaciones sobre los impactos biológicos y toxicológicos de los plásticos y microplásticos.

Figura 18

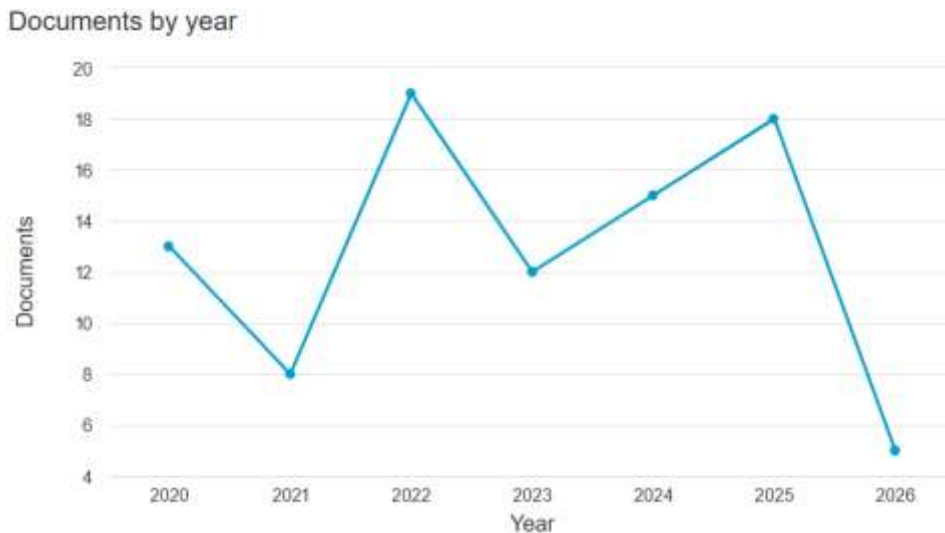
[illegible]

Scopus – América Latina. Se utilizó la misma ecuación de búsqueda, pero filtrada a los países de la región. El resultado, bastante inquietante, si se compara con la producción a nivel mundial, solo 90 documentos entre los años 2020 y 2026.

Documentos por Año. La tendencia latinoamericana contrasta significativamente con el patrón global y revela la poca investigación sobre la temática: véase la Figura 19. Incluso para el año 2022, el pico más alto de publicaciones, con 19 documentos, es apenas lo que aproximadamente a nivel global se maneja en un mes. Esto confirma cuantitativamente la brecha en la producción científica regional.

Figura 19

Documentos por año - América Latina



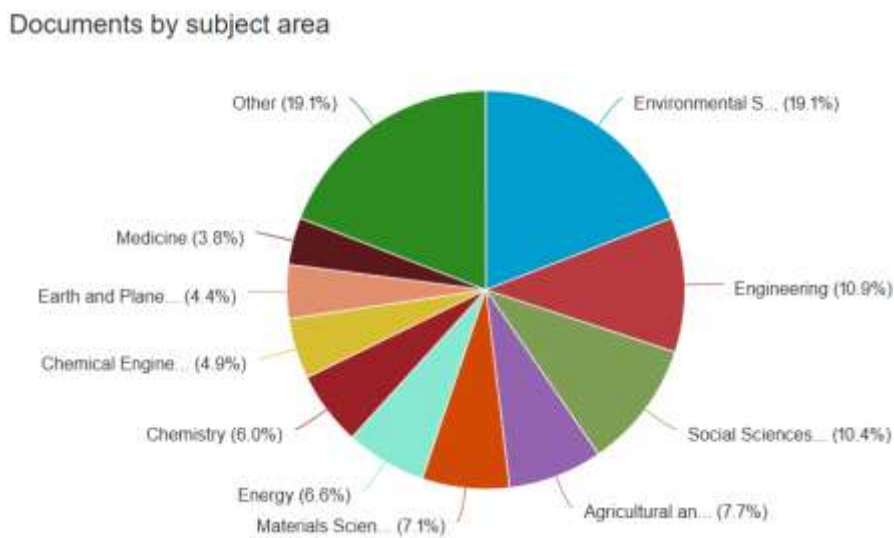
Nota: Adaptado de la búsqueda realizada en Scopus, 2026.

Documentos por Área Temática. La distribución latinoamericana presenta diferencias con respecto al patrón global que merecen atención analítica, ver Figura 20. Por ejemplo, Environmental Science (19.1%) mantiene el liderazgo, porcentaje idéntico al del análisis global.

Sin embargo, el hallazgo más significativo: Social Sciences (10.4%) ocupa el tercer lugar en América Latina, frente al modesto 6.2% a nivel global. Este salto puede indicar que la investigación latinoamericana sobre PSU tiene una orientación más marcada hacia el análisis de la política pública y del impacto social.

Figura 20

Documentos por área - América Latina



Nota: Adaptado de la búsqueda realizada en Scopus, 2026.

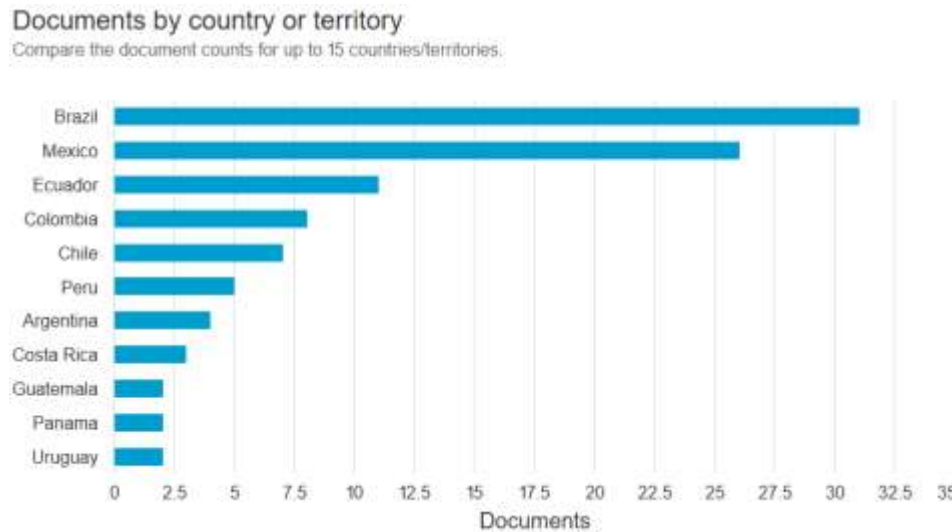
Documentos por País. El ranking regional confirma una concentración pronunciada en tres países con una larga cola de producción marginal, ver Figura 21.

Brasil y México, con 31 y 26 documentos, respectivamente, dominan de forma contundente y representan juntos aproximadamente el 60% de la producción latinoamericana. Ambos aparecían, además, en el mapa global de VOSviewer, lo que confirma su rol como los únicos nodos latinoamericanos con visibilidad internacional real. Ecuador con alrededor de 11 documentos, está en el tercer lugar, superando a países más grandes como Colombia, Chile y Argentina.

Colombia, con 8 documentos y Chile con 7, ocupan el cuarto y el quinto lugar respectivamente. Ambos países cuentan con marcos normativos sobre PSU entre los más avanzados de la región, lo que evidencia la desconexión entre la actividad legislativa y la producción académica.

Figura 21

Documentos por país - América Latina



Nota: Adaptado de la búsqueda realizada en Scopus, 2026.

VOSviewer – América Latina. Este mapa de la Figura 22, debe entenderse como una señal de alerta sobre el estado de la colaboración científica regional. Dada la escasa producción, se considera que este es el análisis más representativo que se puede hacer con VOSviewer.

Figura 22

Red de coautorías por países



Nota: Adaptado de análisis realizado en VOSviewer, 2026.

Cinco países únicamente superaron el umbral mínimo de coautorías para figurar en el mapa: Brasil, México, Colombia, Ecuador y Perú. El resto del ranking regional (Argentina, Chile,

Costa Rica, Guatemala, Panamá, Uruguay) no alcanzó conexiones suficientes para ser representado, lo que confirma su aislamiento investigativo.

La red es extremadamente débil estructuralmente, Brasil y México son los únicos nodos con tamaño relevante, confirmando su liderazgo regional. Sin embargo, su conexión entre sí es sorprendentemente débil, lo que indica que cada uno colabora más con países fuera de la región (clúster azul global de la Figura 17).

Colombia aparece como nodo periférico con un único vínculo visible hacia Brasil, lo que evidencia que, su proyección en redes de investigación internacional sobre PSU es aún incipiente, es más normativo.

Para América Latina y Colombia, representa una brecha, pero también una oportunidad para posicionar la investigación en redes regionales e internacionales.

Principales Estrategias Internacionales

El análisis bibliométrico realizado mediante la base de datos Scopus y VOSviewer, en el período 2020 – 2026, arrojó resultados de documentos en el que China, India y Estados Unidos ocupan los tres primeros lugares en producción científica a nivel mundial.

A pesar de esta posición de liderazgo académico, no implica un desempeño equivalente en materia de regulación nacional efectiva. Según Wang et al. (2022), el enfoque fragmentado y estatal de Estados Unidos respecto a la legislación sobre bolsas de PSU resulta insuficiente para abordar la magnitud de los residuos plásticos. Se requiere legislación federal, respaldada por inversión pública en educación e investigación, para armonizar las regulaciones y alcanzar el nivel de progreso de otras naciones desarrolladas. La inconsistencia legislativa entre los estados genera confusión para consumidores, empresas y autoridades encargadas de hacer cumplir la ley.

En el caso de China, según Fürst y Feng (2022), a pesar de que la gobernanza del plástico ha experimentado una transformación radical desde 2016, pasando de 4 políticas en

2000 a 41 a mediados de 2021 (925%). Sin embargo, la atención regulatoria sigue centrada en la gestión de residuos en la fase posterior a la producción, en lugar de en la fase inicial de producción de plástico. Otros autores, como Liu & Liu (2023), sugieren que entre las deficiencias en la implementación se incluyen: un enfoque centrado en los consumidores en lugar de en los productores; una aplicación desigual entre las zonas urbanas y rurales; dificultades para regular a los pequeños vendedores informales; y un uso limitado de instrumentos fiscales. Además, la nueva política de restricción de plásticos se implementó hace relativamente poco tiempo y su efectividad aún no se ha determinado, por lo que se requiere un análisis más profundo.

En India, la prohibición de 19 categorías de productos PSU, vigente desde julio de 2022, se ha caracterizado por una implementación inconsistente y desigual. La prohibición ha sido mayormente bienvenida, sin embargo, persisten desafíos para facilitar su implementación, evaluar los impactos ambientales potenciales de los materiales alternativos y abordar las preocupaciones socioeconómicas como: el sector de reciclaje informal, el cual representa un eslabón crítico en la cadena de gestión de residuos y las prohibiciones que afectan desproporcionadamente a comunidades con menores recursos, que dependen de productos plásticos económicos y accesibles (Nøklebye et al., 2023).

Por lo anterior, varios informes internacionales coinciden en que los países que lideran la gobernanza del plástico son aquellos que han desarrollado marcos regulatorios integrales, instrumentos económicos eficaces y sistemas de implementación medibles. El informe presentado por OECD (2022a), identifica que países europeos como Francia y Alemania, junto con Noruega, destacan por la combinación de REP, sistemas de depósito-retorno y regulación de mercado, lo que se traduce en altas tasas de recuperación de envases y mejores resultados en la gestión de residuos. De igual manera, la (Unión Europea, 2019) ha impulsado estándares

regulatorios homogéneos en estos países, posicionándolos como referentes en la reducción de PSU a través de políticas coherentes y medibles.

Informes del (PNUMA, 2018), evidencian que países como Canadá, Australia y Japón han avanzado en la implementación de estrategias nacionales de economía circular y gestión de plásticos, mientras que Rwanda y Kenia destacan como casos únicos de prohibiciones regulatorias estrictas en países en desarrollo, con impactos visibles en la reducción de bolsas plásticas y control del consumo. En conjunto, estos países representan modelos diferenciados pero complementarios de política pública, que permiten analizar tanto instrumentos económicos avanzados como regulaciones restrictivas, lo que justifica su selección como referentes internacionales para estudios comparativos sobre PSU. Por lo tanto, la Tabla 6 presenta las principales estrategias adoptadas por los países mencionados.

Tabla 6

Principales estrategias sobre PSU - Nivel global

País	Estrategia	Descripción	Año	Mecanismos e instrumentos	Metas	Resultados / KPIs	Fuente de consulta
FRANCIA	Loi AGECE N° 2020-105: Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire	Ley marco de economía circular adoptada el 10 de febrero de 2020. Estructura la transición del modelo lineal al circular en torno a cinco ejes: eliminación de PSU, mejor información al consumidor, lucha contra el desperdicio, combate a la obsolescencia programada y producción más sostenible. Complementada por los Decretos 3R (2021-2025) que fijan metas cuantificables quinquenales.	2020	REP extendida a envases industriales y comerciales (desde 2025); bono reparación (+€60 por producto); prohibición de destrucción de productos no vendidos (desde 2022); obligación de ofrecer envases reutilizables en restaurantes de comida rápida (>20 cubiertos, desde 2023); filtros de microfibras en lavadoras nuevas (obligatorio desde enero 2025); €91 M asignados a municipios en 2024 para infraestructura de clasificación.	-20 % en PSU al 31/12/2025 vs. 2018 (al menos la mitad por reutilización); 77 % botellas PET recolectadas para reciclaje al 2025 (90 % en 2029); 5 % envases reutilizables en mercado al 2023 (10 % en 2027); 100 % plásticos reciclables al 2025; eliminación total de envases plásticos para 2040.	Volumen PSU aumentó +3 % entre 2018–2021 (meta de -20 % incumplida en plazo intermedio); 30 % contenido reciclado en botellas PET en 2024 (superó meta UE del 25 %); reutilización de envases domésticos: aprox. 1 % (meta 5 % para 2023, incumplida); Citeo invirtió €33 M en 144 proyectos de reutilización al 2023.	(CMS, 2025; Global Climate Initiatives, 2025; Gouvernement français, 2020; Library of Congress, 2020; Pollutec Learn & Connect, 2024)
ALEMANIA	Einwegkunststofffondsgesetz – EWKFondsG (Ley del Fondo de Plásticos de Un Solo Uso) + Verpackungsgesetz – VerpackG (Ley de Envases, 2019 rev. 2022)	Marco dual: 1. EWKFondsG, promulgada el 11 de mayo de 2023, establece una tasa obligatoria sobre PSU pagada por productores e importadores al Fondo Federal, con cuyos recursos se reembolsan a municipios los costos de limpieza y gestión. 2. VerpackG regula el ciclo de vida de los envases, mediante cuotas de reciclaje vinculantes y el sistema de depósito-retorno Pfand.	2023 (EWKFondsG); 2019/2022 (VerpackG)	Tasa EWKFondsG: desde €0,06/kg (toallitas húmedas) hasta €8,945/kg (filtros de cigarrillos); pago 2025 sobre datos 2024; registro obligatorio en plataforma DIVID (UBA); depósito-retorno Pfand (€0,25 por envase); extendido en 2022 a todos los envases plásticos y latas; obligación de ofrecer alternativa reutilizable en establecimientos de comida para llevar (>5 empleados y >80 m², desde enero 2023); Estrategia Nacional de Economía Circular (NCES, 2025).	63 % reciclaje mecánico de envases plásticos (Packaging Act); 77 % recolección separada de botellas al 2025 y 90 % al 2029 (Directiva UE 2019/904); 25 % contenido reciclado en botellas PET al 2025 y 30 % en todas las botellas al 2030; meta cero residuos a vertedero de larga data.	68,9 % reciclaje de envases plásticos en 2023 (supera meta del 63 %); >90 % tasa de recolección de envases vía sistema Pfand (segundo más alto de Europa tras sistemas nórdicos); solo 1 % de RSU a vertedero (vs. media UE del 24 %); tasa de reciclaje plástico superó 50 % por primera vez en 2022.	(BDO, 2024; CMS, 2024a; EY Global, 2023; G20, 2025a)
NORUEGA	Reglamento PSU (2021) que transpone la Directiva UE 2019/904 + Sistema de Depósito-Retorno Infnitum (operativo desde 1999, ampliado) + Ley de Control de la Contaminación (actualizada)	Aunque Noruega no es miembro de la UE, adopta los marcos europeos vía el Acuerdo EEA. Su regulación de PSU entró en vigor en 2021 con prohibiciones de productos y requisitos de diseño. Complementa la normativa con el sistema de depósito-retorno más antiguo y eficiente del mundo, operado por la entidad sin ánimo de lucro Infnitum.	2021	Sistema Infnitum de depósito-retorno (€0,10–€0,23 por envase; automat. en aprox. 3.900 RVM en 3.500 puntos de venta); tasa de medio ambiente que se elimina si >95 % de envases son retornados; EPR para envases, botellas y latas (en proceso de extensión a artes de pesca); proyecto 'Clean Norway in Time': limpieza del 70 % de la costa exterior para 2028 con 400 M NOK (aprox. €35 M) ya invertidos.	-50 % envases para comida para llevar y vasos desechables para 2026 vs. 2022; 50 % reciclaje de envases plásticos al 2025 y 55 % al 2030; 90 % recolección separada de botellas plásticas al 2029 (alineado con SUPD UE); reducción de 6 % (aprox. 3.600 t/año; 1.900 M ítems/año) en consumo de PSU vía prohibiciones desde 2021.	93 % tasa de retorno depósito-retorno en 2024 (tasa total de recolección incluyendo otros canales: 98 %); <1 % de envases de bebida son arrojados como basura; tendencia a la baja verificada en residuos PSU en playas del Oslofjord exterior (2011–2023, fuente: Miljødirektoratet, feb. 2026); 96 % del material en playas monitoreadas sigue siendo plástico — señal de trabajo pendiente.	(CMS, 2024b; G20, 2025c; TOMRA, 2024; Westmark, 2026)

HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO MULTICRITERIO PARA LA TRANSICIÓN DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO A MATERIALES SOSTENIBLES EN EL SECTOR DE EMPAQUES Y ENVASES DE LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO EN COLOMBIA

81

CANADÁ	Single-use Plastics Prohibition Regulations – SUPPR (SOR/2022-138), publicado en Canada Gazette, Part II, 22 de junio de 2022	Reglamento federal expedido bajo la Canadian Environmental Protection Act, 1999 (CEPA). Primer país del G7 con prohibición integral de seis categorías de PSU. La implementación fue escalonada entre diciembre de 2022 y junio de 2024 para permitir la transición industrial. Nota: el Tribunal Federal declaró nula en noviembre de 2023 la designación de plásticos como sustancias tóxicas; el gobierno apeló y obtuvo una suspensión de la decisión en enero de 2024, por lo que las prohibiciones siguen en vigor.	2022	Prohibición de fabricación, importación y venta (no solo restricción de uso); excepciones técnicas estrictas basadas en normas ISO para determinar si un producto es PSU; meta de cero residuos plásticos al 2030 (Canadian Council of Ministers of the Environment); Registro Federal de Plásticos (en implementación por fases desde 2024); EPR coordinado con provincias.	Cero residuos plásticos para 2030 (Canada's Zero Plastic Waste Agenda); 90 % reciclaje de botellas plásticas (alineado con UE y Quebec); eliminación de >1,3 M ton de residuos plásticos difíciles de reciclar y >22.000 ton de contaminación plástica en la próxima década.	Antes de la ley: <10 % de plástico canadiense se reciclaba (de aprox. 3 M ton/año generadas); la prohibición de exportación fue retirada en octubre 2025 por presiones industriales — señal de tensión entre ambición normativa e implementación; KPIs de reducción de residuos en campo aún en proceso de medición y publicación oficial.	(Government of Canada, 2026)
AUSTRALIA	National Plastics Plan 2021 (federal) + Single-use and Other Plastic Products Acts (estatales y territoriales, 2020–2024) + Acuerdo Nacional de Envases Sostenibles (APCO)	Modelo de gobernanza multinivel: el Plan Nacional de Plásticos (2021) establece el marco federal con metas y coordinación, mientras que los ocho estados y territorios implementan prohibiciones propias. En diciembre 2024, los ministros de medio ambiente acordaron un Roadmap Nacional para armonizar las acciones en 24 categorías de productos. Todos los estados y territorios tienen ahora al menos una prohibición de PSU vigente.	2021 (Plan Nacional); 2020–2024 (leyes estatales)	Depósito-retorno (Container Deposit Scheme, CDS): operativo en todos los estados (10 cts. por envase); Australia Packaging Covenant Organization (APCO) coordina compromisos industria-gobierno para 100 % envases reciclables o compostables; exportación de residuos plásticos prohibida desde 2021; certificación de compostabilidad obligatoria para alternativas (AS4736:2006 o AS5810:2010).	100 % envases reciclables, compostables o reutilizables para 2025 (meta nacional APCO, en transición a mandato); fase-out de plásticos problemáticos e innecesarios para 2025 (NWPAP); armonización de acciones en 24 categorías acordada en diciembre 2024.	Tasa de reciclaje nacional de plásticos: aprox. 14 % (considerada la principal limitación del modelo); tasas de depósito-retorno: 65–87 % según estado y madurez del esquema (SA: desde 1977, logra aprox. 87 %); meta de 100 % envases reciclables para 2025 no alcanzada en plazo — transición a mandato obligatorio en curso; Woolworths eliminó 9.000 ton de bolsas reutilizables de plástico de la circulación en 2023.	(Australian Government, 2022; Daudt, 2025; Government of South Australia, 2020)
JAPÓN	Act on Promotion of Resource Circulation for Plastics – Ley N° 60 de 2021 (Ley de Circulación de Recursos Plásticos), en vigor desde abril 2022 + Resource Circulation Strategy for Plastics (2019)	Marco integral de ciclo de vida que regula 12 categorías de PSU, distribuidas en cuatro sectores: retail, hostelería, servicios e higiene personal. Adoptó el principio 3R + Renovable. Obliga a fabricantes a diseñar productos con criterios ambientales certificables, a empresas minoristas a reducir PSU bajo el modelo 'a petición del cliente', y a municipios a optimizar recolección y reciclaje diferenciado.	2022 (entrada en vigor); 2019 (Estrategia base)	Cargo obligatorio a bolsas plásticas en puntos de venta (desde julio 2020, tarifa fijada por establecimiento); directrices de diseño ecocompatible con certificación gubernamental por sector de producto; compras públicas preferentes para productos certificados; Ley de Sofisticación de Negocios de Reciclaje (2024) amplía obligaciones de reporte a grandes generadores industriales; G20 'Visión de Osaka' (2019): compromiso de 87 países de reducir residuos plásticos marinos a cero para 2050.	–25 % reducción de PSU para 2030 (Estrategia de Circulación de Recursos de Plásticos); 100 % aprovechamiento eficiente de residuos plásticos para 2035; 5.º Plan Fundamental para la Sociedad de Materiales en Ciclo (aprobado agosto 2024): posiciona la economía circular como estrategia nacional.	87 % de tasa de aprovechamiento de residuos plásticos en 2022 (25 % reciclado de material + 62 % recuperación energética); solo aprox. 25 % de la población conocía la Ley en 2022 (brecha de comunicación documentada); cargo a bolsas plásticas desde 2020 reportó reducción en uso a nivel minorista (datos cualitativos en informes sectoriales, datos precisos a nivel nacional pendientes de publicación oficial).	(G20, 2025b; Government of Japan, 2022; World Resources Institute, 2022)

HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO MULTICRITERIO PARA LA TRANSICIÓN DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO A MATERIALES SOSTENIBLES EN EL SECTOR DE EMPAQUES Y ENVASES DE LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO EN COLOMBIA

82

RWANDA	Ley N° 57/2008 (primera prohibición nacional de bolsas plásticas del mundo) + Ley N° 17/2019 (ampliación a todos los PSU) + Levy 0,2 % sobre importaciones en empaques plásticos (aprobado en parlamento, abril 2025)	La Ley 57/2008, vigente desde septiembre 2008, prohibió la fabricación, importación, uso y venta de bolsas de polietileno — primera prohibición nacional a este nivel en el mundo. La Ley 17/2019, en vigor desde septiembre 2019, la derogó y amplió a todos los PSU. En 2025, se aprobó un gravamen del 0,2 % sobre las importaciones de empaques plásticos para financiar el Fondo Nacional de Medio Ambiente.	2008 (primera prohibición); 2019 (vigente actualmente)	Enforcement físico: policía aduanera, REMA, Oficina Rwandesa de Estándares y autoridades locales verifican en fronteras, aeropuertos y comercios; anuncio en aeronaves al aterrizar de que no pueden ingresarse bolsas plásticas al país; programa comunitario 'Umuganda' (último sábado de cada mes): servicio obligatorio para ciudadanos de 16–65 años, incluye limpieza de calles; subsidios gubernamentales a fabricantes de alternativas (papel, tela, bambú, plátano, papiro); multas escalonadas: desde FRW 50.000 (infractor individual) hasta FRW 10 M (importador).	Eliminación total y permanente de bolsas plásticas y PSU del territorio nacional; meta de crecimiento sostenible de la Estrategia Nacional de Transformación (NST2, 2024–2029) alineada con Vision 2050; co-fundadora de la Coalición de Alta Ambición PNUMA (agosto 2022); meta de cero contaminaciones plásticas adicionales para 2040.	Importaciones de plásticos cayeron de 1.092 ton (2003) a 18 ton (2006) tras primeras medidas, con posterior estabilización en aprox. 100–323 ton/año (2009–2016); Ruanda reconocida como una de las naciones más limpias de África (informes PNUMA y GGGI); visitantes a Kigali describen ausencia de residuos plásticos visibles en zonas urbanas; modelo citado en más de 90 países como referencia; comercio paralelo de bolsas plásticas desde RD Congo y Uganda identificado como principal desafío persistente.	(Behuria, 2021; ICLG, 2025; Laws Africa, 2019; Ogutu et al., 2023; UNDP, 2023)
KENIA	Gazette Notice N° 2356 (28 de febrero de 2017, EMCA) — prohibición nacional de bolsas plásticas + Legal Notice N° 176 de 2024 (Reglamento de Gestión de Plásticos, NEMA) — EPR obligatorio	La Gazette Notice de 2017, emitida por la Secretaría de Medio Ambiente bajo la Environmental Management and Coordination Act (EMCA, Cap. 387), introdujo la prohibición más estricta del mundo en términos sancionatorios. El Legal Notice 176/2024 extiende la responsabilidad a todo el ciclo de vida del envase plástico mediante EPR obligatorio para fabricantes e importadores, que incluye sistemas de retoma (take-back) y reciclaje.	2017 (prohibición) + 2024 (EPR obligatorio)	Régimen sancionatorio más severo del mundo: multa de KES 2–4 M (aprox. USD 15.000–30.000) O prisión de 1–4 años O ambas penas (Sección 144 EMCA); aplicación por NEMA mediante inspecciones; EPR obligatorio (Legal Notice 176/2024): productores e importadores deben implementar sistemas de retoma, etiquetado con código de resina y contenido reciclado, y registrarse en Organizaciones EPR (EPROs); apoyo a innovación local: empresa Gjenje Makers (ladrillos de plástico reciclado más resistentes que el concreto).	Cero bolsas plásticas en el mercado doméstico y comercial; implementación integral del EPR para todos los plásticos (meta 2025–2026 según Legal Notice 176/2024); alineación con compromisos de la Coalición de Alta Ambición PNUMA (cero contaminaciones plásticas para 2040); co-sede del INC-3 (noviembre 2023, Nairobi) del tratado global.	67 % de consumidores reportó mayor uso de bolsas reutilizables y mejora percibida en limpieza post-prohibición (estudio UNEP citado en Wilson Center, 2020); UNEP declaró: 'Ruanda es hoy una de las naciones más limpias de la Tierra. Kenia ha seguido el mismo camino'; Legal Notice 176/2024 entró en vigor en mayo 2025 — resultados de EPR pendientes de evaluación sistemática; mercado paralelo de bolsas desde Tanzania y Uganda persiste como desafío de enforcement fronterizo.	(Library of Congress, 2017; NEMA, 2026; Waiganjo, 2020)

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

En el contexto latinoamericano, la mayoría de los gobiernos abordan la gestión del plástico desde un enfoque que prioriza la gestión final de los residuos y descuidan fases previas como el diseño, la fabricación y el consumo. Según el estudio realizado por Rodríguez et al. (2025), de 24 países examinados para identificar los planes nacionales de economía circular relacionados con el plástico, evaluando las cuatro fases de la cadena de valor del plástico: diseño y fabricación, distribución de productos, venta minorista, consumo y fin de vida útil, solo 7 cuentan con planes oficiales de economía circular (Colombia, Uruguay, Chile, Ecuador, Brasil, Costa Rica y Perú), 3 tienen planes relacionados con la economía circular (Argentina, El Salvador y México) y 14 no tienen ningún plan. Sin embargo, Chile destaca por la Ley 21.100 de prohibición de bolsas (2018), la Ley 20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor (2016) y la Ley 21.368 de PSU en servicios de alimentación (2022), cuya implementación ha generado resultados medibles en publicaciones revisadas por pares.

Perú se consolida como el primer país de la Alianza del Pacífico (conformada por Chile, Colombia, México y Perú), al prohibir simultáneamente bolsas plásticas, tecnopor y pitillos mediante la Ley 30884/2018, con resultados documentados por el propio gobierno y analizados en el marco comparativo de la Alianza. En el caso de México, los resultados del análisis de los países de la Alianza del Pacífico muestran una regulación subnacional extensa y dispersa para controlar el consumo de bolsas plásticas y PSU, con diversas políticas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), estrategias educativas y económicas orientadas principalmente al comportamiento del consumidor (Ortiz et al., 2020).

La Tabla 7 muestra las principales estrategias adoptadas por los países latinoamericanos.

Tabla 7

Principales estrategias latinoamericanas

País	Estrategia	Descripción	Año	Mecanismos e instrumentos	Metas	Resultados / KPIs	Fuentes de consulta
CHILE	Marco normativo triple articulado: (1) Ley 21.100 'Chao Bolsas Plásticas' (2018) (2) Ley 20.920 REP y Fomento del Reciclaje (2016) (3) Ley 21.368 Regula Plásticos de Un Solo Uso y Botellas Plásticas (2021)	Chile es el país latinoamericano con el marco normativo de PSU más completo y articulado. Combina la prohibición de un producto específico (Ley 21.100), el sistema REP activo con metas anuales (Ley 20.920) y la ley integral de PSU en servicios de alimentación (Ley 21.368). Es miembro de la OCDE desde 2010 y de la Alianza del Pacífico, instituciones que facilitan la transferencia normativa con Colombia. En 2025 los textiles fueron añadidos a los productos prioritarios de la Ley REP (Ministerio de Medio Ambiente, junio 2025).	2019 (Ley 21.100); 2022 (Ley 21.368); REP activa 2023	REP Ley 20.920: metas anuales de recolección y valorización para productores/importadores de envases; en 2025 se amplió a textiles; Resolución Exenta N° 4771 (jul. 2025): datos de comercialización de textiles de 2024 obligatorios; botellas retornables obligatorias en grandes superficies (2022) y minimarkets (2023); botellas PET con % mínimo de rPET desde ene. 2024; fiscalización: municipios (Ley 21.100) y Superintendencia de Medio Ambiente (Ley 20.920).	Ley 21.100: eliminación total de bolsas plásticas de comercio; Ley 21.368: 100 % PSU reemplazados en establecimientos de alimentación al 2024 para consumo en local; Ley 20.920 REP: metas anuales de recolección por producto prioritario (envases, aceites, electrónicos, neumáticos, textiles desde 2025).	Ley 21.100 ha evitado más de 5.000 millones de bolsas de plástico desde su entrada en vigor (MMA/País Circular, jul. 2025); antes de la ley: aprox. 3.200 M bolsas/año, aprox. 90 % a vertederos o al mar (MMA, 2018); desafío persistente: la definición técnica de 'bolsa plástica' genera vacíos de fiscalización (boletín 16980-12, 2024, en trámite); REP 2025 textiles: primera entrega de datos — resultados pendientes.	(BCN, 2016, 2019, 2021; Maldonado, 2025; MMA, 2026)
PERÚ	Ley N° 30884 que regula el plástico de un solo uso y los recipientes o envases descartables (promulgada el 19 de diciembre de 2018) + Decreto Supremo N° 006-2019-MINAM (Reglamento, 23 de agosto de 2019)	Perú fue el primer país de la Alianza del Pacífico en prohibir bolsas de un solo uso, tecnopor (poliestireno expandido) Y cañitas (Pajitas/pitillos) de forma simultánea (MINAM, jul. 2019). La Ley 30884 establece prohibiciones progresivas, un impuesto al consumo de bolsas, obligación del 15 % de material reciclado en botellas PET y un Registro Nacional de Fabricantes e Importadores administrado por el MINAM. Tiene resultados verificados por el propio gobierno e igualmente limitaciones estructurales documentadas por la Defensoría del Pueblo.	2018 (promulgación); 2019 (reglamento); implementación por fases 2019-2021	Impuesto al consumo de bolsas plásticas: S/ 0,10 (2019) → S/ 0,20 (2020) → S/ 0,30 (2021) → S/ 0,40 (2022) → S/ 0,50 (2023 en adelante), trasladado a SUNAT; Registro obligatorio ante MINAM de fabricantes/importadores/distribuidores con reporte anual de cantidades (último día hábil de marzo); Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) como ente principal de fiscalización; Ministerio de la Producción (PRODUCE) y SUNAT también fiscalizan; sanciones escalonadas según tipo de infracción.	Reducción del 30 % en el consumo de plástico innecesario al primer año de vigencia (MINAM, 2019); obligación de 15 % contenido reciclado en botellas PET (art. 7, Ley 30884); aprobación de 5 reglamentos técnicos específicos (solo 1 aprobado a 2025 — Defensoría del Pueblo, jul. 2025).	aprox. 500 M de bolsas plásticas dejadas de usar entre 2019 y 2024 (MINAM, jul. 2025); más de S/ 34 M recaudados en impuesto al consumo de bolsas entre 2019 y 2024 (MINAM, jul. 2025); reducción del 30 % en el primer año (1.000 M bolsas dejadas de producir, equivalente a 420 ton menos/mes) (MINAM, dic. 2021); limitación crítica: solo 1 de 5 reglamentos técnicos aprobados a siete años de vigencia de la ley; sin información oficial actualizada sobre avances en reducción desde el primer año (Defensoría del Pueblo, jul. 2025).	(Defensoría del Pueblo, 2025; Gobierno de Perú, 2018; Minam, 2019a, 2019b, 2025)

MÉXICO	Sin ley federal específica de PSU. Marco distribuido en: (1) Ciudad de México – Reforma Ley de Residuos Sólidos (Gaceta Oficial CDMX, jun. 2019; en vigor ene. 2021) (2) 29/32 estados con regulaciones propias de PSU (hasta 2023) (3) SEMARNAT – Estrategia de Economía Circular (marco federal habilitante) (4) Proyecto de Ley General de Economía Circular (en proceso legislativo, 2025)	México es el segundo productor latinoamericano de residuos plásticos y el país con mayor fragmentación normativa en materia de PSU. La Ciudad de México fue la primera megalópolis de la región en adherirse al Compromiso Global de Nueva Economía del Plástico (Ellen MacArthur Foundation) y cuenta con el marco subnacional más avanzado y mejor documentado. A nivel federal, no una existe ley de PSU específica vigente; en dic. 2025 se presentó ante el Congreso un Proyecto de Ley General de Economía Circular.	2019-2021 (CDMX y estados); sin ley federal a marzo 2026	CDMX: Norma Ambiental NACDMX-010-AMBT-2019 (especificaciones técnicas de compostabilidad); registro obligatorio de productos compostables ante SEDEMA; Plan Basura Cero: metas de aprovechamiento de 4.100 a 10.700 ton/día; Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico (compromiso voluntario industria-gobierno-sociedad civil); SIN mecanismo de REP federal activo a 2026.	CDMX: cero plásticos convencionales PSU (cumplida para productos prohibidos); Plan Basura Cero CDMX: 10.700 ton/día aprovechadas; federal: Proyecto de Ley General de Economía Circular (2025) contempla metas de reciclaje — sin aprobación a marzo de 2026.	CDMX – Plan Basura Cero: 532 visitas informativas a establecimientos; 9.782 comerciantes asesorados; 1.151 multiplicadores ambientales capacitados (SEDEMA, 2021); 88 % los estados tienen algún instrumento sobre PSU pero hay ausencia de datos nacionales consolidados de reducción de residuos PSU; soberanía estatal vs. facultad federal genera conflictos normativos (CPEUM, art. 41) — barrera estructural persistente.	(Cámara de Diputados, 2025; Hernández, 2023; Reyes Jaime et al., 2024; SEDEMA, 2026)
--------	---	---	---	---	--	--	---

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

El recorrido comparativo realizado a escala global y latinoamericana permite exponer lo siguiente: la eficacia regulatoria en materia de PSU no depende del nivel de desarrollo económico ni del volumen de producción científica de un país, sino de la coherencia entre el diseño del instrumento normativo, la capacidad institucional de implementación y el grado de involucramiento de los actores del sector productivo y de la sociedad.

Retos y Brechas Normativas para Colombia

La adopción de marcos normativos progresivos sobre PSU representa un avance significativo en la agenda ambiental de los países, pero no garantiza por sí sola la efectividad de la política pública. Colombia promulgó la Ley 2232 de 2022, posicionándose como uno de los referentes normativos más avanzados de América Latina. Sin embargo, Rangel y Gracia (2024) indican que la legislación constituye un paso importante hacia la sostenibilidad pero la solución a la contaminación plástica no puede abordarse únicamente a través de medidas regulatorias: Colombia necesita invertir en investigación de materiales, participación pública y monitoreo ambiental para maximizar el impacto de la ley.

Esta advertencia adquiere mayor dimensión cuando se contrasta el marco colombiano con los de países que han recorrido ese proceso con mayor antelación: Alemania, que construyó durante tres décadas un sistema que hoy recicla el 68,9 % de sus envases plásticos (German Environment Agency, 2025); Francia, cuya Ley Anti - desperdicio para una Economía Circular (AGEC) es el referente normativo más ambicioso del mundo, aunque con metas parcialmente incumplidas (Global Climate Initiatives, 2025); y Chile, el país latinoamericano con el marco normativo más articulado y con resultados verificados (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2026).

En el análisis comparativo de Colombia frente a Alemania, Francia y Chile, con base en lo identificado en las Tablas 5, 6 y 7, se evidencian brechas que condicionan el alcance de la Ley 2232 de 2022.

La primera brecha es normativa: Colombia carece de instrumentos equivalentes a la Ley del Fondo para PSU (EWKFondsG) alemán, que financia a municipios mediante tasas a productores que oscilan entre €0,06/kg y €8.945/kg según producto y al Fondo para el Reciclaje de la Ley REP 20.920 chilena; adicionalmente, la Política Nacional de Sustitución del PSU (art. 7, Ley 2232) y el Plan de Reconversión Productiva (art. 9, Ley 2232) permanecen sin publicar.

La segunda brecha es de metas e indicadores: aunque las metas colombianas son ambiciosas, 100 % de PSU reciclables para 2030 y 90 % de materia prima reciclada en botellas PET para ese mismo año, carecen de vinculatoriedad y trazabilidad equivalente a los Decretos Supremos chilenos verificados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) o a las cuotas auditadas por el Registro Central de embalaje – ZSVR (Zentrale Stelle Verpackungsregister) alemán; en Colombia, los Planes de Gestión Ambiental de Residuos de Envases y Empaques (PGARE), con fecha límite en diciembre de 2024, no registran resultados verificables publicados.

La tercera brecha es en resultados medibles: Colombia reincorpora solo el 3 % de los envases plásticos en nuevos productos, mientras que Alemania recicla mecánicamente el 68,9% de sus envases plásticos y Chile verifica sus flujos mediante el Sistema de Reporte de la Responsabilidad Extendida del Productor (SISREP).

La cuarta brecha es de mecanismos económicos: el impuesto al consumo de bolsas plásticas (\$73/bolsa en 2026, Ley 1819/2016) es el único instrumento de mercado vigente sobre PSU en Colombia, mientras que Alemania opera tasas diferenciadas por producto, Francia aplica eco-modulación de contribuciones REP con bonificaciones y penalidades por criterios ambientales (CITEO, 2023) y Chile es el único país latinoamericano con REP de envases activa con metas anuales verificadas y multas de hasta 10.000 UTA (Unidades Tributarias Anuales); Colombia carece de sistema de depósito-retorno.

La quinta brecha es institucional: la distribución de competencias entre el Ministerio del Medio Ambiente, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), 33 Corporaciones Autónomas Regionales y los municipios genera riesgo de solapamiento sin una instancia de coordinación equivalente a la SMA chilena o la ZSVR alemana, y la ausencia de una plataforma de trazabilidad digital equivalente al SISREP chileno o al DIVID (plataforma del Fondo de PSU

de la Agencia de Medioambiente de Alemania), impide medir el cumplimiento del REP en tiempo real.

Colombia presenta una fortaleza estructural: recicladores de oficio formalizados con 15 años de exclusividad, reconocida por el Decreto 1381/2024, algo que los tres referentes no poseen pero que requiere integración digital para ser medible e incorporable al sistema de trazabilidad del REP.

Transiciones Sociotécnicas y Perspectiva Multinivel

La transición de los PSU hacia materiales sostenibles no constituye un problema exclusivamente técnico o normativo: Implica cambios simultáneos en las estructuras de mercado, las prácticas industriales, la infraestructura logística, la cultura organizacional y los marcos regulatorios. No es posible abordarla desde una sola dimensión, por ejemplo, ni únicamente mediante prohibiciones legales ni mediante la sustitución de materiales.

Para comprender por qué la transición presenta esta complejidad sistémica, resulta pertinente acudir a la Perspectiva Multinivel (Multi-Level Perspective, MLP), propuesta por Geels (2002) como marco analítico para estudiar las transiciones sociotécnicas de gran escala. Una transición sociotécnica se define como un proceso de largo plazo, multidimensional y fundamental, mediante el cual los sistemas sociotécnicos establecidos se desplazan hacia modos de producción y consumo más sostenibles. Estas transiciones no se limitan cambios tecnológicos, sino que también abarcan transformaciones en las prácticas de los usuarios, la regulación, las redes industriales, la infraestructura y el significado simbólico o cultural asociado a los materiales.

El MLP distingue tres niveles analíticos interrelacionados que operan como una jerarquía anidada (Geels & Schot, 2007):

El paisaje sociotécnico constituye el nivel macro. Agrupa factores de cambio lento y de difícil modificación a corto plazo: tendencias globales, paradigmas culturales, condiciones

macroeconómicas, acuerdos internacionales y presiones ambientales estructurales. El paisaje no es directamente controlable por los actores del sistema, pero ejerce presión sobre los niveles inferiores, creando o cerrando ventanas de oportunidad para el cambio. En el contexto de esta investigación, el paisaje está conformado por la creciente evidencia científica sobre la contaminación plástica, los acuerdos internacionales de reducción de residuos y los compromisos climáticos globales que condicionan la agenda regulatoria colombiana.

El régimen sociotécnico opera en el nivel meso y representa la configuración dominante y estabilizada de un sistema: el conjunto de actores, tecnologías, infraestructuras, instituciones, regulaciones y prácticas que definen cómo se cumple una función social determinada. El régimen es dinámicamente estable porque sus elementos están alineados y se refuerzan mutuamente, lo que genera inercias que dificultan la entrada de innovaciones radicales. Para esta investigación, el régimen está constituido por la industria plástica colombiana con su infraestructura petroquímica instalada, sus redes de distribución consolidadas, sus modelos de negocio basados en el bajo costo y sus cadenas de proveedores alineadas con las resinas de origen fósil.

Los nichos de innovación conforman el nivel micro y representan espacios protegidos donde emergen y se desarrollan innovaciones radicales, alejadas de las presiones de selección del régimen dominante. Los nichos operan como incubadoras en las que se construyen redes de actores, se acumula aprendizaje tecnológico y se desarrollan expectativas compartidas que permiten que la innovación madure hasta alcanzar una masa crítica suficiente para competir con el régimen. En el caso analizado, los materiales alternativos, como el PLA, PHA, TPS, bio-PE, así como los modelos de reutilización y compostaje constituyen innovaciones de nicho.

La Figura 23, muestra un ejemplo de la aplicación de la MLP en la transición de PSU hacia materiales sostenibles en Colombia.

Figura 23

Aplicación de la Perspectiva Multinivel al caso colombiano de transición de PSU



Nota: Elaboración con base en Geels (2002) y Geels y Schot (2007), 2026.

La dinámica de transición ocurre cuando las presiones del paisaje desestabilizan el régimen y las innovaciones de nicho han alcanzado suficiente madurez para aprovechar las ventanas de oportunidad generadas (Geels & Schot, 2007). Este encuadre conceptual justifica que el instrumento propuesto en esta investigación, la herramienta de diagnóstico multicriterio, deba articular de manera integrada criterios técnico-ambientales, económicos, regulatorios y operativos, así como las capacidades tecnológicas nacionales del sector. Una herramienta de diagnóstico que evalúe únicamente el nivel de nicho (selección de materiales alternativos), sin considerar las restricciones del régimen (capacidades industriales, cadenas de suministro, infraestructura de compostaje), tendrá un alcance transformador limitado.

Technology Roadmapping

El Technology Roadmapping (TRM) es una metodología de planificación estratégica que permite explorar y comunicar, mediante una estructura gráfica y temporal, las relaciones entre mercados, productos y tecnologías a lo largo de un horizonte de tiempo definido. Desarrollada originalmente en el ámbito empresarial y posteriormente adoptada en contextos de política pública y transiciones de sostenibilidad, la técnica se caracteriza por su flexibilidad para adaptarse a diferentes propósitos, escalas y actores. La propuesta metodológica de los roadmaps tecnológicos parte de reconocer que la gestión efectiva de la tecnología requiere alinear los recursos disponibles con los objetivos estratégicos de la organización, tanto en el presente como en el futuro (Phaal, 2004).

La arquitectura de un roadmap tecnológico se organiza en capas superpuestas sobre un avance progresivo, que responden a tres preguntas fundamentales e interdependientes:

La pregunta ¿por qué? (know-why) corresponde a la capa superior y recoge el contexto que justifica y orienta la transición: las fuerzas del mercado, los requisitos regulatorios, las tendencias tecnológicas globales y las presiones ambientales que hacen necesario el cambio. Esta capa define la dirección estratégica del instrumento y determina los criterios con los que se evalúan las opciones de transición.

La pregunta ¿qué? (know-what) constituye la capa intermedia y define los productos, materiales o sistemas que deben desarrollarse o adoptarse para responder al contexto identificado en la capa anterior. Es el puente entre el propósito estratégico y los recursos tecnológicos, y determina la secuencia lógica de las acciones de transición.

La pregunta ¿cómo? (know-how) conforma la capa inferior e identifica las tecnologías, capacidades, recursos humanos e inversiones necesarios para implementar los cambios definidos en la capa intermedia. Incluye las rutas de innovación, los actores responsables y los

mecanismos de habilitación requeridos para que la transición sea técnica y económicamente viable.

En el contexto de las transiciones de sostenibilidad, Miedzinski et al. (2022) señalan que los planes estratégicos para ciencia, tecnología e innovación (STI roadmaps) cumplen tres funciones clave: evocar visiones de futuro compartidas, alinear las expectativas de actores heterogéneos y articular políticas de largo plazo orientadas a metas ambiciosas. Sin embargo, los autores identifican una limitación recurrente en los instrumentos analizados: la mayoría se centra en metas regulatorias o de mercado sin especificar las condiciones técnicas y operativas bajo las cuales esas metas son alcanzables, lo que reduce su utilidad como herramienta de reconversión productiva.

Hipótesis

A diferencia de los estudios correlacionales o explicativos, la formulación de una hipótesis no es un requisito universal en investigación descriptiva. Según Hernández et al. (2014), señalan que los estudios descriptivos no suelen contener hipótesis, dado que en ocasiones resulta difícil precisar el valor o dato que puede manifestar una variable, reservando la formulación de hipótesis descriptivas de un dato o valor que se pronostica para los casos en que se busca predecir específicamente dicho valor. En esta investigación, dado su carácter documental y su alcance descriptivo, no se formula una hipótesis formal: el desarrollo procede directamente del planteamiento del problema y la pregunta de investigación hacia la definición de las categorías de análisis que se presentan a continuación.

Categorías de Análisis

Esta investigación sustituye la sección de Variables prevista en la plantilla institucional por Categorías de Análisis. El concepto de variable, propio del vocabulario cuantitativo, presupone una operacionalización numérica susceptible de medición estadística; en cambio, la categoría de análisis se considera más ajustada al enfoque mixto de predominancia cualitativa y al carácter documental de esta investigación.

La Tabla 8 presenta las categorías de análisis identificadas en esta investigación, derivadas del planteamiento del problema, la pregunta de investigación y el marco teórico. Se definen cuatro categorías: técnico - ambiental, económica, regulatoria y operativa, que representan las condiciones heterogéneas de adaptación del sector de empaques y envases frente a la transición de los PSU hacia materiales sostenibles. Cada categoría agrupa un conjunto de criterios diagnósticos, operacionalizados en detalle en las Tablas 30 a 33.

La selección de estas cuatro categorías responde a que cada una resuelve una pregunta distinta y necesaria para que una empresa evalúe su transición, sin que ninguna sustituya a las demás. La categoría técnico - ambiental determina si existe un material candidato con madurez tecnológica y desempeño ambiental viable. La categoría regulatoria establece si existe un mandato o incentivo externo que activa la transición y bajo qué plazo, conforme a la Ley 2232 de 2022 y la Resolución 803 de 2024. La categoría económica determina si la empresa puede costear la adaptación, dado que la viabilidad técnica y la obligación regulatoria no garantizan por sí mismas la capacidad financiera para ejecutarla. Finalmente, la categoría operativa establece si la empresa cuenta con la infraestructura, el talento y el acceso a cadena de suministro necesarios para materializar la transición en la práctica. Esta lógica de cuatro preguntas complementarias es consistente con el vacío señalado por Miedzinski et al. (2022) en los instrumentos de transición existentes, que suelen limitarse a la pregunta regulatoria y económica sin resolver la técnica y la operativa; y con la

lectura integrada de nicho, régimen y paisaje que exige el Marco de Perspectiva Multinivel

(Geels & Schot, 2007).

Tabla 8

Categorías identificadas

Categoría	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Criterios asociados	
Técnico - ambiental	Condiciones relacionadas con la madurez tecnológica de los materiales sostenibles, su desempeño ambiental comparado frente a PSU y la infraestructura disponible en Colombia para la recuperación y tratamiento de residuos plásticos, que condicionan la factibilidad técnica y ambiental de la transición.	Documentada mediante revisión de fuentes académicas, técnicas e institucionales verificadas.	Madurez tecnológica de materiales sostenibles.	TA 1	Madurez tecnológica del material sostenible
			Desempeño ambiental comparado.	TA 2	Desempeño ambiental
			Infraestructura de recuperación y tratamiento.	TA 3	Cobertura de infraestructura de fin de vida en Colombia
Económica	Condiciones económicas que determinan la competitividad de los materiales sostenibles frente a PSU convencionales, incluyendo el diferencial de precios, los costos de adaptación empresarial y las condiciones de mercado en el sector colombiano.	Documentada mediante fuentes sectoriales verificadas.	Diferencial de precio materiales sostenibles vs PSU.	ECN 1	Diferencial de costo del material sostenible
			Capacidad de adaptación empresarial.	ECN 2	Capacidad económica de adaptación empresarial
			Condiciones de mercado.	ECN 3	Estado del mercado para materiales sostenibles
Regulatoria	Conjunto de instrumentos legales, fiscales y de política pública vigentes en Colombia que orientan o condicionan la transición de PSU hacia materiales sostenibles en el sector de empaques y envases.	Documentada mediante análisis del marco normativo vigente.	Marco normativo vigente.	REG 1	Conformidad legal del portafolio con los instrumentos de prohibición vigentes
			Instrumentos fiscales aplicables.	REG 2	Integración en el sistema de Responsabilidad Extendida del Productor
			Integración al sistema de REP	REG 3	Aprovechamiento de instrumentos fiscales favorables a la sustitución
Operativa	Capacidades instaladas del sector colombiano de empaques y envases para implementar la transición, en términos de infraestructura tecnológica, disponibilidad de cadena de suministro y adaptación de procesos productivos.	Documentada mediante fuentes sectoriales e institucionales verificadas.	Infraestructura tecnológica del sector.	OPE 1	Capacidad operativa de adaptación empresarial
			Cadena de suministro y proveedores.	OPE 2	Disponibilidad de talento especializado
			Capacidad de adaptación de procesos productivos.	OPE 3	Acceso a soporte técnico y de I+D+i
				OPE 4	Disponibilidad de cadena de suministro de materiales sostenibles

Las categorías de análisis identificadas constituyen el eje estructural que orienta la construcción de la herramienta de diagnóstico multicriterio. Su articulación con los criterios técnico - ambientales, económicos, regulatorios y operativos busca sostener la coherencia del proceso investigativo y su correspondencia con los objetivos específicos planteados.

Metodología

El presente capítulo describe el diseño metodológico de la investigación, estructurado en relación con los objetivos específicos planteados para el desarrollo de la herramienta de diagnóstico multicriterio de transición de los PSU a materiales sostenibles en el sector de empaques y envases de la industria colombiana. Siguiendo los fundamentos de Hernández et al. (2014), se expone el enfoque, el alcance y el tipo de investigación, así como la muestra, los instrumentos de recolección de información y las técnicas de análisis adoptadas. La finalidad es garantizar la coherencia y la validez del proceso investigativo desde la revisión documental hasta la construcción de los criterios que estructuran la herramienta.

Enfoque y Alcance de la Investigación

La investigación adopta un enfoque mixto con predominancia cualitativa, en la medida en que integra la revisión documental y el análisis de contenido temático, propios del componente cualitativo, con el procesamiento de indicadores cuantitativos derivados de fuentes documentales como el diferencial de precio, Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR), Beneficios antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones (EBITDA), niveles de madurez tecnológica TRL, presentados mediante estadística descriptiva. La predominancia cualitativa se sostiene porque el propósito central de la investigación es interpretar y sistematizar condiciones documentales en criterios diagnósticos.

Por su alcance, la investigación es de tipo descriptivo, porque busca especificar las propiedades, características y condiciones relevantes que oriente la transición hacia materiales sostenibles en la industria colombiana, incluyendo sus criterios técnico - ambientales, económicos, regulatorios y operativos.

Por su dimensión temporal, el estudio tiene un diseño no experimental de tipo transversal, dado que la recolección y el análisis de la información se realiza en un momento

único, sin manipulación de variables, con el propósito de describir el fenómeno y consolidar una propuesta a partir de la información disponible en el período de estudio.

En la Tabla 9 se presenta la alineación entre los objetivos específicos de la investigación, las actividades desarrolladas y los resultados esperados para cada uno de ellos.

Tabla 9

Alineación de objetivos específicos con actividades y resultados esperados

Objetivos específicos	Tipo	Descripción metodológica	Actividades	Resultado esperado
Analizar el estado del arte y el marco normativo nacional e internacional aplicable a la transición de PSU en el sector de empaques y envases.	Cualitativa	Revisión documental de fuentes académicas, institucionales y normativas nacionales e internacionales.	• Búsqueda y análisis de artículos científicos, informes técnicos y normativas. • Análisis de experiencias internacionales.	Documento de estado del arte que sintetiza tendencias, marcos regulatorios y casos de referencia aplicables al contexto colombiano.
Caracterizar las aplicaciones, barreras y capacidades del contexto colombiano para la sustitución o rediseño de PSU en el sector de empaques y envases.	Cualitativa	Análisis de información técnica, sectorial y de contexto nacional.	• Revisión de literatura técnica y sectorial. • Identificación de barreras y capacidades tecnológicas, económicas y regulatorias nacionales.	Caracterización del contexto colombiano con identificación de brechas, oportunidades y condiciones para la transición.
Construir los criterios técnico - ambientales, económicos, regulatorios y operativos que estructuran la herramienta de diagnóstico multicriterio.	Cuantitativa	Integración de información documental y normativa para la definición de criterios estructurantes.	• Sistematización de criterios a partir de la revisión documental y la caracterización del contexto. • Estructuración de los criterios en capas y fases secuenciales de la herramienta.	Conjunto de criterios técnico - ambientales, económicos, regulatorios y operativos que estructuran la herramienta de diagnóstico propuesta.

Muestra

Dado el carácter documental de la investigación, se establece una muestra de fuentes secundarias que sustenta el diagnóstico sectorial desarrollado en el capítulo de Trabajo de Campo. Esta muestra está compuesta por 26 fuentes documentales distintas y no corresponde al total de fuentes empleadas en la investigación: el marco teórico y los demás capítulos del documento se sustentan en un cuerpo bibliográfico más amplio, referenciado en su totalidad en el apartado de referencias.

Instrumentos

Como se mencionó, la muestra documental que sustenta el diagnóstico está compuesto por 26 fuentes, clasificadas en cuatro categorías según su naturaleza institucional: fuentes institucionales (9), correspondientes a bases de datos y reportes oficiales del Estado colombiano, entre ellas el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Departamento Administrativo de la Función Pública; fuentes sectoriales (6), correspondientes a informes y bases de datos de gremios y asociaciones de la industria plástica colombiana, entre ellas Acoplásticos, el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC), el Compromiso Empresarial para la Economía Circular (CEMPRE) y la Asociación Nacional de Comercio Exterior (ANALDEX); fuentes académicas y técnicas (5), correspondientes a artículos científicos y normas técnicas internacionales que sustentan los criterios de madurez tecnológica y desempeño ambiental empleados en el diagnóstico; y fuentes de mercado e industria comercial (6), correspondientes a reportes especializados utilizados para dimensionar tendencias de crecimiento y demanda de materiales sostenibles a escala global y regional.

Como procedimiento complementario, se realiza un análisis normativo específico sobre los instrumentos regulatorios identificados en fuentes institucionales del gobierno.

Técnicas para el Análisis de Información

Considerando el enfoque documental de la investigación, se emplean cuatro técnicas de análisis diferenciadas según el tipo de información procesada.

Análisis de contenido temático. Para el procesamiento de la revisión documental se utiliza el análisis de contenido temático, mediante el cual la información extraída de cada fuente se organiza, codifica y agrupa en las categorías técnico - ambiental, económica, regulatoria y operativa que estructuran la herramienta de diagnóstico. Esta técnica permite identificar

patrones, brechas y hallazgos recurrentes entre las fuentes institucionales, sectoriales, académicas y de mercado consultadas.

Análisis cuantitativo descriptivo. Las categorías técnico - ambiental, económica y operativa incluyen indicadores cuantitativos derivados de datos documentales (porcentajes, razones, comparativos de ciclo de vida y desempeño de mercado), los cuales se calculan y presentan mediante estadística descriptiva: frecuencias, porcentajes, y comparativos entre valores de referencia. No se aplica un paquete estadístico inferencial, dado que la investigación no involucra una muestra de sujetos ni busca generalizar resultados a una población mediante prueba de hipótesis estadística; los cálculos se realizan mediante hojas de cálculo, suficientes para el procesamiento descriptivo de los datos documentales recolectados.

Análisis normativo. Para la categoría regulatoria se emplea una técnica de análisis normativo orientada a determinar el alcance, la vigencia y las condiciones de aplicabilidad de los instrumentos legales identificados, particularmente la Ley 2232 de 2022 y la Resolución 803 de 2024. Esta técnica permite traducir las disposiciones normativas en condiciones evaluables dentro de la herramienta de diagnóstico, diferenciando obligaciones de cumplimiento vigente de aquellas en fase de implementación gradual.

Análisis estructural mediante Matriz de Influencias Directas (MID). Para jerarquizar los criterios construidos en cada categoría según su nivel de influencia y dependencia, se aplica el análisis estructural propuesto por Godet citado por Pérez & Vargas (2016), en el marco del método MICMAC (Matrice d'Impacts Croisés Multiplication Appliquée à un Classement), ajustado a la construcción de la Matriz de Influencias Directas (MID). En esta matriz, cada par de criterios se valora en una escala de 0 a 3 según su nivel de influencia directa; a partir de la suma por filas (motricidad) y por columnas (dependencia), los criterios se ubican en un plano motricidad - dependencia que permite diferenciar criterios motores, de enlace, dependientes y autónomos. El análisis no incluye el cálculo de influencias indirectas mediante elevación

matricial (matriz MII), dado que el propósito es jerarquizar los criterios ya construidos para la secuenciación de fases de la herramienta, y no modelar la propagación de efectos de segundo orden entre ellos.

Marcos de estructuración TRM y MLP. Los resultados de las técnicas de análisis se organizan mediante dos marcos conceptuales: el Technology Roadmapping (TRM), siguiendo la lógica de capas ¿por qué?, ¿qué? y ¿cómo? propuesta por Phaal (2004), y el Marco de Perspectiva Multinivel (MLP) de Geels & Schot (2007), que enmarca la dinámica de transición sociotécnica del sector. Estos marcos no analizan datos documentales de forma directa; estructuran la arquitectura en capas y fases de la herramienta de diagnóstico a partir de los hallazgos obtenidos con las técnicas anteriores

Síntesis integradora. Los resultados de las técnicas anteriores: análisis de contenido temático, análisis cuantitativo descriptivo, análisis normativo y análisis estructural mediante la Matriz de Influencias Directas (MID), se integran y se estructuran mediante los marcos del Technology Roadmapping (TRM) y la Perspectiva Multinivel (MLP) en la construcción de los criterios y la arquitectura de la herramienta de diagnóstico multicriterio.

Trabajo de Campo

El presente capítulo desarrolla el diagnóstico sectorial que sustenta la construcción de la herramienta de diagnóstico multicriterio propuesta en esta investigación. A partir de la revisión del muestreo documental descrito en la metodología, se caracteriza el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana en cuatro categorías: técnico - ambiental, económica, regulatoria y operativa.

El capítulo inicia con un diagnóstico general del sector, que dimensiona su estructura productiva, tamaño empresarial y capacidad de procesamiento a partir de fuentes oficiales y sectoriales. A continuación, se desarrollan los diagnósticos específicos por dimensión: el técnico - ambiental, que evalúa la madurez tecnológica de los materiales sostenibles y su desempeño ambiental comparado; el económico, que analiza la competitividad de precios y las condiciones de mercado; el regulatorio, que examina el marco normativo vigente aplicable a la transición; y el operativo, que caracteriza las capacidades instaladas del sector en infraestructura, talento y cadena de suministro. Finalmente, el capítulo presenta el análisis de resultados que integra los hallazgos de los cuatro diagnósticos en la construcción de los criterios que estructuran la herramienta de diagnóstico multicriterio.

Diagnóstico General del Sector

El Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), es la entidad encargada de recolectar datos para generar información confiable y oportuna para las entidades públicas, privadas de carácter nacional, regional y puede ser consultada por instituciones, investigadores y gremios por la calidad de información que se puede obtener. Por lo tanto, en concordancia con su propósito institucional, una de las herramientas que el DANE propone es la Encuesta Anual Manufacturera (EAM), cuyo principal objetivo es brindar información del sector industrial en Colombia, que permita analizar su comportamiento y estructura (DANE, 2025c).

La EAM utiliza los códigos CIIU (Clasificación Industrial internacional Uniforme) como eje estructural estándar para organizar sus reportes. Actualmente, está vigente la versión Rev. 4 A.C. del año 2022 adaptada por el DANE para Colombia teniendo en cuenta la versión de las Naciones Unidas del 2009. Este sistema CIIU, permite clasificar las unidades productivas según el proceso económico que realizan, en la Figura 24 se puede observar la estructura jerárquica de los códigos CIIU (DANE, 2022).

Figura 24

Organización jerárquica de los códigos CIIU



Nota: Adaptado de *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas*, por DANE, 2022.

Por lo tanto, para la presente investigación se identifica la sección, divisiones, grupos y clases que son necesarios para el diagnóstico del sector. Lo anterior, porque además del DANE, informes sectoriales también tienen en cuenta esta categorización para presentar sus informes. En la Tabla 10, se condensa el resultado de lo que compete al desarrollo de esta investigación.

Tabla 10

Identificación CIIU pertinente a la investigación

CIIU Rev. 4 A.C.			
C Industrias manufactureras			
Sección	Abarca la transformación física o química de materiales, sustancias o componentes en productos nuevos. Puede ser un producto acabado (producto terminado) o semiacabado (como insumo para otra industria)		
División	20 Fabricación de sustancias y productos químicos Comprende la transformación de materias primas orgánicas e inorgánicas mediante un proceso químico y la transformación de productos	22 Fabricación de productos de caucho y de plástico Comprende la fabricación de productos de caucho y de plástico	
	201 Fabricación de sustancias y productos químicos básicos	222 Fabricación de productos de plástico	
Grupo	Comprende la fabricación de plásticos obtenidos por procesos de polimerización	Procesamiento de resinas de plástico nuevas o gastadas (recuperadas) para la fabricación de una amplia variedad de productos intermedios o finales, mediante procesos como moldeado por compresión, soplado o insuflado de aire, extrusión, inyección, golpe y fundición	
Clase	2013 Fabricación de plásticos en formas primarias Plásticos que generalmente se obtienen por procesos de polimerización	2221 Fabricación de formas básicas de plástico Formas básicas semielaboradas mediante procesos como extrusión, laminación o moldeo, que sirven de insumo para la fabricación de artículos finales	2229 Fabricación de artículos de plástico n.c.p. Fabricación de productos finales de plástico a partir de formas básicas, incluidos envases, empaques, artículos para construcción, hogar y uso industrial
	Fabricación de PE, PP, PS, PVC, teflón, poli acetatos de vinilo, resinas acrílicas obtenidas del ácido acrílico y sus derivados, como el acrilato de metilo	Monofilamentos, planchas, láminas, barras, varillas, perfiles, películas, hojas, tiras, tubos y mangueras	Envases y empaques: bolsas, sacos, cajones, frascos, botellas, garrafones de plástico
			Artículos a base de plástico recuperado (reciclado)

Nota: Adaptado de *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas*, por DANE, 2022.

La estructura jerárquica de la CIIU Rev. 4 A.C. permite ubicar la cadena productiva del plástico en tres clases que se conectan de forma sucesiva en el proceso de transformación. La clase 2013, fabricación de plásticos en formas primarias, es en donde se producen las resinas

y polímeros mediante procesos de polimerización; sin embargo, la clasificación no distingue entre polímeros convencionales de origen fósil y polímeros de base biológica o reciclado. La clase 2221, fabricación de formas básicas de plástico, representa el eslabón intermedio, en el que las resinas primarias se transforman en semielaborados, es decir, láminas, películas, tubos y perfiles mediante extrusión, laminación o moldeo. La clase 2229, fabricación de artículos de plástico n.c.p (No Clasificado Previamente), es la de mayor relevancia para esta investigación, pues en ella se producen los envases, empaques y demás artículos. Se debe tener en cuenta que, se evidencia la ausencia de categorías diferenciadas para materiales sostenibles en los tres niveles de la clasificación.

Tamaño del Sector

El dimensionamiento del sector plástico colombiano requiere la consulta de fuentes complementarias que puede referenciar el mismo atributo pero desde perspectivas metodológicas distintas y no necesariamente comparables. La EAM del DANE constituye la fuente oficial de referencia para el análisis de la estructura productiva formal: cubre establecimientos industriales con diez o más personas ocupadas y/o un valor de producción anual superior a \$780,1 millones de pesos (último dato de referencia 2024), clasificados según su actividad económica principal conforme a la CIU Rev. 4 A.C. (DANE, 2025a). Por su parte, el Registro Único Empresarial y Social (RUES), administrado por la Red de Cámaras de Comercio (Confecámaras), registra la totalidad de empresas con matrícula mercantil activa en el país, clasificadas por tamaño según los criterios del Decreto 957 de 2019 del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo en: microempresa, pequeña, mediana y gran empresa, diferenciadas por ingresos por actividades ordinarias anuales actualizados con la Unidad de Valor Tributario (UVT), como se puede ver en la Tabla 11 (Función Pública, 2019).

Tabla 11

Tamaño empresa según UVT manufactura

UVT Sector Manufactura		
Tamaño Empresa	Desde	Hasta
Micro		23.563
Pequeña	23.564	204.995
Mediana	204.996	1.736.565
Grande	1.736.566	

Nota: Adaptado de Decreto 957 de 2019, por Función Pública, 2019.

Los valores corresponden a Unidades de Valor Tributario (UVT). Para 2026, 1 UVT = \$52.374 según la DIAN.

Por lo tanto, las cifras de establecimientos reportadas por la EAM y las empresas registradas en Confecámaras no son equivalentes ni deben sumarse: la primera aproxima la red industrial formal y activa del sector, mientras la segunda refleja su densidad empresarial total incluyendo microempresas y unidades de menor escala que no alcanzan el umbral de cobertura de la encuesta. En esta investigación, ambas fuentes se utilizan de forma complementaria para construir una caracterización integral del sector.

El diagnóstico de la estructura productiva formal del sector plástico colombiano se puede observar en la Tabla 12 y parte de los datos reportados por la EAM para el período 2022 - 2024, lo cual permite identificar la evolución de los establecimientos industriales, el personal ocupado y la producción bruta de las clases CIIU 2013, 2221 y 2229, en relación con el total de la industria manufacturera nacional (DANE, 2025b).

Tabla 12

Establecimientos, personal ocupado y producción bruta de las clases CIIU 2013, 2221 y 2229 frente al total manufacturero nacional, 2022 - 2024

CIIU	Año 2022			Año 2023			Año 2024		
	Establecimientos	Personal ocupado	Producción Bruta [COP]	Establecimientos	Personal ocupado	Producción Bruta [COP]	Establecimientos	Personal ocupado	Producción Bruta [COP]
Total industria manufacturera 2013	6.775	710.462	422.862.533.444	6.714	719.183	437.950.349.867	6.583	730.844	443.880.402.644
2221	22	2.159	9.438.453.965	21	2.125	6.866.618.211	22	2.155	6.135.835.608
2229	140	17.486	7.788.248.068	147	18.969	7.435.408.456	141	19.629	7.693.301.546
2229	377	39.159	10.438.480.405	370	39.338	10.947.710.129	369	39.756	10.934.034.432
Total clases - Productos plásticos	539	58.804	27.665.182.438	538	60.432	25.249.736.796	532	61.540	24.763.171.586
Total participación clases en la industria manufacturera	7,96%	8,28%	6,54%	8,01%	8,40%	5,77%	8,08%	8,42%	5,58%

Nota: Adaptado de Encuesta Anual Manufacturera, por DANE, 2025.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam/eam-historicos>

Los datos de la Tabla 12 revelan que las clases CIIU vinculadas a la cadena productiva del plástico representaron en 2024 el 8,08% de los establecimientos formales de la industria manufacturera nacional, el 8,42% del personal ocupado y el 5,58% de la producción bruta, consolidándose como uno de los subsectores con mayor peso dentro del total manufacturero.

En cuanto a la evolución del período analizado, el número total de establecimientos de las tres clases presentó una leve contracción, pasando de 539 en 2022 a 532 en 2024, tendencia coherente con la reducción del total nacional de establecimientos manufactureros, que descendió de 6.775 a 6.583 en el mismo período. Sin embargo, el personal ocupado mostró un comportamiento contrario, con un crecimiento que pasó de 58.804 personas en 2022

a 61.540 en 2024, lo que sugiere un proceso de consolidación productiva en el que menos establecimientos concentran una mayor fuerza laboral.

En este contexto, la clase 2229, fabricación de artículos de plástico n.c.p, concentra la mayor parte de la actividad del sector y constituye el eslabón de mayor relevancia para esta investigación, dado que en ella se producen los envases, empaques y demás artículos plásticos objeto de la transición propuesta en esta investigación. Con 369 establecimientos en 2024, esta clase agrupa el 69,4% del total de establecimientos de las tres clases analizadas, el 64,6% del personal ocupado con 39.756 personas, y el 44,2% de la producción bruta conjunta con \$10,9 billones. Su evolución en el período refleja estabilidad, ya que a pesar de una reducción en establecimientos, de 377 a 369 entre 2022 y 2024, estuvo acompañada de una persistencia en personal ocupado, lo que ratifica su peso como el núcleo productivo del sector. Por el contrario, la clase 2013 registró una caída significativa en producción bruta, al pasar de \$9,4 billones en 2022 a \$6,1 billones en 2024, mientras que la clase 2221 mostró el mayor dinamismo en empleo del período con un crecimiento de 17.486 a 19.629 personas ocupadas, evidenciando una expansión en la producción de formas semielaboradas que alimentan directamente la clase 2229.

Sin embargo, los datos de la EAM capturan únicamente el tejido industrial formal que supera los umbrales de inclusión de la encuesta, por lo que la caracterización del sector requiere complementarse con el registro de Confecámaras, que incluye la totalidad de unidades productivas activas independientemente de su tamaño, como se presenta a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13

Distribución de empresas de las clases CIIU 2013, 2221 y 2229 por tamaño empresarial según Decreto 957 de 2019, año 2024

CIIU	2024				Total
	Tamaño empresa				
	Micro	Pequeña	Mediana	Grande	
Industria manufacturera	167.217	11.262	2.881	1.157	182.517
2013	355	68	20	7	450
2221	584	163	57	22	826
2229	1.721	539	190	90	2.540
TOTAL CIIU	2.660	770	267	119	3.816
Participación sector plástico en la industria manufacturera	1,59%	6,84%	9,27%	10,29%	2,09%

Nota: Adaptado de Cifras del sector empresarial, por Confecámaras, 2024.

<https://confecamaras.org.co/sector-empresarial-en-cifras/>

Confecámaras (2024) registró un total de 3.816 empresas con matrícula mercantil activa en las tres clases CIIU vinculadas a la cadena productiva del plástico, equivalentes al 2,09% del total empresarial manufacturero nacional de 182.517 unidades. Se puede notar que las microempresas concentran el 69,7% del total de empresas del sector plástico con 2.660 unidades, seguidas por las pequeñas con el 20,2% (770 empresas), las medianas con el 7,0% (267 empresas) y las grandes con apenas el 3,1% (119 empresas). Al analizar por clase, la mayor concentración empresarial se encuentra en la clase 2229 con 2.540 empresas, el 66,6% del total del sector, de las cuales 1.721 son microempresas.

Al comparar los 532 establecimientos registrados por la EAM en 2024 frente a las 3.816 empresas registradas por Confecámaras para el mismo año, se establece que la encuesta oficial captura directamente el 13,9% del tejido empresarial del sector plástico colombiano en términos de número de empresas, dejando por fuera de la medición oficial al 86,1% restante.

Esta brecha entre el universo registrado y el universo formal medido estadísticamente constituye un hallazgo diagnóstico relevante: la información disponible sobre el sector plástico colombiano refleja predominantemente la realidad de sus establecimientos de mayor escala, dejando fuera de la medición oficial a la gran mayoría de las unidades productivas que lo conforman.

Capacidad Productiva del Sector

La caracterización del sector plástico colombiano en términos de establecimientos y empresas registradas permite dimensionar su estructura, pero no su escala productiva. Para complementar ese panorama, es necesario analizar los volúmenes físicos de procesamiento de materias plásticas con énfasis en el subsector de empaques y envases que constituye el objeto central de esta investigación.

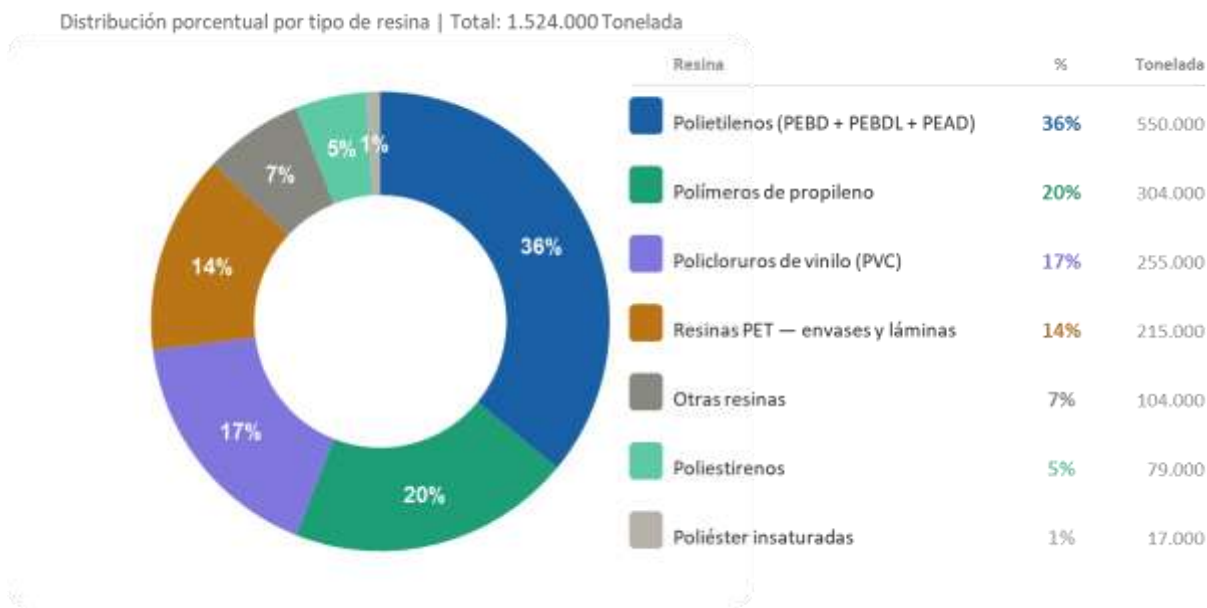
Desde una perspectiva de volúmenes físicos, el sector plástico colombiano procesó en 2024 un consumo aparente de resinas plásticas de 1.524.000 toneladas. De este volumen total, los empaques y envases concentraron en promedio el 58% del tonelaje procesado durante el período, equivalente a aproximadamente 884.000 toneladas en 2024, consolidándose como el principal mercado de destino de las materias plásticas en el país, seguido por la construcción con el 22% y la agricultura con el 6% (Acoplásticos, 2025). Este dato es determinante para enmarcar el objeto de la presente investigación: más de la mitad de todo el plástico procesado en Colombia tiene como destino final la fabricación de envases y empaques, lo que convierte a la clase 2229 en el eslabón con mayor masa crítica de transformación y, por tanto, con mayor potencial de impacto en la transición hacia materiales sostenibles.

En cuanto a la composición del tonelaje procesado por tipo de resina, la Figura 25 muestra que los polietilenos lideran con el 36% del consumo aparente nacional, seguidos por los polímeros de propileno (20%), el PVC (17%) y las resinas PET para envases y láminas

(14%), concentrando entre estos cuatro materiales el 87% del total procesado en 2024 (Acoplásticos, 2025).

Figura 25

Consumo aparente de resinas plásticas en Colombia, 2024



Nota: Adaptado de *Plástico en Colombia 2025* (p.109), por Acoplásticos, 2025.

Los datos presentados en este diagnóstico general permiten establecer tres hallazgos que orientan el desarrollo de la herramienta de diagnóstico: primero, la clase 2229, fabricación de productos finales, concentra el mayor número de establecimientos, el mayor volumen de empleo y la mayor producción bruta del sector; segundo, el 86,1% de las empresas registradas operan fuera del radar estadístico oficial; y tercero, el 58% de todo el plástico procesado en Colombia tiene como destino los empaques y envases, lo que dimensiona la escala real del subsector objeto de esta investigación.

Diagnóstico Técnico - Ambiental

La finalidad de este diagnóstico es identificar las condiciones técnicas y ambientales que influyen en la transición de los PSU hacia materiales sostenibles. Para ello se proponen tres aspectos: el nivel de madurez tecnológica de los materiales sostenibles evaluado mediante la escala TRL, la síntesis de impactos ambientales comparativos reportados en estudios de ACV organizados en términos de huella de carbono y categorías de impacto, y la cobertura territorial de la infraestructura de aprovechamiento disponible en Colombia.

Nivel de Madurez Tecnológica

Un punto importante que orienta esta investigación es si los materiales sostenibles como alternativas a los PSU pueden efectivamente implementarse a escala industrial en el contexto colombiano, o si su desarrollo tecnológico aún se encuentra en fases de laboratorio o demostración que impiden su adopción productiva.

Para responder esta pregunta de forma objetiva, el diagnóstico adopta la escala TRL (Technology Readiness Level), porque permite determinar, mediante criterios estandarizados, en qué etapa del ciclo de desarrollo se encuentra cada material (ver Tabla 14): desde la investigación básica (TRL 1 - 3), pasando por la validación y evaluación del sistema (TRL 4 - 6), hasta la demostración y comercialización plena (TRL 7 - 9). Esta escala fue desarrollada originalmente por la NASA en los años setenta como herramienta de planificación tecnológica y formalizada mediante la norma ISO 16290:2013, convirtiéndose en el estándar de referencia para la evaluación de madurez tecnológica en proyectos de investigación, desarrollo e innovación (Olguin, 2025).

Tabla 14

Niveles de madurez tecnológicas - TRL

Nivel TRL	Nombre	Fase	Descripción
1	Investigación básica	Formulación	Nivel más bajo de madurez tecnológica en el que la investigación científica comienza a traducirse en investigación aplicada
2	Formulación tecnológica		Verificados los fundamentos, se diseñan aplicaciones prácticas. Los ejemplos se limitan a estudios especulativos o modelos de utilidad.
3	Investigación aplicada		Comienza el desarrollo del producto. El trabajo pasa a la fase experimental para verificar que el concepto funciona según lo previsto
4	Prototipo a pequeña escala	Evaluación	Tecnología validada en el laboratorio, se considera de “baja fidelidad”, además se determina si los elementos individuales podrían funcionar como un sistema.
5	Prototipo a gran escala		Los componentes tecnológicos básicos están integrados en un sistema a escala de laboratorio de “alta fidelidad”. En el caso de tecnologías facilitadoras clave, es en un entorno industrialmente relevante.
6	Sistema Prototipo		Comienza el desarrollo de ingeniería. El prototipo debe ser capaz de realizar todas las funciones requeridas en un entorno real o en condiciones industrialmente relevantes. Esto representa un paso importante para demostrar la madurez de una tecnología.
7	Sistema en demostración	Demostración	Este paso requiere la demostración del prototipo en una situación real, en un entorno operativo a escala pre comercial. El diseño final está prácticamente terminado.
8	Primer sistema a escala comercial		Sistema completo y calificado a escala comercial de fabricación, construcción y operación.
9	Aplicación comercial completa	Disponible comercialmente	Tecnología totalmente probada en el entorno operativo y disponible comercialmente para los clientes

Nota: Adaptado de *Clasificación del nivel de madurez (TRL) de la tecnología Heliocaminus para el secado solar de madera*, por Olguin, 2025.

Su elección sobre otras metodologías se sustenta con el respaldo normativo internacional (ISO 16290:2013), es la utilizada por la Comisión Europea y permite comparar tecnologías mediante una métrica común independientemente del sector de aplicación (Börner & Zinn, 2024).

Desde una perspectiva global, el estado de madurez de los materiales sostenibles disponibles como alternativas a los PSU es diverso. Los PSU convencionales operan universalmente en TRL 9, lo que refleja décadas de desarrollo industrial consolidado y cadenas de valor completamente maduras. En contraste, los materiales sostenibles presentan rangos de madurez significativamente distintos entre sí: el PLA y el PBAT han alcanzado niveles TRL 8 - 9 con producción comercial a escala industrial; el PBS y el TPS se sitúan en TRL 7 - 8 con producción comercial pero de escala limitada; mientras que los PHA, dependiendo de la

variante, se encuentran predominantemente en TRL 5 - 8, con solo algunos procesos en escala pre comercial (TRL 6), y el PCL en TRL 6 - 7 con producción de nicho (Börner & Zinn, 2024; de Jong et al., 2025). La Tabla 15 presenta de forma sistemática los rangos TRL globales reportados en literatura verificada para los PSU de referencia y los materiales sostenibles analizados, junto con la disponibilidad comercial identificada para Colombia a partir de fuentes sectoriales verificadas.

Tabla 15

TRL para PSU y materiales sostenibles

Material	TRL Global (rango reportado en literatura)	Disponibilidad en Colombia	Observaciones	Fuente
PLÁSTICOS DE UN SOLO USO				
Tereftalato de Polietileno PET	TRL 9 (aplicación comercial completa)	Producción local e importación. Presente en toda la cadena productiva nacional.	Reciclable; mayor tasa de recuperación efectiva entre los plásticos en Colombia.	(Acoplásticos, 2025; Börner & Zinn, 2024; de Jong et al., 2025)
Polietileno de Alta y Baja Densidad HDPE / LDPE			HDPE reciclable; LDPE con reciclaje técnicamente viable pero bajas tasas de recuperación efectiva.	
Polipropileno PP			Reciclable técnicamente; baja tasa de reciclaje efectivo en Colombia. Ampliamente usado en vasos, cubiertos y envases de comida.	
Cloruro de Polivinilo PVC			Difícil de reciclar debido a la diversidad de aditivos (plastificantes, estabilizantes). Genera dioxinas si se incinera. Presencia relevante en empaques rígidos (blíster) y films de envoltura.	
Poliestireno (General y Expandido) PS / EPS			Reciclaje de EPS logísticamente muy difícil. Alta fragmentación en microplásticos.	
ALTERNATIVAS DE MATERIALES SOSTENIBLES				
Ácido Poliláctico PLA	TRL 8 - 9 (producción comercial industrial) TRL 6 - 7 en aplicaciones piloto de empaques específicos	Disponible con producción nacional incipiente. También disponible vía importación.	Material sostenible con mayor madurez global. Aplicaciones: vasos, cubiertos, films compostables. Requiere infraestructura de compostaje industrial para fin de vida, aún incipiente en Colombia.	(Acoplásticos & ICIPC, 2025; Börner & Zinn, 2024; de Jong et al., 2025; NPAP, 2025; Siracusa & Blanco, 2020)
Polihidroxialcanoatos PHA / PHB / PHBV	TRL 5 - 8 (heterogéneo según variante) PHB/PHBV: algunos procesos en TRL 6 pre comercial PHA: TRL 4 - 5	Disponible vía importación en aplicaciones específicas.	Alto potencial técnico: biodegradable en suelo, marino e industrial; propiedades similares al PP. Principal barrera: costo de producción muy elevado y escala industrial reducida.	
Polibutileno Adipato Tereftalato PBAT	TRL 8 - 9 (producción comercial industrial)	Sin producción local identificada.	Origen fósil pero biodegradable y compostable industrial. Propiedades similares a LDPE. Frecuentemente usado en mezclas PLA/TPS/PBAT para bolsas y films compostables.	

Polibutileno Succinato PBS	TRL 7 - 8 (producción comercial limitada)	Biodegradable con buenas propiedades mecánicas (más dúctil que PLA).
		Aplicaciones: films, cubiertos compostables, empaques flexibles.
		Costos de producción superiores a poliolefinas limitan adopción masiva.
		Puede producirse desde fuentes renovables (PBS biobasado). 100% biobasado y de bajo costo.
Almidón Termoplástico TPS	TRL 7 - 9 (producción comercial establecida)	Materia prima abundante en Colombia (yuca, maíz).
		La alta sensibilidad a la humedad, limita propiedades de barrera.
		Frecuentemente mezclado con PLA y PBAT. Origen petroquímico pero biodegradable en suelo, marino y doméstico (no requiere compostaje industrial).
Policaprolactona PCL	TRL 6 - 7 (producción comercial de nicho)	T _f muy baja (aprox. 60°C): no apto para alimentos calientes.
		Costo superior a LDPE.
		Escala industrial global limitada. Material de reemplazo directo (drop-in): propiedades idénticas al PE fósil; reciclable en los mismos flujos.
Polietileno Biobasado Bio - PE	TRL 8 - 9 (producción comercial industrial)	No biodegradable: no resuelve el problema de residuos, solo reduce huella de carbono en producción.
		Mayor costo que PE convencional.
		Materia prima: bioetanol de caña de azúcar. Material drop-in con propiedades idénticas al PET fósil.
Tereftalato de Polietileno Biobasado Bio - PET	TRL 7 - 8 (producción parcialmente comercial)	No biodegradable; reciclable en los mismos flujos que PET convencional.

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

Los PSU convencionales cuentan con producción local consolidada y cadenas de abastecimiento establecidas en todo el territorio. Los materiales sostenibles como el TPS y el PLA, cuentan con producción nacional que apenas surge; el resto de los materiales analizados están disponibles únicamente mediante importación en volúmenes limitados, y materiales como los PHA no se identifica presencia productiva local.

El análisis conjunto de la madurez tecnológica global y la disponibilidad en Colombia permite observar la brecha entre los materiales sostenibles que ya cuentan con tecnología madura a nivel internacional (TRL 7 - 9) y su efectiva disponibilidad y capacidad de producción en el país. Materiales como el PLA, el PBAT y el Bio - PE han superado las barreras técnicas de escala a nivel global, pero en Colombia su presencia es escasa y/o dependiente de

importación. Materiales como los PHA, enfrentan simultáneamente brechas de madurez global y ausencia de producción local.

Comparativo de Huella de Carbono

La huella de carbono es el resultado de cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a un producto a lo largo de su ciclo de vida, expresadas en una unidad común: el kg de CO₂ equivalente por unidad funcional. Esta cuantificación se realiza mediante el indicador de Potencial de Calentamiento Global (GWP), que asigna a cada GEI como el O₂, CH₄, N₂O, entre otros, un factor de equivalencia respecto al CO₂ en un horizonte de 100 años, permitiendo comparar gases con distinto poder de calentamiento en una misma escala. El GWP es, por tanto, el indicador que hace operativa la huella de carbono y el de mayor consenso en los estudios de ACV de empaques plásticos y sus alternativas (Tacker et al., 2025). Para comprender el análisis comparativo, la Tabla 16 presenta los valores absolutos de GWP de referencia para cada material, expresados en kg de CO₂ equivalente a partir de fuentes verificadas.

Tabla 16

Valores de referencia de GWP para PSU y alternativas sostenibles

Material	GWP Cradle – to - gate [kg CO ₂ eq/kg]	Fuente
PSU Referencia		
PET	2,15	(Leal Filho et al., 2025)
PE	2,9	
HDPE	2,9	
LDPE	2,6	
PP	1,34	
PVC	7,83	
PS / EPS	3,68	
MATERIALES SOSTENIBLES		
PLA	1,63	(Pinlova et al., 2024)
PHA (base maíz)	1,96	(Lee et al., 2023)
PBAT (origen fósil)	5,89	(Luo et al., 2024)
PBAT (biobasado)	3,72	
PBS	6,6	(Rajendran & Han, 2023)
Bio-PE (sin crédito biogénico)	1	(Benavides et al., 2020)
Bio-PET (base maíz)	1,36	(Shen et al., 2012)

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

Sobre esa base, la Tabla 17 organiza las variaciones relativas reportadas en estudios de ACV entre materiales sostenibles y los PSU de referencia, dado que los estudios disponibles utilizan unidades funcionales heterogéneas, bien sea por kilogramo de material, por número de envases o por volumen de producto contenido, lo que complicaría cualquier comparación directa de cifras absolutas entre estudios distintos.

Tabla 17
Matriz de impacto GWP

Material sostenible / PSU de referencia	Valor de referencia sostenible [kg CO ₂ eq/kg]	PET	PE	HDPE	LDPE	PP	PVC	PS / EPS
Valor de referencia PSU [kg CO ₂ eq/kg]		2,15	2,90	2,90	2,60	1,34	7,83	3,68
PLA	1,63	76%	56%	56%	63%	122%	21%	44%
PHA (base maíz)	1,96	91%	68%	68%	75%	146%	25%	53%
PBAT (origen fósil)	5,89	274%	203%	203%	227%	440%	75%	160%
PBAT (biobasado)	3,72	173%	128%	128%	143%	278%	48%	101%
PBS	6,60	307%	228%	228%	254%	493%	84%	179%
Bio-PE (sin crédito biogénico)	1,00	47%	34%	34%	38%	75%	13%	27%
Bio-PET (base maíz)	1,36	63%	47%	47%	52%	101%	17%	37%

Valores <100% indican GWP inferior al PSU de referencia (favorable)
Valores >100% indican GWP superior (desfavorable)

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

La matriz evidencia que migrar hacia alternativas sostenibles no significa implícitamente una reducción en la huella de carbono. Materiales como el Bio – PE y Bio – PET representan la mayor ventaja climática, seguidos del PLA Y PHA. Sin embargo, polímeros convencionales

como el PP, representan la mayor exigencia para una transición por su menor contribución a GWP.

Síntesis de impactos ambientales reportados en estudios de ACV

Los estudios de ACV identificados mediante el protocolo de búsqueda comparan los materiales sostenibles frente a plásticos convencionales de origen fósil en múltiples categorías de impacto ambiental.

Para las categorías de impacto, los estudios revisados evalúan el desempeño ambiental de los materiales sostenibles en cinco categorías de impacto. Estas categorías no las define la ISO 14044:2006, lo que la norma establece es que debe haber una estructura procedimental para la fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV). Por lo anterior, las categorías presentadas a continuación son las reportadas con mayor frecuencia en los estudios analizados y están asociadas a la metodología ReCiPe2016. La acidificación (kg SO₂ - EQ a aire) refleja las emisiones de Dióxido de azufre (SO₂), Óxidos de nitrógeno (NO_x) y Amoníaco (NH₃) que degradan ecosistemas terrestres y acuáticos. La eutrofización (kg P- EQ a agua dulce) cuantifica el aporte de fósforo a ecosistemas acuáticos (Koch & Mihalyi, 2018). El uso de tierra (m² × año Tierras de cultivo anuales EQ) y el uso de agua (m³ Agua - EQ consumida) reflejan la presión sobre recursos naturales ejercida por la producción agrícola de las materias primas. El agotamiento de recursos fósiles (kg Oil – EQ) es la categoría donde los materiales biobasados presentan sus ventajas más consistentes frente a los PSU convencionales (Huijbregts et al., 2017). La Tabla 18 presenta el resumen de estos resultados mediante escala cualitativa de intensidad para cada material analizado.

Tabla 18

Síntesis de categorías de impacto ambiental reportadas en estudios de ACV

Material	Acidificación	Eutrofización	Uso de tierra	Uso de agua	Agotamiento de recursos fósiles	Causa principal	Fuente
PLA	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo	Cultivo intensivo de maíz o caña de azúcar; uso de fertilizantes y maquinaria agrícola	(Ali et al., 2023; Benavides et al., 2020; Börner & Zinn, 2024; de Jong et al., 2025; Koch & Mihalyi, 2018; Lüneburg et al., 2025; Luo et al., 2024; Wojnarowska et al., 2025)
PHA / PHB / PHBV	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Producción por fermentación microbiana; menores impactos agrícolas que cultivos extensivos	
PBAT	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo	Uso de biomasa forestal de segunda generación como feedstock	
PBS	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Solo el componente de ácido succínico es biobasado; el Butanodiol de origen fósil es el mayor contribuyente	
TPS	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo	Cultivo agrícola de almidón (maíz, yuca); impactos proporcionales a la intensidad del cultivo	
PCL	Sin impacto agrícola	Sin impacto agrícola	Sin impacto agrícola	Sin impacto agrícola	Alto	Origen petroquímico; ausencia de fase agrícola elimina penalidades asociadas pero impide ventaja en agotamiento fósil	
Bio-PE	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Cultivo intensivo de caña de azúcar; alta demanda de tierra y agua por unidad de producción	
Bio-PET	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Solo la fracción biobasada, Mono etilenglicol (MEG), genera impactos agrícolas; proporcionales al contenido bio	

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

Se puede observar que ningún material sostenible analizado presenta ventaja simultánea en todas las categorías de impacto en producción: todos los materiales biobasados de origen agrícola: PLA, PBAT, TPS y Bio-PE, muestran desventajas en acidificación, eutrofización y uso de tierra y agua frente a sus equivalentes fósiles, compensadas por ventajas en agotamiento de recursos fósiles. El PCL es el único material que no registra impactos en las cuatro categorías de origen agrícola, dado que su materia prima es de origen petroquímico y no requiere cultivos ni fertilizantes; sin embargo, esa misma condición le impide mostrar ventaja en agotamiento de recursos fósiles, evidenciando que su pertinencia ambiental reside en su biodegradabilidad al final de vida y no en la fase de producción (de Jong et al., 2025).

Síntesis de los escenarios de fin de vida reportados en estudios de ACV

Los escenarios de fin de vida es un factor determinante del desempeño ambiental de los materiales sostenibles, superando en algunos casos las diferencias registradas en la fase de producción (Mhaddolkar et al., 2025). Los estudios revisados evalúan tres escenarios: el reciclaje mecánico, que implica la recuperación y reprocesamiento del material para producir nueva resina; el compostaje industrial, tiene que ver con la degradación controlada del material en condiciones de temperatura y humedad específicas para producir compost; y el vertedero o relleno sanitario, que involucra la disposición final del residuo sin recuperación de valor material o energético. La Tabla 19 resume el desempeño ambiental reportado para cada material en estos tres escenarios.

Tabla 19

Síntesis del desempeño ambiental por escenario de fin de vida reportado en estudios de ACV

Material	Reciclaje mecánico	Compostaje industrial	Vertedero / Relleno sanitario	Observación	Fuentes
PLA	Favorable	Viable	Limitado	El reciclaje mecánico es la ruta preferida porque minimiza las emisiones netas del ciclo de vida. El compostaje industrial es técnicamente viable pero el proceso es energéticamente intenso, lo que reduce su ventaja climática frente al reciclaje. El vertedero revierte todos los beneficios climáticos de la fase de producción por generación de metano en condiciones anaeróbicas.	
PHA / PHB / PHBV	Viable	Favorable	Limitado	Es el único material analizado con capacidad de biodegradación en tres entornos distintos: industrial, doméstico y marino. El compostaje es su ruta más ventajosa. El vertedero genera metano, pero en menor proporción que otros bioplásticos dado su menor ritmo de degradación anaeróbica.	
PBAT	Favorable	Favorable	Limitado	Presenta buen desempeño tanto en reciclaje mecánico como en compostaje industrial, siendo el material con mayor flexibilidad de fin de vida entre los analizados. El vertedero revierte los beneficios climáticos por biodegradación anaeróbica y generación de metano.	(Ali et al., 2023; Benavides et al., 2020; de Jong et al., 2025; Koch & Mihalyi, 2018; Lüneburg et al., 2025; Mhaddolkar et al., 2025)
PBS	Viable	Viable	Limitado	Desempeño adecuado en reciclaje y compostaje sin destacar en ninguno de los dos. Genera menos metano en vertedero que PLA o TPS debido a su menor tasa de biodegradación anaeróbica, lo que lo hace comparativamente menos crítico en ese escenario.	
TPS	Limitado	Favorable	Limitado	El compostaje industrial es su mejor y prácticamente única ruta viable. Su incompatibilidad con los flujos convencionales de reciclaje plástico es una restricción estructural del material. El vertedero es el escenario más crítico por su alta tasa de generación de metano en condiciones anaeróbicas.	
PCL	Limitado	Viable	Viable	Su ventaja ambiental reside en la biodegradabilidad en entornos no controlados, incluyendo suelo y compostaje doméstico, sin requerir infraestructura industrial especializada. La infraestructura de reciclaje mecánico para PCL es muy limitada.	
Bio-PE	Favorable	No aplica	Limitado	Material drop-in cuya ventaja ambiental es exclusivamente en la fase de producción. En fin de vida	

				su comportamiento es idéntico al PE fósil: no es biodegradable ni compostable, y persiste en vertedero igual que su equivalente convencional.
Bio-PET	Favorable	No aplica	Limitado	Al igual que Bio-PE, su ventaja ambiental se limita a la fase de producción y es proporcional a su fracción biobasada. En fin de vida no ofrece ninguna mejora respecto al PET fósil: no es biodegradable ni compostable, y persiste en vertedero de forma equivalente.

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

De la tabla se puede deducir lo siguiente: el reciclaje mecánico representa la mejor ruta de fin de vida para la mayoría de los materiales analizados. Por otra parte, el vertedero representa el peor escenario para todos los materiales biodegradables: la descomposición anaeróbica genera metano revirtiendo los beneficios ambientales obtenidos en producción. Los materiales de reemplazo directo (drop-in) como el Bio-PE y Bio-PET son reciclables en los flujos convencionales existentes, lo que constituye una ventaja operativa significativa frente a los materiales que requieren infraestructura especializada de compostaje.

Un material tecnológicamente maduro y ambientalmente favorable puede resultar contraproducente si la infraestructura para gestionar correctamente su fin de vida no existe o no tiene cobertura territorial suficiente en el país, pues como el resumen de ACV demostró, el vertedero revierte todos los beneficios ambientales obtenidos en producción. Es precisamente esa dimensión, la disponibilidad y cobertura territorial de infraestructura de reciclaje diferenciado y compostaje industrial en Colombia, la que completa el diagnóstico técnico-ambiental y que se aborda en el siguiente aspecto.

Cobertura Territorial Nacional

Del análisis de la madurez tecnológica y de impactos ambientales desarrollados en los aspectos anteriores, se puede establecer que el desempeño ambiental de los materiales sostenibles depende de la disponibilidad de infraestructura de gestión al final de vida. En específico, el reciclaje mecánico fue identificado como la ruta de mayor beneficio ambiental para la mayoría de los materiales analizados, y el compostaje industrial como la ruta diseñada

específicamente para los materiales biodegradables y compostables. El presente aspecto diagnostica la cobertura territorial, para la gestión de fin de vida, lo cual resulta trascendente para el desarrollo de esta investigación.

La actividad de aprovechamiento de residuos sólidos en Colombia está regulada y supervisada por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios) a través del Sistema Único de Información (SUI), que registra anualmente las toneladas aprovechadas, el número de Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento (ECA) operativas y la cantidad de recicladores formalizados. Según el informe sectorial de aprovechamiento de (Superservicios, 2025), durante la vigencia 2024 se registraron 2.416 ECA operativas en el país, con 1.345 prestadores activos y 76.707 recicladores reportados, lo que constituye la red operativa formal del reciclaje en Colombia.

Sin embargo, la distribución territorial de esta infraestructura revela una concentración geográfica que condiciona severamente su alcance efectivo. De los 1.103 municipios del país, únicamente 257, el 23,3%, contaban con al menos una ECA operativa registrada en 2024, distribuidos en 30 de los 32 departamentos. Pero, al analizar las toneladas efectivamente aprovechadas, Bogotá D.C. concentra el 71,39% del reporte nacional de toneladas, y junto con Cundinamarca (6,50%), Antioquia (5,54%), Atlántico (3,76%), Meta (3,01%) y Valle del Cauca (2,80%), seis departamentos acumulan el 93,02% del total aprovechado en el país. Los departamentos de Amazonas, Guainía, Guaviare, Vaupés y Vichada no reportaron toneladas aprovechadas durante la vigencia analizada, evidenciando que amplias regiones del territorio nacional operan fuera del sistema formal de aprovechamiento.

La Tabla 20 presenta la distribución departamental del reporte de toneladas aprovechadas y la participación de cada familia de materiales, ilustrando la estructura territorial de la infraestructura de reciclaje existente. También muestra el porcentaje de aprovechamiento

para plásticos, con una importante participación del 40.08% del total de residuos sólidos aprovechados, lo que equivale a 1.197.298 toneladas.

Tabla 20

Distribución departamental de toneladas aprovechadas y familias de materiales reportadas

Departamento	% del total nacional aprovechado	Papel y cartón	Plásticos	Vidrio	Metales	Madera	Textil
Bogotá D.C.	71,39%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cundinamarca	6,50%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Antioquia	5,54%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Atlántico	3,76%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Meta	3,01%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Valle del Cauca	2,80%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Subtotal 6 dptos.	93,00%						
Tolima	7,00%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Norte de Santander		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Risaralda		✓	✓	✓	✓	✓	—
Santander		✓	✓	✓	✓	—	✓
Bolívar		✓	✓	✓	✓	—	—
Córdoba		✓	✓	—	✓	—	✓
Nariño		✓	✓	—	—	—	—
Otros 15 dptos. con reporte		Parcial	Parcial	Parcial	Parcial	—	—
Amazonas, Guainía, Guaviare, Vaupés, Vichada	0,00%	—	—	—	—	—	—
% TOTAL NACIONAL	100,00%	45,10%	40,08%	7,61%	6,24%	0,31%	0,66%
Toneladas TOTAL NACIONAL	2.987.271	1.347.259	1.197.298	227.331	186.406	9.261	19.716

Nota: Adaptado de *Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento, Vigencia 2024*, por Superservicios, 2025.

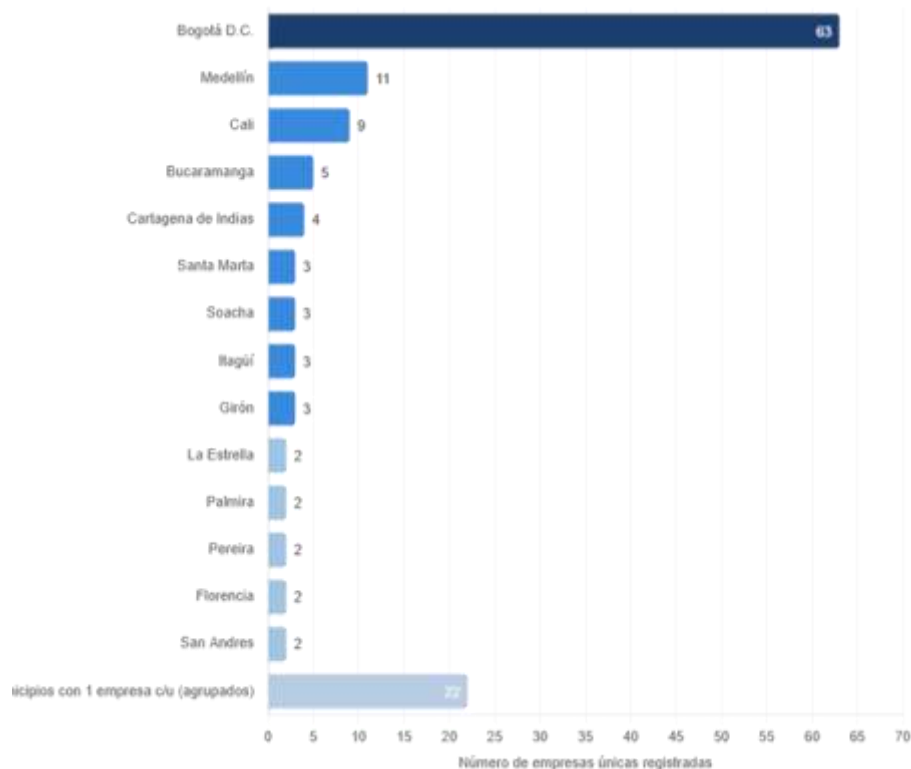
Desde la perspectiva del sector de empaques y envases plásticos, el flujo de materiales al final de vida confirma la dimensión de la gestión a final de vida. Cempre (2024) reporta que del total de envases y empaques plásticos puestos en el mercado colombiano, estimados en 700.500 toneladas anuales, únicamente el 31,9% ingresa a procesos de transformación de residuos, y de ese volumen solo el 3,0%, equivalente a 23.200 toneladas anuales, se reincorpora efectivamente a la producción de nuevos envases y empaques. El 73,5% restante,

correspondiente a 514.600 toneladas anuales, termina en rellenos sanitarios, se filtra al ambiente o no reporta en el esquema del servicio público de aseo.

En cuanto a la cobertura por tipo de material plástico, el directorio de Acoplásticos registra 136 empresas activas en cuatro categorías de la cadena de aprovechamiento: recolección y gestión, transformación a materia prima, transformación a producto final y procesos alternativos, distribuidas en 36 municipios del país. Los materiales convencionales PET, PP, PEBD, PEAD, PVC y PS son los únicos que cuentan con flujos de recolección y transformación activos en el directorio, con PET y PP como los materiales con mayor número de operadores registrados (Acoplásticos, 2024a). La Figura 26 presenta la distribución geográfica de esta infraestructura.

Figura 26

Distribución geográfica de la infraestructura de reciclaje de plásticos en Colombia



Nota: Adaptado de *Directorio Colombiano de Residuos Plásticos*, por Acoplásticos, 2024.

https://datastudio.google.com/u/0/reporting/568863ca-6f00-4999-8394-30341e2cd0e0/page/p_ytm8wg9ogd

Ahora, el compostaje industrial es la ruta de fin de vida diseñada específicamente para los materiales biodegradables y compostables certificados bajo normas como: la EN 13432, la ISO 17088 y la ASTM D6400, que exigen la biodegradación del material en al menos un 90% en un máximo de seis meses bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Para que los materiales compostables aporten efectivamente los beneficios ambientales identificados en los estudios de ACV, reducción de residuos en vertedero, producción de compost como mejorador de suelos y cierre del ciclo de nutrientes, requieren de una cadena

logística completa que incluye recolección selectiva de biorresiduos, transporte diferenciado y plantas de compostaje certificadas (NPAP, 2025).

El diagnóstico de esta infraestructura en Colombia revela un vacío preocupante. El directorio de Acoplásticos registra únicamente cuatro entidades que desarrollan procesos de aprovechamiento alternativos al reciclaje mecánico convencional, distribuidas en apenas dos ciudades del país: Bogotá D.C. y Santa Rosa de Cabal (Risaralda). De estas cuatro entidades, solo una, ONG Sol Naciente, con sede en Santa Rosa de Cabal, realiza procesos de compostaje industrial, orientados al coprocesamiento de plásticos convencionales mezclados con residuos orgánicos; las tres restantes operan procesos de coprocesamiento energético (Cemex Colombia) o pirólisis (AX3 Andina de Ayudas Ambientales), ninguno de los cuales constituye infraestructura de compostaje para materiales bioplásticos compostables certificados. En términos de cobertura departamental, esto representa una cobertura efectiva del 0% de infraestructura de compostaje industrial para bioplásticos sobre el total de 32 departamentos del país (Acoplásticos, 2024a).

De lo anterior se puede deducir, que sin una infraestructura dedicada de recogida selectiva de biorresiduos, sin plantas de compostaje industrial capaces de gestionar materiales compostables los bioplásticos compostables inevitablemente terminan en vertederos o incineradoras, perdiendo completamente su potencial de circularidad.

La Tabla 21 sintetiza el estado de la infraestructura de procesos alternativos de aprovechamiento registrada en Colombia según el directorio de residuo plásticos de Acoplásticos.

Tabla 21

Infraestructura de procesos de aprovechamiento alternativos

Entidad	Ciudad	Departamento	Tipo de proceso	Materiales atendidos	Aplica a bioplásticos compostables	Observación
ONG Sol Naciente	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	Compostaje Industrial y Coprocesamiento	PP, PEAD, PET, PEBD	NO - solo plásticos convencionales fósiles	Única entidad en Colombia con compostaje industrial. No certificada para bioplásticos compostables
Cemex Colombia	Bogotá D.C.	Cundinamarca	Coprocesamiento (horno cementero)	PP, PEBD, PEAD, PET, PS, OTROS	Aplica técnicamente pero no es ruta compostaje certificado	Valorización energética no equivale a compostaje. No genera compost
AX3 - Andina de Ayudas Ambientales	Bogotá D.C.	Cundinamarca	Pirólisis	PP, PEBD, PEAD, PS, OTROS	NO - pirólisis no aplicable a bioplásticos compostables	Proceso termoquímico. No genera compost; recupera combustible
Listón Plast S.A.S.	Bogotá D.C.	Cundinamarca	Coprocesamiento	PEAD	NO	Coprocesamiento de un solo material convencional

Nota: Adaptado de *Directorio Colombiano de Residuos Plásticos*, por Acoplásticos, 2024.

https://datastudio.google.com/u/0/reporting/568863ca-6f00-4999-8394-30341e2cd0e0/page/p_ytm8wg9ogd

Por lo anterior, cabe mencionar que la infraestructura existente ha sido concebida y operada exclusivamente para los plásticos convencionales de origen fósil: PET, PEAD, PEBD, PP, PVC y PS. Esto significa que, en el estado actual de la infraestructura colombiana, un material como el PLA, que en el análisis anterior mostró ventaja en GWP en producción y cuyo mejor escenario de fin de vida es el reciclaje mecánico o el compostaje industrial, no cuenta con ninguna ruta operativa de gestión posconsumo en el país.

Diagnóstico Económico

Tiene como finalidad identificar las condiciones económicas que determinan la viabilidad de la transición de los PSU hacia materiales sostenibles en el sector de empaques y envases colombiano. Para ello se proponen cuatro aspectos articulados de forma secuencial: la capacidad económica de la cadena de transformación plástica, medida a través del valor agregado por clase CIIU, la tendencia de demanda tanto de los PSU convencionales como de los materiales sostenibles en el mercado nacional, el diferencial de precios entre los materiales sostenibles y los PSU que reemplazan, y los costos de adaptación empresarial que implica la transición.

Capacidad Económica

El diagnóstico general del sector caracterizó la cadena de plásticos mediante la producción bruta como indicador de su dimensión productiva. El diagnóstico económico adopta el Valor Agregado, dado que refleja la riqueza efectivamente generada por cada eslabón más allá del consumo de sus insumos, por tanto, la medida más directa de la capacidad económica disponible para asumir los costos de una transición hacia materiales sostenibles. El valor agregado (VA) se obtiene como diferencia entre la producción bruta (PB) y el consumo intermedio (CI), con base en los datos de la EAM del DANE para los períodos 2022, 2023 y 2024 (DANE, 2025b).

El análisis se cierra a los tres eslabones de la cadena identificados en el diagnóstico general como los de mayor pertinencia para la transición: CIIU 2013 (fabricación de plásticos en formas primarias), CIIU 2221 (fabricación de formas básicas de plástico) y CIIU 2229 (fabricación de artículos de plástico n.c.p.), siendo este último el eslabón transformador que produce los envases, empaques y artículos desechables. La Tabla 22 presenta la evolución del valor agregado para la cadena de plástico identificada en el período analizado.

Tabla 22

Capacidad económica de la cadena de plásticos por clase CIIU, 2022 - 2024

CIIU Rev. 4	Año 2022			Año 2023			Año 2024		
	PB	CI	VA	PB	CI	VA	PB	CI	VA
2013	9.438,50	6.835,10	2.603,30	6.866,60	5.010,50	1.856,20	6.135,80	4.811,50	1.324,40
2221	7.788,20	4.969,40	2.818,80	7.435,40	4.632,50	2.802,90	7.693,30	4.814,40	2.878,90
2229	10.438,50	5.954,60	4.483,90	10.947,70	6.165,40	4.782,30	10.934,00	6.115,80	4.818,20
TOTAL CIIU	27.665,20	17.759,10	9.906,00	25.249,70	15.808,30	9.441,50	24.763,20	15.741,70	9.021,40
TOTAL EAM	422.862,50	273.663,20	149.199,30	437.950,30	289.105,00	148.845,30	443.880,40	295.614,00	148.266,40
% Part.			6.64%			6.34%			6.08%
Valores expresados en millardos de pesos colombianos (1 millardo = 10⁹ COP)									
Valor agregado (VA) = Producción bruta (PB) – Consumo intermedio (CI)									

Nota: Adaptado de *Encuesta Anual Manufacturera*, por DANE, 2025.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam/eam-historicos>

La tabla muestra el comportamiento de la cadena del plástico identificada. El CIIU 2013, productor de resinas plásticas convencionales como materia prima del sector, registra una contracción significativa en su valor agregado durante el período: de 2.603,3 millardos de pesos en 2022 a 1.856,2 millardos en 2023 y 1.324,4 millardos en 2024, una reducción acumulada del 49,1% en dos años que evidencia presiones económicas en el productor de materias primas. El CIIU 2221, fabricante de semielaborados plásticos, mantiene una dinámica estable con un valor agregado entre 2.802 y 2.879 millardos de pesos en el período. El CIIU 2229, el de mayor relevancia para la transición, muestra un comportamiento favorable: su valor agregado crece de 4.483,9 millardos en 2022 a 4.818,2 millardos en 2024, un incremento del 7,5%, indicando que el eslabón transformador de empaques y envases es el más eficiente en generación de valor por peso de producción y el que presenta mayor capacidad económica relativa para absorber los costos de una transición de materiales.

En conjunto, la cadena del plástico, generó un valor agregado de 9.021,4 millardos de pesos en 2024, equivalente al 6,08% del valor agregado total de la industria manufacturera

nacional, frente al 6,64% registrado en 2022, lo que refleja una contracción relativa de la cadena plástica en el contexto industrial, explicada principalmente por el deterioro de materias primas (CIIU 2013). Desde la perspectiva de la transición, el eslabón CIIU 2229, que es el directamente regulado por la normativa de PSU, mantiene y mejora su capacidad económica, lo que constituye una condición favorable para absorber el diferencial de costos que implica la adopción de materiales sostenibles.

Tendencia de la Demanda de PSU y Materiales Sostenibles

El análisis de la capacidad económica del sector estableció el tamaño y la dinámica del eslabón transformador de empaques y envases. El presente aspecto examina por qué esa capacidad enfrenta presiones de demanda crecientes: diagnostica la tendencia de consumo de los PSU en el mercado colombiano y, en contraste, el estado actual y las proyecciones de demanda de los materiales sostenibles que deben reemplazarlos.

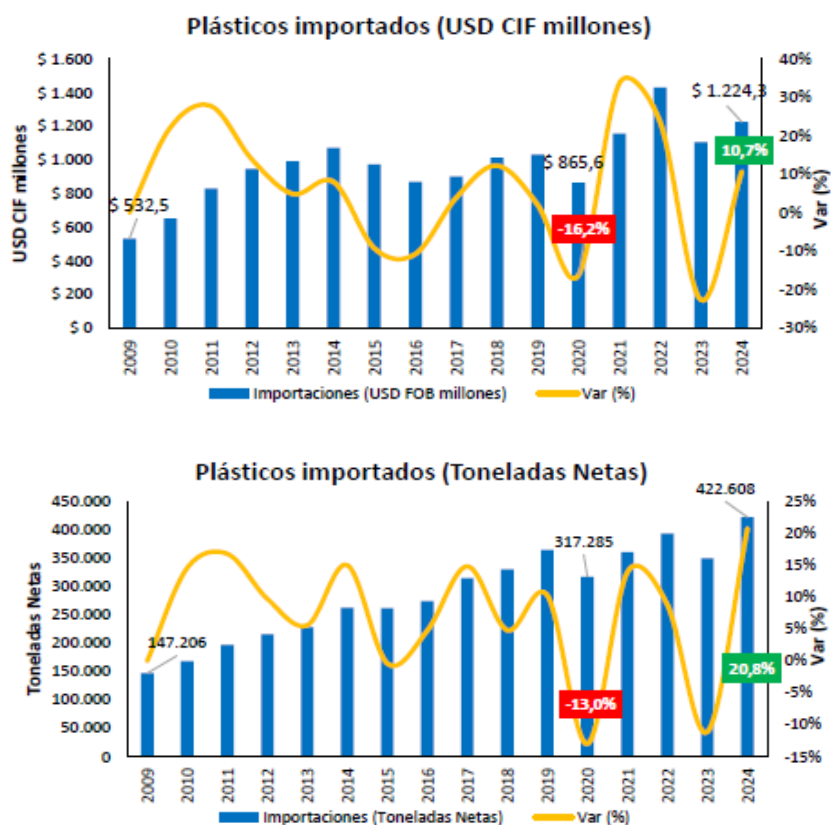
Tendencia de Demanda de PSU, los empaques y envases constituyen el principal destino del consumo de materias plásticas en Colombia, con aproximadamente el 58% del total de resinas procesadas. Lo anterior confirma, que el sector de empaques y envases, es el mercado de mayor peso en la cadena de transformación plástica nacional (Acoplásticos, 2025).

La demanda nacional de plásticos muestra una tendencia de crecimiento sostenido medida a través de las importaciones. Lo anterior, porque Colombia cuenta con una producción petroquímica de resinas plásticas vírgenes muy limitada, por lo tanto, la demanda nacional de resinas plásticas vírgenes se satisface con materiales extranjeros (Acoplásticos, 2025). En consecuencia, el crecimiento de la demanda interna se traduce directamente en mayor volumen de importaciones. Según la (Asociación Nacional de Comercio Exterior [ANALDEX], 2025), las importaciones colombianas de plásticos crecieron de USD CIF (al llegar al puerto de destino) 532,5 millones en 2009 a USD CIF 1.224,3 millones en 2024, representando un incremento acumulado del 129,9% en valor. En volumen, el crecimiento es aún más

pronunciado: de 147.206 toneladas netas en 2009 a 422.608 toneladas netas en 2024, equivalente a un aumento del 187%. La Figura 27 ilustra esta evolución.

Figura 27

Tendencia de importaciones colombianas de plásticos en valor y volumen 2009 - 2024

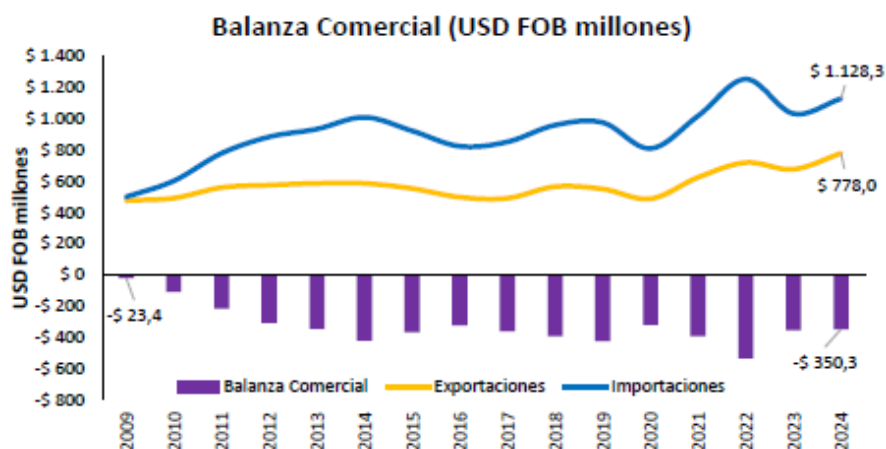


Nota: Adaptado de *Colombia ante el desafío global del plástico: comercio exterior, sostenibilidad e innovación*, por ANALDEX, 2025.

La balanza comercial del sector revela un déficit estructural que se ha profundizado a lo largo del período: mientras las exportaciones crecieron el 63,8%, este avance no ha sido suficiente para compensar el incremento de las importaciones, resultando en un déficit comercial que pasó de USD FOB (puerto de origen) -23,4 millones en 2009 a USD FOB -350,3 millones en 2024, ver Figura 28 (ANALDEX, 2025).

Figura 28

Balanza comercial de plásticos en Colombia



Nota: Adaptado de *Colombia ante el desafío global del plástico: comercio exterior, sostenibilidad e innovación*, por ANALDEX, 2025.

Este desequilibrio evidencia que la demanda nacional de materiales plásticos supera ampliamente la capacidad productiva local y que el país depende del abastecimiento externo.

Tendencia de Demanda de Materiales Sostenibles, el mercado de materiales sostenibles en Colombia se encuentra en una etapa incipiente que discrepa significativamente con su potencial regulatorio. Según las proyecciones del equipo de trabajo de bioplásticos conformado por la iniciativa Circular Plastic in the Americas Program (CPAP) para Colombia por la Unión Europea, el mercado colombiano de bioplásticos compostables alcanzó un volumen de 1.332 toneladas en 2022 y se proyecta que llegue a 3.602,7 toneladas anuales en 2030, con una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) del 13,9% y para las ganancias una proyección estimada de USD 3.709,1 millones a USD 16.257, 5 millones con un CAGR del 16,2% para el período 2023 – 2032 (NPAP, 2025). La tendencia de precios muestra una señal moderadamente positiva: el precio estimado del bioplástico en Colombia pasó de USD 2,78/kg en 2022 a una proyección de USD 3,39/kg en 2032. La Tabla 23 presenta la proyección del mercado para el período 2022 - 2032.

Tabla 23

Proyección del mercado de bioplástico para Colombia 2022 - 2032

Año	Volumen [toneladas]	Ganancias [millones USD]	Precio [USD/kg]
2022	1.332,0	3.709,1	2,78
2023	1.485,2	4.218,3	2,84
2024	1.663,4	4.819,0	2,90
2025	1.871,3	5.529,8	2,96
2026	2.114,6	6.373,7	3,01
2027	2.400,1	7.378,8	3,07
2028	2.736,1	8.580,1	3,14
2029	3.132,8	10.020,7	3,20
2030	3.602,7	11.754,3	3,26
2031	4.150,3	13.811,8	3,33
2032	4.789,5	16.257,5	3,39
CGAR 2022 - 2032	13,90%	16,20%	

Nota: Adaptado de *Alternativas a los plásticos convencionales*, por NPAP, 2025.

Sin embargo, las 3.602,7 toneladas proyectadas para 2030 representan apenas el 2,1% de las 170.000 toneladas anuales de PSU estimadas como objeto de prohibición bajo la Ley 2232 de 2022, y el 0,25% del consumo aparente nacional de plásticos de aproximadamente 2,42 millones de toneladas (NPAP, 2025). Esto significa que, aun bajo un escenario de crecimiento acelerado, los materiales sostenibles biobasados compostables no tienen capacidad de cubrir el volumen regulado por la normativa en los plazos definidos, lo que implica que la transición deberá ser gradual y priorizar las aplicaciones de mayor impacto regulatorio.

La dependencia de importaciones es otro rasgo estructural de este mercado incipiente: entre el 90% y el 95% de los bioplásticos consumidos en Colombia provienen del exterior, evidenciando la ausencia de una cadena de producción local consolidada para estos materiales (NPAP, 2025).

En cuanto al ecosistema empresarial, Colombia cuenta con un conjunto de actores que materializan la oferta de alternativas sostenibles. La Tabla 24 identifica las empresas clave del ecosistema, sus enfoques y los materiales sostenibles que gestionan.

Tabla 24
Ecosistema empresarial de materiales sostenibles en Colombia

Empresa	Enfoque en la cadena de valor	Materiales sostenibles principales
Esenttia	Producción de plásticos convencionales, resinas y bioplásticos con capacidad de producción nacional	Poliolefinas, termoplásticos biodegradables, BPAT+Almidón
Ecobioplast	Desarrollo y producción de biopolímeros (pellets) y productos hidrosolubles	Almidón de yuca/maíces en pellets o como bolsas y películas
Carvajal Empaques	Producción y distribución de empaques convencionales y alternativas sostenibles para mercado masivo	Cartón, pulpas y fibras del bagazo de caña de azúcar
Darnel	Gran capacidad de producción y amplio portafolio de alternativas incluyendo reciclados	Pulpa de papel, bagazo de caña, fibra de bambú, cartón o madera
Compostpack	Especialista en fabricación de bolsas y empaques 100% compostables	Almidón de maíz
Greenpack S.A.S.	Portafolio diversificado de empaques compostables y reciclables con laminados de papel	PLA, almidón de yuca, celofán, caña de azúcar, piña, plátano, coco, eucalipto
Papelyco (Life Pack)	Modelo de negocio 'cero residuos' con empaques germinables	Fibra de piña, almidón de maíz, semillas germinables
Interecológicas	Producción de bolsas y desechables biodegradables	Almidón de maíz
Natupla	Portafolio en plásticos y polímeros biodegradables	Base almidón

Nota: Adaptado de *Alternativas a los plásticos convencionales*, por NPAP, 2025.

El diagnóstico de la tendencia de demanda evidencia que la demanda de PSU una trayectoria de crecimiento sostenido, mientras la demanda de materiales sostenibles, con proyección de crecimiento positivo, parte de una base reducida que su capacidad de sustitución efectiva en el horizonte 2024 - 2030 es limitada. Lo anterior sugiere que la transición no puede depender únicamente del crecimiento orgánico del mercado de materiales sostenibles, sino que requiere intervenciones que aceleren simultáneamente la oferta, la demanda y la infraestructura de gestión posconsumo.

Diferencial de Precios entre Materiales Sostenibles y PSU Convencionales

El diferencial de precios entre los materiales sostenibles y los PSU convencionales representa una de las barreras económicas más significativas para la transición. En Colombia, los únicos precios de mercado verificados corresponden a las resinas plásticas convencionales y al PLA, ambos derivados de datos reales de importación compilados por Acoplásticos (2025), ver Tabla 25.

Tabla 25

Precios de referencia PSU según Acoplásticos 2025

Material	Precio [USD/ton] 2024
PET	1.019
LDPE	1.122
HDPE	1.066
PP	1.112
EPS	1.474

Nota: Adaptado de *Plástico en Colombia 2025* (p.89), por Acoplásticos, 2025.

Para los demás materiales sostenibles, la información disponible proviene de bases de datos internacionales de precios industriales y debe interpretarse como referencia orientativa. En términos generales, el diferencial oscila entre 1,1 veces el precio del PSU de referencia para el Bio - PET, el material con menor brecha, hasta 4,5 veces para el PCL. La Tabla 26 presenta el detalle por material con sus fuentes de verificación.

Tabla 26

Diferencial de precios entre PSU de referencias y alternativas sostenibles

Material	Precio (USD/ton) 2024	PSU de referencia para comparación	Precio PSU (USD/ton) 2024	% Diferencial	Fuente
PLA	2.818	PP / PET (vasos, cubiertos, films compostables)	1.069	264%	(Acoplásticos, 2025)
PBAT	1.480	LDPE (bolsas, films compostables)	1.122	132%	(Chemanalyst, 2025)
TPS	1.650	EPS / LDPE (bolsas, films, espumas)	1.300	127%	(Sales plastic, 2026)
PBS	2.500	PP (films, cubiertos compostables)	1.112	225%	(Imarc, 2026)
PHA / PHB / PHBV	3.900	PP (empaques rígidos, films, cubiertos)	1.112	351%	(Ukhi, 2025)
Bio-PE	1.460	LDPE / HDPE (bolsas, films, bottellas)	1.100	133%	(Khan, 2024)
PCL	5.000	LDPE (films, bolsas biodegradables)	1.122	446%	(Fortune Business Insights, 2026)
Bio-PET (Aprox. 30% biobasado)	1.130	PET (bottellas, empaques rígidos)	1.019	111%	(Coherent Market Insights, 2026)

Nota: Elaboración a partir de fuentes consultadas, 2026.

Costos de Adaptación para la Transición Empresarial

La transición hacia materiales sostenibles implica para las empresas del sector de empaques y envases una estructura de costos de adaptación que trasciende el diferencial de precio del material analizado en el aspecto anterior. En Colombia, la implementación de la Ley 2232 de 2022 ya ha generado incrementos en los costos de operación de hasta el 30% para las empresas del sector (Leyton et al., 2024), y menos del 2% de las empresas plásticas han avanzado hacia la adopción de materiales sostenibles (Acoplásticos, 2024b).

Estos costos de adaptación se pueden distribuir en cuatro aspectos:

La Adaptación de Maquinaria y Procesos varía según el material. Por ejemplo, los materiales de reemplazo directo (drop-in) como Bio-PE y Bio-PET no requieren modificaciones sustanciales, mientras que PLA, PBAT y TPS demandan ajustes de parámetros más

complejos, el PHA puede implicar equipos nuevos; esto es especialmente relevante dado el parque de maquinaria heterogéneo del sector colombiano (Acoplásticos, 2025).

Las Certificaciones y Ensayos de Conformidad representan una carga adicional para los materiales compostables, que deben acreditar biodegradabilidad bajo normas como EN 13432, ISO 17088 o NTC 6632 (**Acoplásticos & ICIPC, 2025**).

La Formación del Talento Humano es una barrera transversal: el sector registra escasez de competencias técnicas en procesamiento de bioplásticos y gestión posconsumo, con una brecha amplia y generalizada (Acoplásticos, 2025).

La Inversión en I+D+i enfrenta una restricción sistémica: Colombia destinó apenas el 0,21% del PIB a investigación y desarrollo en 2024, nivel insuficiente para validar y escalar formulaciones sostenibles en los plazos regulatorios definidos (CONPES, 2025).

Diagnóstico Regulatorio

Examina el conjunto de instrumentos legales, fiscales y de política pública vigentes en Colombia. A diferencia del marco normativo presentado en este trabajo, que describe la evolución cronológica del sistema regulatorio colombiano en materia de PSU, el presente diagnóstico adopta una orientación al desarrollo de la herramienta de diagnóstico: identifica qué instrumentos generan obligaciones concretas para los productores del sector, de qué tipo son esas obligaciones y qué condiciones de incertidumbre persisten por cuenta de los vacíos aún no resueltos.

Esta lectura regulatoria es necesaria porque la posibilidad de transición no depende exclusivamente de la disponibilidad técnica - ambiental o económica de los materiales sostenibles, sino también del entorno normativo que define lo que está permitido, lo que está prohibido, lo que es fiscalmente penalizado y lo que aún carece de regulación clara.

Instrumentos Legales, Fiscales y de Política Pública con Incidencia en la Transición

Colombia dispone de un conjunto de instrumentos que, desde diferentes ángulos, condicionan u orientan el avance del sector de empaques y envases hacia materiales sostenibles. Estos instrumentos combinan mecanismos de restricción directa de PSU, obligaciones de responsabilidad extendida del productor (REP), obligaciones o beneficios fiscales y orientaciones de política pública.

Para los efectos de este diagnóstico, en la Tabla 27 se seleccionan los instrumentos con incidencia directa en el sector de empaques y envases, organizados por tipo de mecanismo de acción sobre la transición.

Tabla 27

Regulación pertinente para la transición de PSU a alternativas sostenibles

Tipo	Instrumento	Alcance	Efectos
Restricción directa	Ley 2232 de 2022	Establece prohibición gradual de PSU con cronograma hasta 2030, incluyendo envases y empaques para aplicaciones específicas. Fija meta de 50 % de reciclaje para botellas PET en 2025.	Genera obligación de sustitución de materiales en los productos prohibidos; convierte la transición de una decisión voluntaria en un requerimiento legal.
	Resolución 803 de 2024	Reglamenta parcialmente la Ley 2232. Habilita las Acciones 100 y 110 como alternativas sostenibles con enfoque de economía circular. Reconoce productos con 100 % de PCR nacional certificado bajo NTC 6632:2022 como excepción a la prohibición. Define tres tipos de metas REP para E&E: recolección, aprovechamiento e incorporación de contenido reciclado.	Define las condiciones técnicas y de certificación que deben cumplir los materiales sostenibles para ser reconocidos como alternativa válida a los PSU prohibidos.
	Decreto 2192 de 2023	Prohíbe el ingreso de PSU al SINAP, páramos, humedales Ramsar y reservas de biósfera. Incluye lineamientos de biodegradabilidad y compostabilidad para excepciones.	Genera demanda diferenciada de materiales sostenibles en segmentos de mercado vinculados a territorios protegidos.
REP	Resolución 1407 de 2018	Establece el régimen de REP para residuos de envases y empaques plásticos. Obliga a productores e importadores a formular Planes de Gestión Ambiental de Residuos de Envases y Empaques (PGARE) con metas de aprovechamiento del 30 % para 2030.	Responsabiliza al productor sobre el fin de vida del empaque, incentivando el diseño para la reciclabilidad y el uso de materiales recuperables como condición de cumplimiento.
Fiscal	Ley 2277 de 2022 (art. 50 - 53)	Crea el IPUSUI con tarifa de 0,00005 UVT por gramo de envase, empaque o embalaje plástico PSU. La Sentencia C-099 de 2025 amplió su alcance a todas las importaciones de bienes con empaques PSU. Su recaudo y administración corresponden a la DIAN.	Encarece la producción e importación de envases y empaques en PSU, generando señal de precio favorable a la adopción de materiales sostenibles exentos del impuesto.
	Resolución DIAN 000005 de 2026	Precisa las exclusiones, definiciones técnicas de envase, empaque y embalaje, y la documentación que deben conservar los importadores para sustentar la exención del IPUSUI.	Define operativamente qué materiales quedan fuera del gravamen, incidiendo en las decisiones de aprovisionamiento de los importadores del sector.
Política pública	ENEC 2018	Estrategia Nacional de Economía Circular formulada por el Ministerio de Ambiente y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. No tiene carácter vinculante.	Orienta la transformación de sectores productivos hacia modelos circulares y enmarca programas de apoyo a la industria en materia de innovación y sustitución de materiales.
	CONPES 3874 de 2016	Define lineamientos estratégicos para la gestión integral de residuos sólidos y el fortalecimiento de la economía circular. No tiene carácter vinculante.	Establece el marco de política pública sobre el que se articulan los instrumentos REP y las metas de aprovechamiento del sector de E&E.

Vacíos Regulatorios

El marco vigente no elimina las condiciones de incertidumbre que enfrentan los productores del sector de empaques y envases en el proceso de transición. Según Acoplásticos (2025), se pueden identificar los siguientes vacíos:

La ausencia de la Política Nacional de Sustitución del PSU y el Plan de Reconversión Productiva, mandatados respectivamente por los artículos 7 y 9 de la Ley 2232 de 2022. Estos instrumentos debían articular las condiciones para la reconversión industrial del sector y la adaptación laboral asociada al cambio de materiales, pero a la fecha de elaboración de este diagnóstico permanecen sin publicar.

La indefinición del reglamento técnico de biodegradabilidad y compostabilidad en condiciones ambientales naturales. La Resolución 803 de 2024 reconoce estas propiedades como criterios de elegibilidad para los materiales sostenibles, pero condiciona su uso a certificación mediante NTC 6632:2022 y verificación por laboratorio acreditado ante el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), con plazo hasta junio de 2025 para presentar la información soporte ante el Ministerio de Ambiente. Sin embargo, el reglamento técnico que debe definir los estándares de desempeño ambiental de estos materiales bajo condiciones propias del territorio colombiano permanece pendiente de expedición, lo que genera incertidumbre jurídica para los productores que opten por esta vía de sustitución.

La ausencia del reglamento técnico de etiquetado de productos plásticos, también pendiente de desarrollo reglamentario bajo la Ley 2232. Sin etiquetado normalizado, los operadores de la cadena de aprovechamiento y los consumidores carecen de información técnica verificable para diferenciar materiales sostenibles de PSU convencionales, lo que compromete la trazabilidad y dificulta el cumplimiento de las metas REP establecidas en la Resolución 803 de 2024.

La Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU Rev. 4 A.C.), adoptada por Colombia para el registro y seguimiento estadístico de la actividad industrial, no contempla categorías para materiales sostenibles, bioplásticos ni polímeros compostables. Esta limitación impide desagregar la producción del sector según el tipo de material empleado, lo que hace

estadísticamente invisible el avance de la transición en términos de valor agregado,
establecimientos o empleos vinculados a la fabricación de alternativas a los PSU.

La ausencia de un sistema de trazabilidad digital que permita verificar el cumplimiento
efectivo de las metas REP definidas en la Resolución 803 de 2024.

Diagnóstico Operativo

Determinan la capacidad de sus actores para ejecutar la transición hacia materiales sostenibles. A diferencia de las dimensiones técnico-ambiental, económica y regulatoria, que caracterizan el entorno de materiales disponibles, los costos relativos y el marco normativo vigente, la dimensión operativa se enfoca en las condiciones propias de la producción: la estructura empresarial y su capacidad de absorción tecnológica, las brechas de capital humano para la transición, y la capacidad de I+D+i y transferencia tecnológica disponible en el contexto colombiano.

Estructura Empresarial y Capacidad de Adopción

Como se estableció en el Diagnóstico General, las clases CIIU 2013, 2221 y 2229 agrupan 3.816 empresas con matrícula mercantil activa, de las cuales el 86,1% operan por debajo del umbral de cobertura de la EAM. Esta distribución tiene una implicación operativa directa: los 532 establecimientos capturados por la encuesta, concentran la capacidad técnica y financiera para absorber procesos de reconversión tecnológica, mientras que la mayoría de las unidades enfrenta barreras estructurales derivadas de los altos costos de inversión, la escasez de financiamiento y el acceso limitado a nuevas tecnologías.

En resumen, la estructura empresarial del sector de empaques y envases plásticos en Colombia configura un escenario de capacidad de adopción altamente diferenciada: las grandes empresas podrían disponer de condiciones técnicas y financieras para liderar la transición, mientras que el segmento mayoritario, micro y pequeñas unidades, pueden enfrentar barreras estructurales que condicionan el alcance y la velocidad de cualquier proceso de sustitución de materiales.

Capital Humano y Brechas de Formación

La disponibilidad de capital humano calificado es una condición necesaria para cualquier proceso de transición tecnológica. Según **Acoplásticos & ICIPC (2025)**, el proyecto

Despliegue de la estrategia de desarrollo de habilidades para las industrias de plástico y caucho en Colombia, liderado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en articulación con Acoplásticos y el ICIPC, identificó las siguientes brechas de la fuerza laboral de la industria:

La escasez de talento especializado y educación continua, la industria depende trabajadores empíricos.

Brecha generacional en la transferencia de conocimientos: los trabajadores con mayor experiencia poseen conocimiento técnico acumulado que no tiene mecanismos efectivos de transmisión a nuevas generaciones.

Bajo atractivo del sector para el talento joven, parcialmente asociado a la percepción negativa de la industria plástica en términos de impacto ambiental y el poco crecimiento profesional.

Falta de definición de roles y habilidades requeridas al interior de las empresas, que dificulta la contratación y retención de perfiles especializados.

Escasez de recursos didácticos y programas formativos especializados en transformación de plásticos y economía circular.

En conjunto, estas brechas condicionan la velocidad y profundidad con que el sector puede avanzar hacia la sustitución de materiales, independientemente de los incentivos regulatorios o económicos disponibles.

Capacidad de I+D+i y Cadena de Suministro

Según **Acoplásticos & ICIPC (2025)**, el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC) constituye el principal nodo de investigación, desarrollo tecnológico e innovación del sector plástico colombiano, con capacidad para integrar conocimiento científico con los desafíos productivos del sector. Sin embargo, el diagnóstico de línea base del sector muestra que el parque de maquinaria es heterogéneo y que persisten

barreras para la innovación derivadas de los altos costos de inversión, la escasez de financiamiento y el acceso limitado a nuevas tecnologías.

Un elemento adicional que caracteriza la capacidad de soporte técnico disponible es la infraestructura de laboratorios para el sector de empaques y envases. El Catálogo de Laboratorios y Ensayos para Envases y Empaques de Colombia identifica 37 laboratorios en el país, concentrados principalmente en Bogotá y Medellín. Sin embargo, al revisar las capacidades instaladas, solo 4 cuentan con servicios específicos para verificar propiedades críticas de materiales sostenibles: biodegradabilidad y compostabilidad bajo las normas ASTM D5338, ASTM D6400, ISO 14851. Este grupo incluye a AOXLAB en Medellín, el Laboratorio Instrumental de Alta Complejidad (LIAC) de la Universidad de La Salle en Bogotá y los grupos de investigación de la Universidad de los Andes. Este hallazgo es consistente con la brecha de orientación ya señalada: la infraestructura de soporte técnico existe, pero no está alineada con las necesidades de verificación que impone la transición PSU (**ICIPC & GIZ, 2024**).

Adicionalmente, una condición operativa que antecede a cualquier proceso es la disponibilidad del material sostenible. Autores como Bustamante et al. (2025), identifican la desconexión de la cadena de suministro como una barrera en la transición para el sector de empaques y envases. Por lo tanto, la capacidad instalada, el personal calificado y el soporte técnico resultan insuficientes si la empresa no puede acceder al material que pretende incorporar a su proceso productivo.

Análisis de Resultados

Este análisis de resultado, producto de los diagnósticos anteriormente realizado, genera como efecto la construcción de los criterios bases para la herramienta de diagnóstico multicriterio. A su vez, se presenta un mapa de interacción a partir de los criterios obtenidos, que permite establecer las relaciones de influencia y dependencia entre ellos.

Criterios Técnico - Ambiental

Los criterios técnico - ambientales se derivan de los hallazgos del diagnóstico y tienen por objeto establecer los parámetros que orientarán el desarrollo de la herramienta de diagnóstico de transición. Es decir, el marco de referencia que la herramienta de diagnóstico utilizará para determinar qué condiciones debe cumplir un material sostenible para ser viable en el contexto colombiano, en qué fase temporal puede adoptarse y qué acciones estructurales se requieren para cerrar las brechas identificadas. A partir de los hallazgos se construyen los criterios de:

Madurez Tecnológica, a partir del análisis TRL, se establece que un material a partir de un nivel 7 hasta el 9, que corresponde a las fases de demostración y disponibilidad comercial del material, es adecuado para considerarlo como candidato con alto potencial para sustitución. Por otra parte, para los niveles 5 y 6, se debe tener en cuenta que en estas fases los materiales están probados a nivel de laboratorios o pequeñas escalas, pero por debajo de estos niveles los materiales se consideran en una etapa temprana de desarrollo, lo cual dificulta cualquier acceso comercial o de garantía que permita ser utilizado a gran escala.

Desempeño Ambiental, con base en la variación del GWP y de los perfiles de impactos de ambientales de ACV, a partir de fuentes consultadas. En el caso del GWP, teniendo en cuenta el comportamiento relativo de los valores de GWP, que valores por debajo del 75% representan condiciones de reducción óptimas, entre un 75% y 125% se puede decir

que los comportamientos son similares entre materiales y por encima del 125%, los materiales no representan una ventaja desde el punto de vista del GWP.

Para el caso de los impactos ambientales se planteó operacionalizar los hallazgos de la escala cualitativa de la Tabla 18, a una escala numérica de intensidad, con la siguiente denominación: 0 = sin impacto, 1 = bajo, 2 = medio, 3 = alto (ver Tabla 28). Por lo tanto, las cinco categorías: acidificación, eutrofización, usos de tierra, uso de agua y agotamiento de recursos fósiles, generan un índice de carga ambiental sobre un máximo posible de 15 puntos, expresado en porcentaje.

Tabla 28

Índice de carga ambiental para los estudios analizados

Material	Acidificación	Eutrofización	Uso de tierra	Uso de agua	Agotamiento de recursos fósiles	Total Material	Índice de carga ambiental (%)
PLA	3	3	2	2	1	11	73,33%
PHA / PHB / PHBV	2	2	1	1	1	7	46,67%
PBAT	2	2	2	2	1	9	60,00%
PBS	1	1	1	1	2	6	40,00%
TPS	2	2	2	2	1	9	60,00%
PCL	0	0	0	0	3	3	20,00%
Bio-PE	3	3	3	3	2	14	93,33%
Bio-PET	1	1	1	1	2	6	40,00%
0 = Sin impacto (favorable)							
1 = Bajo (favorable)							
2 = Medio (con condiciones)							
3 = Alto (crítico)							

Es de aclarar que los valores presentados en la Tabla 28, están acordes a lo reportado en los estudios de las fuentes consultadas, eso quiere decir que los puntajes de los materiales propuestos pueden variar, principalmente por la referencia del material con la cual se quiere hacer la comparación. Lo anterior, se realizó para proponer los límites en el indicador de impacto ambiental en la fase de la estructuración de los criterios técnico – ambientales, de la siguiente manera: la condición óptima de impacto es la establecida por la calificación 0 y 1, por

lo tanto, esto representa que un material con bajo impacto ambiental puede tener máximo 5 puntos, lo cual sobre los 15 máximo posible, representa un 33.33%, que para la condición de evaluación se puede plantear en 34% para que siempre esté dentro del rango de ventaja de impacto.

Por otra parte, el rango medio de condición de impacto se plantea a partir de este 34% hasta un 67%, porque el puntaje máximo para la condición media es de 10 puntos, lo que representa un 66.66%. Por encima de esta valoración, se considera que el material candidato no tiene una ventaja sobre el material de referencia.

Los puntos de corte anteriormente descritos, constituyen una convención metodológica propia del investigador para el desarrollo de este trabajo y no de un referente externo validado para el sector. Su definición está sujeta a validación posterior.

Cobertura de Infraestructura de Fin de Vida, el cual de la misma manera que se hizo con las categorías de impacto ambiental, se operacionalizan los resultados de los estudios de la Tabla 20 a una escala numérica jerárquica que codifica dos dimensiones: la preferencia ambiental del escenario de fin de vida, establecida por la literatura ACV revisada (reciclaje mecánico, compostaje industrial y vertedero), y el desempeño del material dentro de cada escenario. Los valores asignados son: reciclaje mecánico: favorable = 9, viable = 8, limitado = 7; compostaje industrial: favorable = 6, viable = 5, limitado = 4; vertedero: favorable = 3, viable = 2, limitado = 1; no aplica = 0 en cualquier escenario. Lo anterior, genera un índice de flexibilidad de gestión ambiental al fin de vida sobre un máximo posible de 18 puntos. En este índice, mayor puntaje indica mayor flexibilidad de gestión esperado al fin de vida (ver Tabla 29).

De igual manera, la asignación de estos pesos responde a una jerarquía ordinal construida por el investigador a partir de la preferencia ambiental reportada en la literatura de ACV consultada: reciclaje mecánico (7-8-9) > compostaje industrial (4-5-6) > vertedero (1-2-3), y no a una escala de ponderación externa validada.

Tabla 29

Índice de flexibilidad de gestión ambiental al fin de vida por material sostenible

Material	Reciclaje mecánico	Compostaje industrial	Vertedero / Relleno sanitario	Total	Índice
PLA	9	5	1	15	83,33%
PHA / PHB / PHBV	8	6	1	15	83,33%
PBAT	9	6	1	16	88,89%
PBS	8	5	1	14	77,78%
TPS	7	6	1	14	77,78%
PCL	7	5	2	14	77,78%
Bio-PE	9	0	1	10	55,56%
Bio-PET	9	0	1	10	55,56%
Favorable = mejor ruta disponible para ese material en términos de desempeño ambiental. 9 (reciclaje mecánico), 6 (compostaje) y 3 (vertedero)					
Viable = funciona, pero no es la ruta óptima. 8 (reciclaje mecánico), 5 (compostaje) y 2 (vertedero)					
Limitado = restricciones técnicas, de infraestructura o de impacto significativas. 7 (reciclaje mecánico), 4 (compostaje) y 1 (vertedero)					
No aplica = el material no es compatible con ese escenario de fin de vida = 0					

Teniendo en cuenta que para la mayoría de los materiales analizados, el reciclaje mecánico representa la mejor opción de gestión de fin de vida, se puede establecer a partir del puntaje máximo para esta categoría (en este caso 9), que con un índice mayor o igual del 50% (9 de 18), se cuenta con por lo menos una ruta de gestión de fin de vida asociada a reciclaje mecánico. Puntajes inferiores establece que las opciones están asociadas a compostaje (entre 22% (4 de 18) y 49%) o vertedero, con índice por debajo del 22%.

Los resultados del índice para los materiales indican que, cuanto mayor es el porcentaje, el material tiene mejores opciones de escenarios para fin de vida, de igual manera se debe tener en cuenta que este resultado es para los estudios analizados y puede variar para la infraestructura disponible en Colombia.

La Tabla 30 resume el análisis de datos para el diagnóstico técnico – ambiental y se muestran los criterios y sus indicadores asociados.

Tabla 30

Criterios Técnico - Ambiental

Nombre del criterio	Definición del criterio	Indicadores propuestos	Definición del indicador	Cómo se mide	Escala / Umbral de valoración		
1	Madurez tecnológica del material sostenible	TA 1.1	Nivel TRL global	Mide el estadio de madurez tecnológica del material a escala internacional con base en literatura verificada. Indica si el material ha superado las fases de laboratorio y demostración para alcanzar escala industrial.	Escala TRL 1 – 9 TRL ≥ 7 Cumple TRL 5 - 6 Cumple con condiciones TRL < 5 No cumple	1	
						2	
						3	
						4	
						5	
						6	
						7	
						8	
						9	
2	Desempeño ambiental del material sostenible	TA 2.1	Variación del GWP respecto al PSU de referencia	Mide si el material reduce las emisiones de GEI (CO ₂ eq) frente al PSU convencional que reemplaza, con base en estudios de ACV verificados. Evalúa el beneficio climático en la fase de producción.	Variación porcentual (%) relativa al PSU de referencia, reportada en literatura / catálogos	Reducción verificada	< 75%
						Cumple con condiciones	75 - 125%
						Variación mayor	>125%
		TA 2.2	Perfil de impactos ambientales ACV	Evalúa el balance de los impactos ambientales del material en las categorías analizadas: acidificación, eutrofización, uso de tierra, uso de agua y agotamiento de recursos fósiles. Reconoce que los impactos ambientales son inherentes al origen biobasado y evalúa si son compensados por ventajas verificadas en GWP y recursos fósiles.	Identificación de categorías con ventaja y desventaja	Ventaja verificada sobre los impactos	< 34%
						Ventaja parcial o condicionadas	34 - 67%
						Sin ventaja verificada	>67%
3	Cobertura de infraestructura de fin de vida en Colombia	TA 3.1	Disponibilidad de ruta de fin de vida operativa en Colombia	Mide si existe actualmente alguna ruta de gestión posconsumo accesible para el material en Colombia, incluyendo reciclaje mecánico, procesos alternativos o compostaje industrial.	Escala categórica a partir de: Ruta disponible con cobertura operativa Ruta parcialmente disponible (cobertura limitada o incipiente) Sin ruta operativa disponible para el material	Ruta disponible con cobertura operativa	≥ 50%
						Ruta parcialmente disponible	22 - 49 %
						Sin ruta operativa disponible para el material.	<22%
						Requiere desarrollo	

Criterios Económicos

Se definen tres criterios económicos articulados entre sí:

Diferencial de Costo del Material Sostenible, respecto al PSU que reemplaza, el cual se considera, a partir del comportamiento de los datos de las fuentes consultadas, que por debajo de un factor de 1.3 veces, se considera adecuado para asumir el diferencial. Por encima de este factor, se encuentran los mayores diferenciales de precio, lo que conlleva a que se deban considerar alternativas como incentivos de política pública y financiamientos.

Capacidad Económica de Adaptación Empresarial, que puede ser medida por la empresa a partir del indicador financiero del EBITDA (Beneficios antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones).

Los rangos que se proponen, obedecen a indicadores sectoriales según los cuales un EBITDA que se encuentre por debajo del 10% no permite la destinación de un flujo importante de efectivo para el apoyo a los procesos que demanda asumir el reto de una reconversión de procesos que permitan llegar a satisfacer los requerimientos que se plantean en este documento para las empresas del sector de envases y empaques de plástico.

Si bien, es completamente relativa la posibilidad de asumir compromisos operacionales que demanden efectivo, en la industria, un rango entre el 10% y el 20% es considerado como aceptable y permite que se puedan emprender proyectos, en este caso iniciar y dar solidez a la transición hacia alternativas sostenibles.

Por último, un margen que supere el 20% denota que una empresa cuenta con la capacidad económica que se requiere para las transformaciones, bien sea de procesos o estructurales, para el inicio de la ruta de mejoramiento hacia dicha transición.

Estado del Mercado, que justifica económicamente la decisión de transicionar a partir de las proyecciones de estudios sobre la Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) del mercado de materiales sostenibles en Colombia, la cual está establecida en un 13.9% hasta

2032. Por lo tanto, verificar esta proyección se considera relevante y se puede establecer que crecimientos observados por encima del 10%, se cree acorde para el crecimiento del mercado; valores entre el 5% y el 10%, estar atentos al comportamiento y por debajo del 5%, se considera un crecimiento del mercado insuficiente.

En conjunto, estos criterios permiten identificar qué tan costosa es la transición para una empresa y qué debe contemplar para hacerla viable desde lo económico. En la Tabla 31, se condensa la propuesta de los criterios económicos.

Tabla 31

Criterios económicos

Nombre del criterio	Definición del criterio	Indicadores propuestos	Definición del indicador	Cómo se mide	Escala / Umbral de valoración		
1	Diferencial de costo del material sostenible	ECN 1.1	Factor multiplicador precio material sostenible vs. PSU de referencia	Mide cuántas veces más costoso es el material sostenible respecto al PSU que reemplaza. Indica la magnitud de la brecha económica del insumo principal.	Factor = Precio material sostenible / Precio PSU referencia	Cumple (sin apoyo adicional)	< 1,3
						Cumple con condiciones (Evaluar incentivos de política pública y financiamientos)	1,3 – 2,5
						No cumple (Evaluar incentivos de política pública y financiamientos)	> 2,5
2	Capacidad económica de adaptación empresarial	ECN 2.1	Capacidad económica	Evalúa si la actividad productiva de la empresa es rentable	Indicador financiero EBITDA (Beneficios antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones)	No cuenta con la estructura financiera	<10%
						Es posible realizar inversiones	10% - 20%
						Estructura financiera sólida	>20%
3	Estado del mercado para materiales sostenibles	ECN 3.1	Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) del mercado de materiales sostenibles en Colombia	Mide si el mercado de materiales sostenibles crece a un ritmo que señala viabilidad comercial para quien invierta en la transición. Una tasa alta indica que la demanda existe y se acelera.	Comparación del valor verificado del CAGR: 13,9% proyectado para 2022 - 2032.	Cumple	> 10%
						Cumple con condiciones	5% - 10%
						No cumple	< 5%

Criterios Regulatorios

Con base en el diagnóstico de los instrumentos vigentes y los vacíos identificados, se proponen los siguientes criterios regulatorios que pretenden orientar a los actores del sector de empaques y envases sobre los aspectos regulatorios que condicionan su proceso de transición hacia materiales sostenibles:

Conformidad Legal del Portafolio con los Instrumentos de Prohibición Vigentes, que consiste en revisar cuáles de los productos que se fabrican tienen relación con lo establecido en la Ley 2232 y cuántos de esos productos se encuentran ajustados. Se debe tener en cuenta los tiempos de implementación que la Ley contempla en dos fases, la primera fase que se venció el 7 de julio de 2024 (2 años después de la implementación) y la segunda fase que se vence el 7 de julio de 2030 (8 años después de la implementación). Por decisión del investigador y entendiendo que la primera fase ya se culminó, se establece que por encima del 80%, el portafolio de productos asociados se encuentra ajustado, entre un 40% y 80% está ajustado parcialmente y por debajo del 40%, está muy incipiente con relación al límite para la segunda fase que es en 2030.

Integración en el Sistema de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), mide si el productor cumple con sus obligaciones de REP. Primero se verifica si existe o no vinculación al instrumento del Plan de Gestión Ambiental de Residuos de Envases y Empaques (PGARE), sin ese registro ante la (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) el productor está por fuera del sistema, no hay metas, no hay reporte, no hay seguimiento. Ahora, si existe, entonces se mide qué tan bien lo está cumpliendo.

El PGARE traduce esa responsabilidad en metas concretas asociadas a recolección, aprovechamiento y contenido incorporado de reciclado. Esto conecta directamente con la Resolución 803 de 2024, que articula las prohibiciones de PSU con las obligaciones REP y se propone como cumplimiento mínimo, el 50% de las metas concretas.

Aprovechamiento de Instrumentos Fiscales Favorables a la Sustitución, mide si el productor está usando a su favor el Impuesto a los Plásticos de Un Solo Uso de Importación (IPUSUI), que grava los envases y empaques en PSU pero exime los materiales sostenibles conforme a la Resolución DIAN 000005 de 2026.

Si el productor ha migrado volumen a materiales sostenibles exentos, su carga tributaria baja proporcionalmente. Se propone un indicador que calcula la fracción del volumen total exenta. La verificación no se hace sobre declaraciones propias sino contra la declaración tributaria ante la DIAN, que es el documento oficial de trazabilidad fiscal.

El umbral de 50 % como nivel cumple se plantea a juicio del investigador como meta propuesta de la cantidad que se pretende ajustar para obtener beneficios al IPUSUI.

En la Tabla 32, se sintetiza los criterios regulatorios propuestos.

Tabla 32

Criterios regulatorios

Nombre del criterio	Definición del criterio	Indicadores propuestos	Definición del indicador	Cómo se mide	Escala / Umbral de valoración		
1	Conformidad legal del portafolio con los instrumentos de prohibición vigentes	REG 1.1	Tasa de sustitución de referencias afectadas por Ley 2232	Fracción del portafolio afectado por la Ley 2232 que ya opera sin PSU prohibidos a partir del 7 de julio de 2024.	(N° de referencias sin PSU prohibidos / N° total de referencias afectadas por Ley 2232) × 100	Ajustado - Cumple	> 80%
						Ajuste parcial - Cumple con condiciones	40% - 80%
						Ajuste incipiente - No cumple	< 40%
2	Integración en el sistema de Responsabilidad Extendida del Productor	REG 2.1	Estado del PGARE y nivel de cumplimiento de metas de aprovechamiento	Verifica la existencia de un PGARE vigente ante la ANLA y el porcentaje de cumplimiento de las metas de recolección, aprovechamiento y de contenido incorporado de reciclado, comprometidos para el período evaluado.	PGARE vigente ante ANLA: sí / no Metas de aprovechamiento alcanzadas / Metas establecidas en PGARE) × 100	Integración efectiva - Cumple	PGARE activo cumplimiento ≥ 50% de metas
						Integración parcial - Cumple con condiciones	PGARE activo cumplimiento < 50% de metas
						No integrado — No cumple	Sin PGARE registrado
3	Aprovechamiento de instrumentos fiscales favorables a la sustitución	REG 3.1	Porcentaje del volumen producido o importado en materiales exentos del IPUSUI	Fracción del volumen total de envases y empaques producidos o importados en el período que corresponde a materiales sostenibles exentos del IPUSUI conforme a la Resolución DIAN 000005 de 2026.	(Volumen en materiales exentos del IPUSUI / Volumen total producido o importado en el período) × 100, verificado contra la declaración tributaria ante la DIAN	Aprovechamiento significativo - Cumple	≥ 50%
						Aprovechamiento parcial - Cumple con condiciones	< 50%
						Sin aprovechamiento - No cumple	0

Criterios Operativos

Se construyen cuatro criterios que orientan la evaluación que las empresas del sector de empaques y envases deben tener en cuenta para avanzar hacia la adopción de materiales sostenibles.

Capacidad Operativa de Adaptación del Material, evalúa que maquinaria y que parámetros de producción son compatibles con la transición y que permite un análisis de riesgo de continuidad operativa.

Se propone que un rango favorable ($\geq 80\%$), representa un reemplazo directo (Drop-in). una variabilidad $\leq 20\%$ puede ser parte de un proceso estándar. Las adaptaciones menores ($50\% - 79\%$), define la necesidad de intervenciones en la ingeniería del proceso (calibración, reprogramación) sin requerir transformaciones estructurales. La reconversión mayor ($< 50\%$), funciona como un umbral crítico: un resultado por debajo de la mitad de la compatibilidad requerida, puede denotar falta de compatibilidad (obsolescencia tecnológica) frente a la transición sostenible.

Disponibilidad de Talento Especializado, es uno de los problemas documentados por el sector, mide si la empresa cuenta con personal idóneo y cómo gestiona las brechas de competencias a través de capacitaciones.

Se propone un umbral favorable mayor del 80%, cuando las personas tienen las competencias apropiadas para la transición. Entre un 50% y 79%, como una condición que requiere atención y por debajo del 50%, como una condición crítica.

Ante la necesidad de cerrar esas brechas formativas, también se plantea evaluar la cantidad de capacitaciones necesarias que requiere la transición. La condición ideal es que las personas no necesiten capacitación específica, solo con adaptar sus capacidades a los nuevos procesos, es posible hacer la transición. Como una necesidad media, entre uno y dos capacitaciones y una necesidad alta para tres capacitaciones o más.

Acceso a Soporte Técnico y de I+D+i, se establecen tres indicadores para conocer el estado de este criterio a partir de la verificación al acceso a soporte técnico especializado como condición favorable. La verificación funcional de los materiales, es decir, si se evidencia validación o no. Y el acceso a laboratorios que puedan emitir certificaciones que den garantías del uso del nuevo material y que estén alineadas a los requerimientos legales.

Disponibilidad de Cadena de Suministro de Materiales Sostenibles, evaluada a partir de las categorías de cumplimiento para producción local e importación disponible. Condicionado, cuando la producción e importación están limitados y si no se identifican proveedores, el indicador no cumple.

En la Tabla 33, se encuentra compilada la propuesta de los criterios operativos.

Criterios operativos

Nombre del criterio		Definición del criterio		Indicadores propuestos		Definición del indicador		Cómo se mide		Escala / Umbral de valoración	
1	Capacidad operativa de adaptación empresarial	Evalúa si los equipos y procesos productivos actuales son compatibles con los materiales sostenibles candidatos a sustituir los PSU.	OPE 1.1	Compatibilidad con el proceso		Clasifica el esfuerzo de adaptación empresarial según las exigencias técnicas.		(N° de parámetros de proceso compatibles sin modificación / N° total de parámetros críticos evaluados para el material candidato) × 100		Reemplazo directo (Drop-in) Transición viable sin reconversión mayor - Favorable	≥ 80%
										Adaptaciones menores requeridas - Condicionado	50% - 79%
										Reconversión mayor necesaria	< 50%
2	Disponibilidad de talento especializado	Evalúa si la empresa cuenta con personal competente para trabajar con materiales sostenibles y gestiona sistemáticamente las brechas de competencia para la transición.	OPE 2.1	Competencias para la transición		Cobertura de evaluación de competencias en cargos críticos para la transición		(N° de cargos críticos para la transición con evaluación de competencias documentada en los últimos 12 meses / N° total de cargos críticos identificados para la transición) × 100		Favorable	≥ 80%
										Condicionada	50% - 79%
			OPE 2.2	Capacitaciones		Necesidad de capacitación para la adopción del material sostenible candidato		N° de capacitaciones requeridas para cubrir las brechas de competencia identificadas en la adopción del material sostenible candidato		Crítica	< 50%
										Sin necesidad de capacitación adicional	0
										Necesidad media	1 - 2
3	Acceso a soporte técnico y de I+D+i	Evalúa si la empresa tiene vínculos formales activos con entidades que puedan acompañarla técnicamente en la adopción del material sostenible candidato, soportado con las certificaciones pertinentes.	OPE 3.1	Soporte técnico		Vínculos formales activos con entidades de soporte técnico orientados a materiales sostenibles (convenios, membresías, proyectos, universidades, centros tecnológicos o proveedores especializados)		Verificación binaria acerca de vínculos formales activos verificables con entidades de soporte técnico		Si	Favorable
										No	Con limitaciones
			OPE 3.2	Aptitud funcional para empaques y envases		Mide si el material ha sido técnicamente validado para las aplicaciones objetivo del sector de empaques y envases, incluyendo propiedades de barrera, resistencia mecánica, compatibilidad con alimentos y certificaciones requeridas.		Escala categórica de tres niveles: Validado Validado con limitaciones No validado		Validado	Cumple
										Validado con limitaciones	Cumple con condiciones
										No validado	No cumple
			OPE 3.3	Acceso a laboratorio con capacidad de verificación de materiales sostenibles		Mide si la empresa puede acceder a un laboratorio que cuente con capacidad acreditada para verificar las propiedades críticas del material sostenible candidato (biodegradabilidad o compostabilidad bajo norma).		Verificación binaria sobre la existencia de un laboratorio para ensayos		Si	Favorable
										Si, sin acreditación formal	Condicionada
										No	Crítico
4	Disponibilidad de cadena de suministro de materiales sostenibles	Evalúa si el material sostenible candidato está disponible para la empresa en condiciones comerciales viables, ya sea mediante producción nacional o canales de importación establecidos.	OPE 4.1	Disponibilidad comercial en Colombia		Mide si el material sostenible es accesible para las empresas del sector en Colombia, ya sea mediante producción local o importación con cadena de abastecimiento confiable.		Escala categórica de cuatro niveles:		Producción local	Cumple
										Importación disponible	Cumple
						Determina la factibilidad de adopción en el corto plazo.		Producción local Importación disponible Limitada (pocos proveedores / alto costo) Sin presencia identificada		Producción / Importación limitada	Cumple con condiciones
										Sin presencia identificada	No cumple

Interacción de Criterios

Como se describió en la metodología, para identificar las relaciones de influencia entre los criterios derivados del diagnóstico se aplica el análisis estructural mediante la Matriz de Influencias Directas (MID), en el marco del método MICMAC (Matrice d'Impacts Croisés Multiplication Appliquée à un Classement) desarrollado por Godet (2000), que consiste según **Pérez & Vargas (2016)**, en construir una matriz cuadrada de influencias directas en la que cada par de criterios es valorado por el investigador en una escala de 0 a 3, donde 0 indica ausencia de influencia y 3 indica influencia fuerte. A partir de la suma por filas, se establece la motricidad que es entendida como la capacidad de un criterio de influir sobre los demás. La suma por columnas, define la dependencia y es la susceptibilidad de un criterio a ser influenciado. Los criterios se posicionan en un plano cartesiano dividido por el promedio en cuatro cuadrantes: motores (alta motricidad, baja dependencia), de enlace (alta motricidad, alta dependencia), dependientes (baja motricidad, alta dependencia) y autónomos (baja motricidad, baja dependencia).

La elección de la MID como herramienta de jerarquización responde a las características del presente estudio. Al tratarse de criterios cualitativos contruidos a partir de un diagnóstico documental y sectorial, sin series estadísticas que permitan establecer correlaciones cuantitativas entre variables, la técnica resulta pertinente porque sistematiza el juicio del investigador. En este caso, la matriz incorpora los cuatro grupos de criterios del diagnóstico: técnico - ambiental, económico, regulatorio y operativo, lo que permite establecer cuáles de ellos actúan como motores, de enlace, dependientes y autónomos.

En la Tabla 34 se presenta el método MID, aplicado a los criterios que se definieron a partir del diagnóstico.

Tabla 34

Matriz de influencias directas - MID

		DEPENDENCIA												Total MOT	
		TA 1	TA 2	TA 3	ECN 1	ECN 2	ECN 3	REG 1	REG 2	REG 3	OPE 1	OPE 2	OPE 3	OPE 4	
MOTRICIDAD	TA 1		2	1	2	1	2	1	1	1	3	2	2	3	21
	TA 2	0		1	0	0	2	0	1	1	0	0	1	0	6
	TA 3	0	2		1	1	2	1	3	0	0	1	1	1	13
	ECN 1	0	0	0		3	2	2	2	3	0	1	1	2	16
	ECN 2	0	1	1	0		1	2	3	2	3	3	3	2	21
	ECN 3	1	0	2	2	2		0	1	1	1	1	2	3	16
	REG 1	0	2	2	2	2	2		2	2	2	2	1	2	21
	REG 2	0	2	3	0	2	1	1		2	0	1	1	2	15
	REG 3	0	0	1	3	2	2	0	2		0	1	1	2	14
	OPE 1	0	0	0	2	2	1	2	0	0		2	1	2	12
	OPE 2	0	0	1	0	2	0	2	2	1	2		2	1	13
	OPE 3	1	2	1	1	2	2	2	2	1	3	3		2	22
	OPE 4	0	1	1	2	2	3	3	2	2	2	1	2		21
	Total DEP		2	12	14	15	21	20	16	21	16	16	18	18	22

Ahora, la Figura 29 presenta el plano de motricidad - dependencia resultante de la aplicación de la Matriz de Influencias Directas (MID). El eje vertical expresa el nivel de motricidad de cada criterio, es decir, su capacidad de influir sobre los demás elementos del sistema según la valoración asignada en la matriz; el eje horizontal expresa el nivel de dependencia, entendido como el grado en que cada criterio es condicionado por los restantes bajo el mismo criterio de valoración.

La intersección de ambos ejes en el valor promedio (16,2) divide el plano en cuatro cuadrantes relativos (porque depende de las puntuaciones resultante del análisis) que permiten identificar el rol estructural de cada criterio: variables de poder o motoras (cuadrante superior izquierdo), variables conflictivas o de enlace (cuadrante superior derecho), variables de resultado o dependientes (cuadrante inferior derecho) y variables autónomas (cuadrante inferior izquierdo).

Figura 29

Plano Motricidad - Dependencia



A partir de la gráfica y de la ubicación de los criterios según el cuadrante, se puede mencionar los siguiente:

Criterios Motores - TA 1 y REG 1. Alta motricidad, baja dependencia. Son los criterios de mayor peso estructural dentro de la matriz: la madurez tecnológica del material está asociada a gran parte de las condiciones operativas evaluadas (compatibilidad, cadena de suministro, capacitación), y la Ley 2232 constituye el mandato que orienta la transición con relativa independencia del comportamiento de los demás criterios.

Criterios de Enlace - ECN 2, OPE 3 y OPE 4. Alta motricidad y alta dependencia. Son los criterios bisagra de la matriz: la capacidad económica de la empresa condiciona en buena medida la posibilidad de adaptación, y a su vez está asociada al diferencial de costo y al comportamiento del mercado; el soporte técnico está vinculado al proceso y al talento, pero

también al estado del mercado; la cadena de suministro está asociada al cumplimiento legal y a la adopción, pero también a las señales de demanda.

Criterios Dependientes - ECN 3, REG 2 y OPE 2. Baja motricidad, alta dependencia.

Son los criterios que, dentro de la matriz, resultan más condicionados por los demás: el CAGR del mercado está asociado al comportamiento de los demás factores, la integración REP está condicionada por la existencia de infraestructura de fin de vida y de capacidad financiera, y el desarrollo de talento está asociado a la adaptación en curso.

Criterios Autónomos - TA 2, TA 3, ECN 1, REG 3 y OPE 1. Son criterios relativamente exógenos dentro de la matriz: el desempeño ambiental del material es una propiedad intrínseca, el diferencial de precio es una señal de mercado que la empresa no controla, la infraestructura de fin de vida es una condición del país, y la compatibilidad operativa es una característica técnica del conjunto material - proceso.

A manera de análisis de sensibilidad, se identifica que la clasificación de cuatro criterios es sensible a una variación mínima en la matriz: en cada caso, basta con que una sola valoración par a par se incremente en un punto para que el criterio cruce el umbral promedio (16,2) y cambie de cuadrante. Así, REG1 (dependencia = 16) pasaría del cuadrante de motores al de enlace si cualquiera de las valoraciones de dependencia recibidas se incrementara en una unidad; ECN1 (motricidad = 16, dependencia = 15) pasaría de autónomo a motor ante el mismo tipo de variación en su motricidad; y REG3 y OPE1 (dependencia = 16 en ambos casos) pasarían de autónomos a dependientes. Esta sensibilidad es consistente con el hecho de que la matriz refleja un ejercicio de valoración documental realizado a juicio propio, por lo que la posición de estos cuatro criterios cerca del umbral constituye un resultado provisional, susceptible de ajustarse mediante evaluación de expertos o mediante la ejecución real de la herramienta sobre el contexto específico de una empresa.

Propuesta de Solución a la Problemática

La propuesta corresponde al planteamiento de una herramienta de diagnóstico multicriterio que integra los resultados del trabajo de campo en un instrumento orientado a la empresa del sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana. La arquitectura articula tres marcos complementarios: la metodología de Technology Roadmapping (TRM), que organiza el instrumento en capas superpuestas sobre una dimensión de avance por fases; el Marco de Perspectiva Multinivel (MLP), que encuadra la dinámica de la transición sociotécnica en tres niveles: paisaje, régimen y nicho; y el análisis de influencia y dependencia MICMAC, cuyos resultados determinan la priorización y la secuencia de los criterios dentro del instrumento.

Capas TRM de la Herramienta Diagnóstico

La Capa Superior - ¿por qué?, recoge el contexto estratégico que justifica y orienta la transición. Integra los mandatos regulatorios (REG1 y REG 2), las señales del mercado global de materiales sostenibles (ECN3), aprovechamiento de instrumentos (REG3) y los perfiles de impacto ambiental de los materiales candidatos (TA2). En términos del MLP, esta capa corresponde al nivel del paisaje: las fuerzas exógenas: legislación, presiones de mercado y tendencias ambientales, que ejercen presión sobre el régimen productivo existente sin estar bajo el control directo de la empresa.

La Capa Intermedia - ¿qué?, define los materiales y estrategias de sustitución que deben adoptarse para responder al contexto identificado. Incluye la evaluación de materiales candidatos, con base en el criterio de madurez tecnológica (TA1), como de rediseño de producto y la disponibilidad real en el mercado nacional (OPE4). En términos del MLP, esta capa opera en el nivel del nicho: los materiales sostenibles que han alcanzado suficiente madurez para escalar hacia el régimen productivo.

La Capa Inferior - ¿cómo?, identifica los habilitadores necesarios para ejecutar la transición definida en la capa intermedia. Agrupa los filtros de viabilidad de la selección de materiales (TA3 y ECN1), el acceso a soporte técnico acreditado para verificación (OPE3), la evaluación de la capacidad operativa de adaptación (OPE1), la estructura financiera de adaptación (ECN2), el desarrollo de talento (OPE2) y el seguimiento por indicadores. En términos del MLP, esta capa corresponde al nivel del régimen: el conjunto de actores, infraestructuras, prácticas y capacidades que deben reconvertirse para que el nicho escale de forma sostenida.

Fases de la Herramienta Diagnóstico

La dimensión de avance se estructura en cinco fases progresivas. Sin horizonte temporal fijo, cada empresa adapta el ritmo a sus condiciones internas. Los únicos anclajes de tiempo externos son los normativos, que aplican a toda empresa del sector con independencia de su estado de adaptación.

El MICMAC es el fundamento metodológico que justifica por qué los criterios están distribuidos en las fases en el orden que se propone y no en otro. La secuencia de la herramienta diagnóstico tiene una base estructural por las relaciones de influencia y dependencia identificadas en el análisis.

La Fase 1 - Lectura del Contexto, corresponde al reconocimiento del entorno que condiciona la transición. La empresa identifica cuáles de sus líneas productivas fabrican productos clasificados como PSU bajo la Ley 2232 de 2022 y determina qué restricciones del calendario de la Resolución 803 de 2024 le son aplicables (REG1). Simultáneamente, registra las señales del mercado de materiales sostenibles como indicador de la dirección estratégica del sector (ECN3) y caracteriza los mecanismos fiscales aplicables (REG3). El resultado de esta fase es un mapa de exposición regulatoria y de contexto de mercado que informa la priorización de la fase 2.

La Fase 2 - Selección de Materiales, es la única fase en que las tres capas TRM están activas simultáneamente, lo que refleja que la decisión de qué material adoptar involucra consideraciones de contexto, de candidatura y de viabilidad al mismo tiempo. En la capa ¿por qué?, la empresa evalúa el perfil del desempeño ambiental de los materiales candidatos: GWP e impactos ACV (TA2). En la capa ¿qué?, el criterio de madurez tecnológica (TA1) opera como el filtro primario de candidatura y la disponibilidad en la cadena de suministro nacional (OPE4) actúa como filtro de viabilidad comercial: un material técnicamente maduro pero sin acceso en el mercado local no puede ser seleccionado. En la capa ¿cómo?, la compatibilidad operativa con los equipos actuales (TA3), el diferencial de costo frente al PSU de referencia (ECN1) y el acceso a laboratorio acreditado para verificar las propiedades declaradas del material (OPE3) constituyen los tres filtros de viabilidad de la selección.

La Fase 3 - Habilitación Crítica, constituye el eslabón decisivo de la herramienta diagnóstico: si no se supera, la empresa debe regresar a la fase 2 y revisar el material candidato seleccionado. La fase se estructura en una secuencia interna de dos pasos. Primero, la empresa evalúa la magnitud de la brecha de adaptación tecnológica requerida para procesar el material seleccionado (OPE1): este diagnóstico determina qué modificaciones de proceso, equipos o infraestructura son necesarias. Segundo, con esa información como insumo, evalúa si dispone de la capacidad financiera para ejecutar esa reconversión (ECN2). Si OPE1 y ECN2 son favorables, la empresa avanza a la fase 4.

La Fase 4 – Implementación, ejecuta la adaptación productiva e integra las obligaciones regulatorias de cumplimiento obligatorio. En la capa ¿por qué?, la empresa formaliza su inscripción en el sistema de Responsabilidad Extendida al Productor (REP) según la Resolución 803 de 2024 y verifica el cumplimiento con el calendario de restricciones de la Ley 2232 de 2022 (REG2). Estos hitos son los únicos anclajes temporales externos que la herramienta diagnóstica impone con independencia del ritmo de cada empresa. En la capa

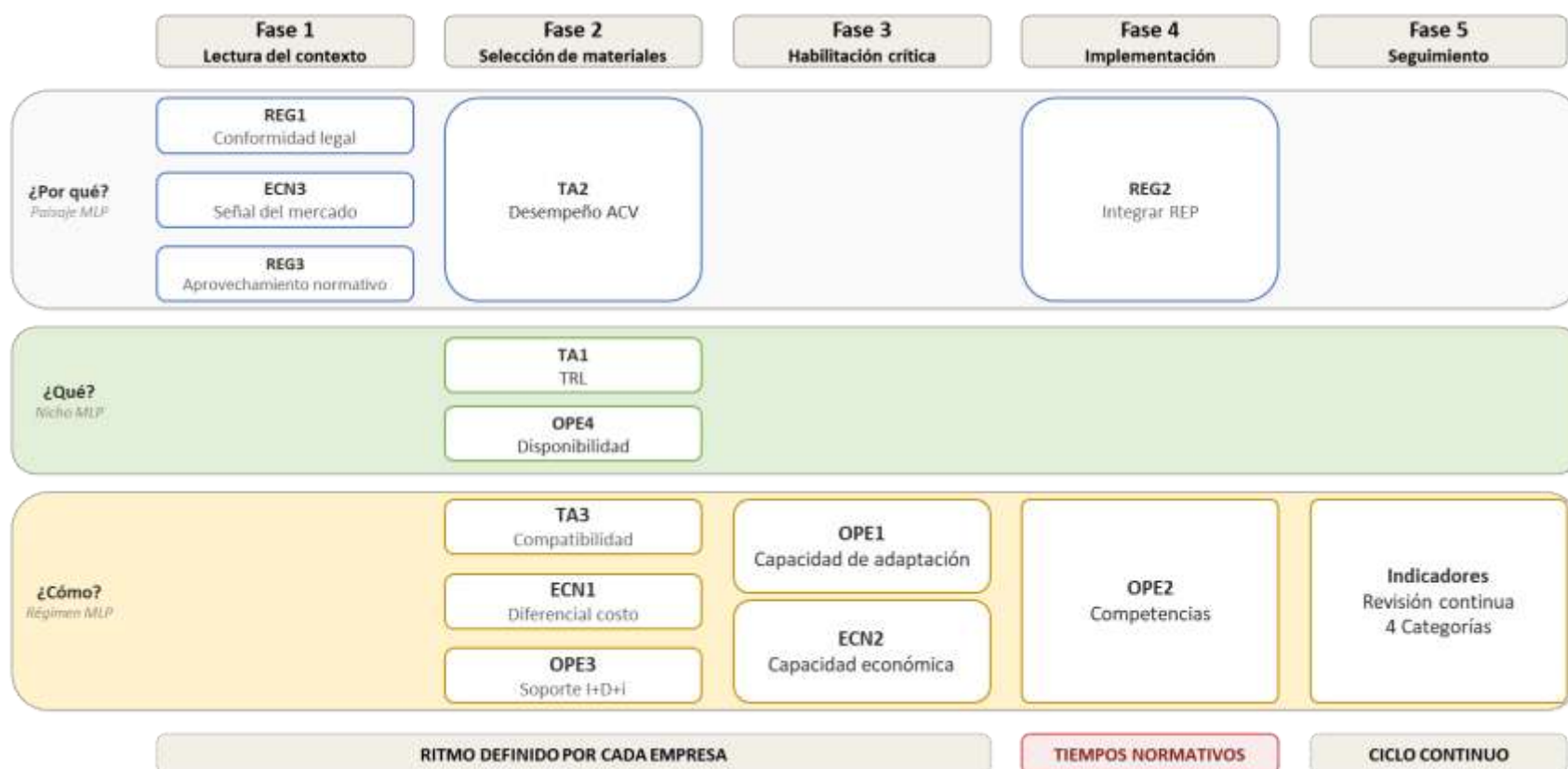
¿cómo?, el desarrollo de competencias y formación del personal (OPE2) emerge en esta fase como variable dependiente: el talento se desarrolla en respuesta a la adaptación en curso, una vez que los equipos, los materiales y el soporte técnico están operativos.

La Fase 5 – Seguimiento, monitorea el avance de la transición mediante la revisión continua de los indicadores de las categorías técnico – ambiental, económica, regulatoria y operativa. Este ciclo de seguimiento itera cada fase, cada etapa y permite ajustar la herramienta diagnóstico a las condiciones cambiantes del mercado y la regulación.

La Figura 30 presenta la arquitectura integrada de la herramienta de diagnóstico multicriterio en su representación gráfica.

Figura 30

Estructura de la herramienta de diagnóstico multicriterio propuesta



Discusión

Las limitaciones que se exponen a continuación son pertinentes para cuestionar el alcance interpretativo de los resultados obtenidos y delimitar la validez de la herramienta de diagnóstico multicriterio desarrollada en esta investigación.

Según Miedzinski et al. (2022), identifican que la mayoría de los instrumentos de transición existentes se concentran en metas regulatorias o de mercado sin especificar las condiciones técnicas y operativas bajo las cuales esas metas son alcanzables; la herramienta desarrollada responde a ese vacío, pero por su naturaleza diagnóstica no define por sí misma una secuencia de acciones temporales vinculantes para la empresa, sino que delimita las condiciones que esta debe evaluar antes de comprometer recursos.

La cobertura de las fuentes estadísticas oficiales empleadas en el diagnóstico sectorial es parcial. Al comparar los 532 establecimientos registrados por la Encuesta Anual Manufacturera del DANE en 2024 frente a las 3.816 empresas registradas por Confecámaras para el mismo año, se establece que la EAM captura directamente el 13,9 % del tejido empresarial del sector plástico colombiano en número de empresas, dejando por fuera de la medición oficial al 86,1 % restante, el cual corresponde en su mayoría a micro y pequeñas empresas (Confecámaras, 2024; DANE, 2025a).

El alcance documental adoptado en esta investigación implica que los criterios que estructuran la herramienta, se construyeron a partir del protocolo de verificación de fuentes en cuatro niveles descrito en la metodología, sin una instancia adicional de validación de contenido mediante juicio de expertos o entrevistas semiestructuradas con actores del sector productivo. De la misma manera, para la construcción de las escalas y umbrales de valoración de cada categoría se propusieron a criterio propio del investigador, basado en las fuentes consultadas. Esta decisión de alcance es coherente con el carácter descriptivo y documental declarado para

la investigación, y deja abierta como línea de profundización futura la contrastación de los criterios propuestos con la experiencia directa de empresas del sector.

La Matriz de Influencias Directas (MID), refleja un ejercicio de valoración documental realizado a juicio propio, sin un panel de expertos. Lo cual refuerza la pertinencia del análisis de sensibilidad presentado en el capítulo de interacción de criterios.

El análisis realizado sobre el criterio REG1, relacionado con el cumplimiento del calendario de prohibición de la Ley 2232 de 2022, sugiere que podría operar mejor como una condición de entrada al diagnóstico (de análisis de contexto) que como un criterio interno evaluado en el mismo plano que los doce restantes, dado que una empresa en conformidad legal plena tendría escasa necesidad de un instrumento de transición. Esta investigación la deja planteada como una decisión sujeta a validación posterior.

Finalmente, el diseño transversal de la investigación implica que el diagnóstico corresponde a un momento único del contexto regulatorio, tecnológico y de mercado (Hernández et al., 2014). Dado que el calendario de la Ley 2232 de 2022 contempla fases de implementación que se extienden hasta el año 2030, las condiciones diagnosticadas en este estudio pueden modificarse en el tiempo, por lo que la vigencia de los resultados está sujeta a actualización periódica.

Conclusiones

En relación con el primer objetivo específico, el análisis del estado del arte y del marco normativo nacional e internacional permitió establecer que los instrumentos de planificación existentes para la transición de plásticos de un solo uso comparten una limitación estructural: la ausencia de especificación de las condiciones técnicas y operativas bajo las cuales sus metas regulatorias y de mercado resultan alcanzables. Esta brecha, documentada mediante la revisión comparativa de nueve instrumentos internacionales y nacionales, constituye el fundamento que justifica el desarrollo de una herramienta orientada específicamente al diagnóstico de esas condiciones en el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana.

Con respecto al segundo objetivo específico, la caracterización del contexto colombiano evidenció condiciones marcadamente heterogéneas entre las empresas del sector. El hallazgo de que el 86,1 % de las empresas registradas están por debajo del umbral de cobertura de la EAM, junto con las brechas identificadas en capital humano especializado e infraestructura de laboratorios acreditados para verificación de materiales sostenibles, confirma que las capacidades de adaptación del sector no son homogéneas y que un instrumento de transición debe ser aplicable a empresas en distintos niveles de madurez.

En relación con el tercer objetivo específico, la construcción de los trece criterios distribuidos en las cuatro categorías técnico - ambiental, económica, regulatoria y operativa, estructurados mediante el análisis de influencia y dependencia con base en la Matriz de Influencias Directas (MID), en el marco del método MICMAC, permitió desarrollar una herramienta de diagnóstico cuya arquitectura organiza las fases de evaluación siguiendo la lógica de capas del Technology Roadmapping y se encuadra en la dinámica de transición sociotécnica descrita por el Marco de Perspectiva Multinivel. El resultado integra los hallazgos documentales de las cuatro dimensiones en un instrumento que puede ser aplicado por las

empresas, con el apoyo de un panel de expertos para la verificación de los umbrales cuantitativos que lo componen, definidos a juicio del investigador.

Finalmente, respecto a los objetivos planteados, se confirman las condiciones heterogéneas de adaptación identificadas en el sector de empaques y envases de la industria plástica colombiana en las categorías técnico - ambientales, económicas, regulatorias y operativas, se sistematizaron efectivamente en un conjunto acotado de trece criterios diagnósticos, jerarquizados según su nivel de influencia y dependencia mediante la Matriz de Influencias Directas (MID), sin que ello implique una relación de causa y efecto entre la integración de las categorías y la herramienta de diagnóstico desarrollada, la cual constituye el producto central de esta investigación.

Trabajo Futuro

A partir de los resultados y limitaciones identificadas, se plantean las siguientes oportunidades para trabajos posteriores.

Se recomienda el desarrollo de una hoja de ruta complementaria como proyecto independiente, que retome la estructura de fases de la herramienta de diagnóstico y la extienda hacia una propuesta de planificación temporal con metas, hitos y actores responsables. En particular, esta hoja de ruta futura debería incorporar una guía operativa de uso de la herramienta desde la perspectiva de la empresa usuaria, complementando la descripción conceptual de capas y fases desarrollada en el presente trabajo con una síntesis práctica de aplicación.

Se sugiere la validación empírica de la herramienta mediante su aplicación piloto en empresas representativas de las clases CIIU 2013, 2221 y 2229, complementada con juicio de expertos del sector académico y productivo, con el fin de contrastar los criterios construidos documentalmente frente a la experiencia de implementación real.

Se recomienda profundizar en la resolución estructural de los criterios REG1 y REG3, evaluando su reposicionamiento como condición de entrada al diagnóstico y como elemento de una fase de implementación posterior, respectivamente.

Dado que el 89,8 % de las empresas del sector plástico colombiano corresponde a micro y pequeñas empresas con capacidades técnicas limitadas, se recomienda como línea de trabajo futura el desarrollo de una versión simplificada de la herramienta, en formato de lista de verificación, orientada específicamente a MIPYMES y complementaria a la versión completa de trece criterios dirigida a empresas de mayor capacidad instalada.

Finalmente, se sugiere explorar la extensión de la herramienta hacia otras clases CIIU de la cadena de valor del plástico no cubiertas en esta investigación.

Referencias

- Acoplásticos. (2023, diciembre 4). *ACOPLÁSTICOS se pronuncia frente al fallo de la Corte Constitucional sobre el impuesto nacional a los plásticos de un solo uso*.
<https://acoplasticos.org/acoplasticos-se-pronuncia-frente-al-fallo-de-la-corte-constitucional-sobre-el-impuesto-nacional-a-los-plasticos-de-un-solo-uso/>
- Acoplásticos. (2024a). *Acoplásticos - Directorio de reciclaje*.
https://datastudio.google.com/u/0/reporting/568863ca-6f00-4999-8394-30341e2cd0e0/page/p_ytm8wg9ogd
- Acoplásticos. (2024b). *Impacto promedio del "Impuesto nacional sobre productos plásticos de un solo uso utilizados para envasar, embalar o empacar bienes" (Ley 2277 de 2022. Artículos 50-53) sobre los precios de los productos*. https://acoplasticos.org/wp-content/uploads/2024/02/Impacto_impuesto.pdf
- Acoplásticos. (2025). *Plásticos en Colombia 2025*.
- Acoplásticos, & ICIPC. (2025). *La industria del plástico en Colombia frente a la transformación digital: estrategias para el desarrollo de habilidades*.
- Alcázar, J. (2024). Impacto de la Contaminación Plástica en los Ecosistemas Marinos y su Panorama Actual. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 2(4), 16–28. <https://doi.org/10.70881/mcj/v2/n4/2>
- Ali, S. S., Abdelkarim, E. A., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Li, F., Kornaros, M., Zuorro, A., Zhu, D., & Sun, J. (2023). Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review. En *Environmental Science and Ecotechnology* (Vol. 15). Editorial Board, Research of Environmental Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100254>
- Altenburger, L. M., Yerokhin, S.-M., Mayer, · Leonard, & Dijkstra-Silva, S. (2024). Innovations to overcome the current waste problem caused by single-use plastics in the pursuit of a circular economy. *Sustainability Nexus Forum 2024* 32:1, 32(1), 11-. <https://doi.org/10.1007/s00550-024-00547-9>
- Ambiente. (2016). *Resolución 0668 de 2016*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-668-de-2016/>

Ambiente. (2018, julio 26). *Resolución 1407 de 2018*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1407-de-2018/>

Ambiente. (2019). *Resolución 2184 de 2019*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2184-de-2019/>

Ambiente. (2020). *Resolución 1342 de 2020*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1342-de-2020/>

Ambiente. (2022, julio 7). *Ley 2232 de 2022*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-2232-de-2022/>

Ambiente. (2024a). *Menos plásticos por la vida*. <https://www.minambiente.gov.co/plasticos-por-la-vida/>

Ambiente. (2024b, junio 24). *Resolución 0803 del 24 de junio de 2024*.

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0803-del-24-de-junio-de-2024/>

Ambiente. (2026). *Minambiente y DIAN fijan reglas claras para la importación de plásticos de un solo uso en Colombia* -. <https://www.minambiente.gov.co/minambiente-y-dian-fijan-reglas-claras-para-la-importacion-de-plasticos-de-un-solo-uso-en-colombiaminambiente-y-dian-fijan-reglas-claras-para-la-importacion-de-plasticos-de-un-solo-uso-en-colombia/>

ANALDEX. (2025). *Colombia ante el desafío global del plástico: comercio exterior, sostenibilidad e innovación*.

ASTM. (2013, junio 11). *El Comité de Plásticos de ASTM publica importantes revisiones al estándar del Código de Identificación de Resinas (RIC)*.

ASTM. (2021a). *ASTM D7611/D7611M-21 Práctica estándar para la codificación de productos plásticos para identificación de resina*. https://store.astm.org/d7611_d7611m-21.html?_gl=1*44f6ky*_gcl_au*NzcwMTM1NTQxLjE3NzEyMjMzNg.

ASTM. (2021b). *Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities*. <https://doi.org/10.1520/D6400-21>

Australian Government. (2022). *Plastics - DCCEEW*. <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/waste/plastics-and-packaging>

BCN. (2016). *Ley Chile - Ley 20920 - Biblioteca del Congreso Nacional*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>

BCN. (2019). *Ley Chile - Ley 21100 - Biblioteca del Congreso Nacional*.

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1121380>

BCN. (2021). *Ley Chile - Ley 21368 - Biblioteca del Congreso Nacional*.

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163603>

BDO. (2024). *Plastics tax in Germany - the Single-Use Plastic Fund Act - BDO*. <https://www.bdo.de/en-gb/insights/publishments/tax-legal/plastics-tax-in-germany-the-single-use-plastic-fund-act>

Behuria, P. (2021). Ban the (plastic) bag? Explaining variation in the implementation of plastic bag bans in Rwanda, Kenya and Uganda. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 39(8), 1791–1808. <https://doi.org/10.1177/2399654421994836>

Benavides, P. T., Lee, U., & Zarè-Mehrjerdi, O. (2020). Life cycle greenhouse gas emissions and energy use of polylactic acid, bio-derived polyethylene, and fossil-derived polyethylene. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124010>

Bianchi, M., Dorigato, A., Morreale, M., & Pegoretti, A. (2023). Evaluation of the Physical and Shape Memory Properties of Fully Biodegradable Poly(lactic acid) (PLA)/Poly(butylene adipate terephthalate) (PBAT) Blends. *Polymers* 2023, Vol. 15, 15(4). <https://doi.org/10.3390/polym15040881>

Börner, T., & Zinn, M. (2024). Key challenges in the advancement and industrialization of biobased and biodegradable plastics: a value chain overarching perspective. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1406278>

Bustamante, D., Londoño-Pineda, A., Cano, J. A., & Weyers, S. (2025). Overcoming Barriers to Circular Economy in Plastic Packaging: Enablers and Integrated Strategies in Multinational Companies. *Sustainability (Switzerland)*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/su17219757>

Cámara de Diputados. (2025). *Gaceta Parlamentaria*.

Campos. (2023, mayo 16). *Análisis bibliométrico y revisión sistemática*.

<https://bibliogetafe.com/2023/05/16/analisis-bibliometrico-y-revision-sistematica/>

Cancillería. (2022, julio 7). *Compilación jurídica de la Cancillería de Colombia - Ley 2232 de 2022*.

https://cancilleria.gov.co/normograma/compilacion/docs/ley_2232_2022.htm?utm_source=chatgpt.com

Cempre. (2020). *Guía para la identificación de resinas plásticas*.

Cempre. (2024). *Panorama de los plásticos en Colombia*. <https://cempre.org.co/pacto-plasticos/recursos/#2>

CEPAL. (s/f). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Recuperado el 19 de mayo de 2025, de <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>

Chemanalyst. (2025, junio). *Precios, tendencias, gráfico y noticias del tereftalato de adipato de polibutileno*. <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/polybutylene-adipate-terephthalate-resin-1219>

Chong, E. T. J., Ng, J. W., & Lee, P. C. (2023). Classification and Medical Applications of Biomaterials—A Mini Review. *BIO Integration*, 4(2), 54. <https://doi.org/10.15212/BIOT-2022-0009>

CITEO. (s/f). *2023 - guide-des-bonus-et-malus-2023-des-emballages*.

Clauson, D. (2016, julio 26). *Modernización del Código de Identificación de Resinas*. <https://www.astm.org/news/modernizing-resin-identification-code-ja13>

CMS. (2024a). *Plastics and packaging laws in Germany*| CMS Expert Guide. <https://cms.law/en/int/expert-guides/plastics-and-packaging-laws/germany>

CMS. (2024b). *Plastics and packaging laws in Norway*| CMS Expert Guide. <https://cms.law/en/int/expert-guides/plastics-and-packaging-laws/norway>

CMS. (2025). *Plastics and packaging laws in France*| CMS Expert Guide. <https://cms.law/en/int/expert-guides/plastics-and-packaging-laws/france>

Coherent Market Insights. (2026). *Bio-Based Polyethylene Terephthalate Market Size, 2026-2033*. <https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/bio-based-polyethylene-terephthalate-market-1254>

Comisión Europea. (2022). *Marco político de la UE para los plásticos biobasados, biodegradables y compostables*.

Comisión Europea. (2023a, marzo 29). *Plásticos de origen biológico, biodegradables y compostables - Comisión Europea*. https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en

Confecámaras. (2024). *Sector Empresarial en Cifras - Confecámaras*.

<https://confecameras.org.co/sector-empresarial-en-cifras/>

CONPES. (2008). *2008 - CONPES 3530 - 2008*.

CONPES. (2016). *Consejo nacional de política económica y social CONPES*.

CONPES. (2025). *CONPES consejo nacional de política económica y social república de colombia departamento nacional de planeación*.

DANE. (2022). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas. Rev. 4 Adaptada para Colombia*.

DANE. (2025a). *Boletín técnico - Encuesta Anual Manufacturera EAM 2024*.

DANE. (2025b). *Encuesta Anual Manufacturera (EAM) - DANE*.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam>

DANE. (2025c). *Metodología General Encuesta Anual Manufacturera - EAM*.

Daudt, R. (2025). *Single-Use Plastic (SUP) Bans Across Australia*.

<https://www.awenconsulting.com/post/single-use-plastic-sup-bans-across-australia>

de Jesus, T. W. S., Pasquini, D., & Benvenuti, T. (2023). Characterization of PS/PP/HDPE/LDPE Polymer Blend Obtained from Plastic Waste Collected on Beaches in Ilhéus-Bahia, Brazil. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 4155, 15(20), 4155. <https://doi.org/10.3390/polym15204155>

de Jong, E., Goumans, I., Visser, R., Puente, Á., & Gruter, G. J. (2025). The Opportunities and Challenges of Biobased Packaging Solutions. En *Polymers* (Vol. 17, Número 16). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym17162217>

Defensoría del Pueblo. (2025). *Defensoria del Pueblo Peru*. <https://www.defensoria.gob.pe/defensoria-del-pueblo-a-siete-anos-de-vigencia-de-la-ley-que-regula-el-plastico-de-un-solo-uso-aun-hay-temas-pendientes/>

Deshpande, M. V., Girase, A., & King, M. W. (2023). Degradation of Poly(ϵ -caprolactone) Resorbable Multifilament Yarn under Physiological Conditions. *Polymers*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/polym15183819>

- Dmitruk, A., Ludwiczak, J., Skwarski, M., Makuła, P., & Kaczyński, P. (2023). Influence of PBS, PBAT and TPS content on tensile and processing properties of PLA-based polymeric blends at different temperatures. *Journal of Materials Science* 2022 58:4, 58(4), 1991–2004.
<https://doi.org/10.1007/s10853-022-08081-z>
- Dolci, G., Puricelli, S., Cecere, G., Tua, C., Fava, F., Rigamonti, L., & Grosso, M. (2025). How does plastic compare with alternative materials in the packaging sector? A systematic review of LCA studies. *Waste Management and Research*, 43(3), 339–357.
<https://doi.org/10.1177/0734242X241241606>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296.
<https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2021.04.070>
- Dutta, D., & Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. *Food Biomacromolecules*, 1(2), 58–87.
<https://doi.org/10.1002/fob2.12019>
- Dzierżyński, E., Gawlik, P. J., Puźniak, D., Flieger, W., Jóźwik, K., Teresiński, G., Forma, A., Wdowiak, P., Baj, J., & Flieger, J. (2024). Microplastics in the Human Body: Exposure, Detection, and Risk of Carcinogenesis: A State-of-the-Art Review. *Cancers* 2024, Vol. 16, Page 3703, 16(21), 3703.
<https://doi.org/10.3390/CANCERS16213703>
- Edo, G. I., Ndudi, W., Ali, A. B. M., Yousif, E., Jikah, A. N., Isoje, E. F., Igbuku, U. A., Mafe, A. N., Opiti, R. A., Madueke, C. J., Essaghah, A. E. A., Ahmed, D. S., & Umar, H. (2025). Biopolymers: An inclusive review. *Hybrid Advances*, 9, 100418. <https://doi.org/10.1016/J.HYBADV.2025.100418>
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *THE NEW PLASTICS ECONOMY: RETHINKING THE FUTURE OF PLASTICS & CATALYSING ACTION*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). *The Global Commitment 2021 Progress Report*. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/4e0229983b5d1ecd/original/The-Global-Commitment-2021-Progress-Report.pdf?_gl=1*rit5c4*_ga*ODUzMjA4NjQ3LjE3NzMxMjA4OTk.*_ga_V32N675KJX*czE3NzMxMj

A4OTgkbzEkZzEkdDE3NzMxMjA5NTAkajEyJGwwJGgw*_gcl_au*OTk1NDc1OTYyLjE3NzMxMjA5
MDI.

Elsevier. (2025). *Contenido de Scopus*. <https://www.elsevier.com/products/scopus/content>

European Bioplastics. (2024). *Bioplastics market development update 2024*. www.european-bioplastics.org/news/publications/

EY Global. (2023). *Germany to implement Single-Use Plastics levy from 2024, extending scope to certain fireworks from 2027 | EY - Global*. https://www.ey.com/en_gl/technical/tax-alerts/germany-to-implement-single-use-plastics-levy-from-2024--extendi

Filiciotto, L., & Rothenberg, G. (2021). Biodegradable Plastics: Standards, Policies, and Impacts. *ChemSusChem*, 14(1), 56–72. <https://doi.org/10.1002/cssc.202002044>

Fortune Business Insights. (2026). *Polycaprolactone Market Size, Share | Industry Analysis 2034*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/polycaprolactone-market-111535>

Función Pública. (1974, diciembre 18). *Decreto 2811 de 1974*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>

Función Pública. (2002, agosto 6). *Decreto 1713 de 2002 - Gestor Normativo - Función Pública*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>

Función Pública. (2019, junio 5). *Decreto 957 de 2019*. <https://www.mipymes.gov.co/temas-de-interes/definicion-tamano-empresarial-micro-pequena-median>

Fürst, K., & Feng, Y. (2022). China's regulatory respond to plastic pollution: Trends and trajectories. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.982546>

G20. (2025a). *Germany / Towards Osaka Blue Ocean Vision*. <https://g20mpl.org/partners/germany>

G20. (2025b). *Japan / Towards Osaka Blue Ocean Vision*. <https://g20mpl.org/partners/japan>

G20. (2025c). *Norway / Towards Osaka Blue Ocean Vision*. <https://g20mpl.org/partners/norway>

Garzón, D. (2023). *VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS POR MEDIO DE LA OBTENCIÓN DE FIBRAS, BIODEGRADACIÓN Y LA PIROLISIS PARA EL FOMENTO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR*.

- Garzón, Y., & Gil, L. (2023). *Evaluación del desarrollo, uso y adaptación de bioplásticos en la industria de alimentos en Bogotá, Colombia*.
- Gaviria, N. (2023). *La economía circular en la gestión de plásticos de un solo uso*.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels, F. W., & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3), 399–417. <https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2007.01.003>
- German Environment Agency. (2025). *Packaging recycling only works with correct waste separation* | Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/packaging-recycling-only-works-correct-waste>
- Gil, A., Espinosa, M., González, A., Chiari, M., del Rosario, N., & Batista, V. (2020, abril). *Los envases de plástico y su impacto*. 1, 268–279. <https://revistas.umecit.edu.pa/index.php/sc/article/view/1000/1841>
- Global Climate Initiatives. (2025). *AGEC 2025: obligations and impacts for the circular economy*. <https://globalclimateinitiatives.com/en/loi-agec-2025-obligations-et-impacts-pour-leconomie-circulaire/>
- Gobierno de la Republica de Colombia. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular*.
- Gobierno de Perú. (2018). *Ley N.º 30884 - Normas y documentos legales - Congreso de la República - Plataforma del Estado Peruano*. <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/1122664-30884>
- Godet, M. (2000). The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(1), 3–22. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00120-1)
- Goggin, M., Fleming, A., MacMahon, C., & Owende, P. (2025). Exploring the sustainability of single use plastics in the biopharmaceuticals sector: a scoping review of challenges, opportunities, and impacts. *Frontiers in Sustainability*, 6, 1536382. <https://doi.org/10.3389/frsus.2025.1536382>

Gouvernement français. (2020). *LOI n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (1) - Légifrance*.

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759>

Government of Canada. (2026). *Single-use Plastics Prohibition Regulations: Overview - Canada.ca*.

<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-reducing-waste/reduce-plastic-waste/single-use-plastic-overview.html>

Government of Japan. (2022). *Concerning the Act on Promotion of Resource Circulation for Plastics | May 2022 | Highlighting Japan*. [https://www.gov-](https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/202205/202205_09_en.html)

[online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/202205/202205_09_en.html](https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/202205/202205_09_en.html)

Government of South Australia. (2020). *Single-use Plastics Legislation Explained*.

<https://www.replacethewaste.sa.gov.au/legislation-explained>

Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2018). Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Science of The Total Environment*, 630(6223), 1394–1400.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.330>

Hernández, Fernández, & Baptista. (2014). *Metodología de la Investigación* (McGraw Hill, Ed.; 6a ed.).

Hernández, M. (2023). *Plásticos y regulaciones: ¿en qué va México?* | *Plastics Technology Mexico*.

<https://www.pt-mexico.com/articulos/plasticos-y-regulaciones-en-que-va-mexico>

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M.,

Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–

147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

ICIPC, & GIZ. (2024). *Catálogo de laboratorios y ensayos para Envases y Empaque de Colombia*.

ICLG. (2025). *Rwanda passes levy law on plastic imports* | ICLG. <https://iclg.com/news/22562-rwanda-passes-levy-law-on-plastic-imports>

Imarc. (2026). *Polybutylene Succinate Prices, Trend Chart, Index and Forecast*.

<https://www.imarcgroup.com/polybutylene-succinate-pricing-report>

ISO. (s/f). *ISO*. Recuperado el 21 de febrero de 2026, de <https://www.iso.org/es/home>

ISO. (2021). *ISO 17088:2021 - Plásticos — Reciclaje orgánico — Especificaciones para plásticos compostables*. <https://www.iso.org/standard/74994.html>

Iyer-Raniga, U. (2019). Using the ReSOLVE framework for circularity in the building and construction industry in emerging markets. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 294(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/294/1/012002>

Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *Science of The Total Environment*, 769(2), 144483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>

Jiang, X., & Bateer, B. (2025). A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation. *Waste Management and Research*, 43(8), 1159–1178. <https://doi.org/10.1177/0734242X241310658>

Kalauni, K., Vedrtam, A., Sharma, S. P., Sharma, A., & Chaturvedi, S. (2025). A comprehensive review of recycling and reusing methods for plastic waste focusing Indian scenario. *Waste Management & Research*, 43(9), 1378. <https://doi.org/10.1177/0734242X241308499>

Khan, T. (2024, julio 18). *Bio-based Polyethylene: A Sustainable Solution for Plastic Waste*. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=23836>

Koch, D., & Mihalyi, B. (2018). Assessing the Change in Environmental Impact Categories when Replacing Conventional Plastic with Bioplastic in Chosen Application Fields. *Chemical Engineering Transactions*, 70.

Larasati, K., Frimawaty, E., & Chairani, E. (2024). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PLASTIC PACKAGING PRODUCTION. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 7(1), 460–479. <https://doi.org/10.7454/jessd.v7i1.1220>

Laws Africa. (2019). *Law relating to the Prohibition of Manufacturing, Importation, Use and Sale of Plastic Carry Bags and Single-use Plastic Items – Laws.Africa*. <https://commons.laws.africa/akn/rw/act/law/2019/17/eng@2019-09-23?ts=2024-02-21T15:55:49.801240+00:00>

- Leal Filho, W., Barbir, J., Carpio-Vallejo, E., Dobri, A., & Voronova, V. (2025). Decarbonising the plastic industry: A review of carbon emissions in the lifecycle of plastics production. *Science of the Total Environment*, 999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180337>
- Lee, S., Lee, I., Seo, D., Kim, H., Joo, G., Lee, S., & Park, K. (2023). Life Cycle Assessment of aPHA Production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(1), 72–84. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.3C04788>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2022.107199>
- Leyton, A. M., Ochoa, L., Ospina, L., & Soriano, S. (2024). *Influencia de la implementación de la ley 2232 de 2022 en las dinámicas económicas y operativas del sector plástico en Colombia*.
- Library of Congress. (2017). *Kenya: Notice Outlawing Plastic Bags Issued* | Library of Congress. <https://www.loc.gov/item/global-legal-monitor/2017-03-31/kenya-notice-outlawing-plastic-bags-issued/>
- Library of Congress. (2020). *France: New Anti-waste Law Adopted*. Library of Congress, Washington, D.C. 20540 USA. <https://www.loc.gov/item/global-legal-monitor/2020-03-20/france-new-anti-waste-law-adopted/>
- Liu, C., & Liu, C. (2023). Exploring Plastic-Management Policy in China: Status, Challenges and Policy Insights. *Sustainability (Switzerland)*, 15(11), 9087. <https://doi.org/10.3390/su15119087>
- Lüneburg, S., Wüstenhagen, S., & Hirsch, P. (2025). Evaluation of the Environmental Impact from Production of Partially Bio-Based Polybutylene Succinate Compared to Conventional Commodity Plastics. *Macromolecular Symposia*, 414(5). <https://doi.org/10.1002/masy.70123>
- Luo, C., Zhou, Y., Chen, Z., Bian, X., Chen, N., Li, J., Wu, Y., & Yang, Z. (2024). Comparative life cycle assessment of PBAT from fossil-based and second-generation generation bio-based feedstocks. *Science of the Total Environment*, 954. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176421>
- Maldonado, C. (2025). *A siete años de su publicación: Luces y sombras de la Ley 21.100 que prohibió las bolsas plásticas de comercio - País Circular*. <https://www.paiscircular.cl/medio-ambiente/a-siete->

anos-de-su-publicacion-luces-y-sombras-de-la-ley-21-100-que-prohibio-las-bolsas-plasticas-de-comercio/

Manrique, R. (2020). MICROPLASTICS: THE HUGE PROBLEM OF TINY PLASTIC PARTICLES.

Revista de Química PUCP, 34, 8–14. <http://revistas.pucp.edu.pe/quimica>

McClements, D. (2022, diciembre 3). *HDPE vs. PET: Material Differences and Comparisons / Xometry*.

<https://www.xometry.com/resources/materials/hdpe-vs-pet/>

Mena, P., Vaca, K., & Mena, J. (2025). Bioplásticos y su impacto ambiental: producción a partir de

fuentes renovables y comparación con plásticos convencionales. *Ciencia Latina Revista Científica*

Multidisciplinar, 9(1), 10318–10334. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16641

Méndez, V. (2023). Impuestos verdes en Colombia y la ley de inversión social. Una reflexión sobre la

efectividad de las políticas ambientales. *Revista Colombiana de Contabilidad*, 1–20.

<https://doi.org/10.56241/asf.v11n21.269>

Mhaddolkar, N., Astrup, T. F., Tischberger-Aldrian, A., Pomberger, R., & Vollprecht, D. (2025).

Challenges and opportunities in managing biodegradable plastic waste: A review. *Waste*

Management and Research, 43(6), 911–934. <https://doi.org/10.1177/0734242X241279902>

Miedzinski, M., McDowall, W., Fahnestock, J., Rataj, O., & Papachristos, G. (2022). Paving the pathways

towards sustainable future? A critical assessment of STI policy roadmaps as policy instruments for

sustainability transitions. *Futures*, 142(2), 103015. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103015>

Minam. (2019a). *Decreto Supremo N.º 006-2019-MINAM - Normas y documentos legales - Ministerio del*

Ambiente - Plataforma del Estado Peruano. [https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-](https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/290809-006-2019-minam)

[legales/290809-006-2019-minam](https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/290809-006-2019-minam)

Minam. (2019b). *Ley N° 30884 regula consumo de bienes de plástico de un solo uso que generan riesgo*

para la salud pública y/o el ambiente | SINIA. [https://sinia.minam.gob.pe/novedades/ley-ndeg-](https://sinia.minam.gob.pe/novedades/ley-ndeg-30884-regula-consumo-bienes-plastico-un-solo-uso-que-generan)

[30884-regula-consumo-bienes-plastico-un-solo-uso-que-generan](https://sinia.minam.gob.pe/novedades/ley-ndeg-30884-regula-consumo-bienes-plastico-un-solo-uso-que-generan)

Minam. (2025). *Minam: alrededor de 500 millones de bolsas plásticas se dejaron de usar en Perú -*

Noticias - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano.

[https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1202810-minam-alrededor-de-500-millones-de-](https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1202810-minam-alrededor-de-500-millones-de-bolsas-plasticas-se-dejaron-de-usar-en-peru)

[bolsas-plasticas-se-dejaron-de-usar-en-peru](https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1202810-minam-alrededor-de-500-millones-de-bolsas-plasticas-se-dejaron-de-usar-en-peru)

Ministerio de Salud y Protección Social. (2024). 591 de 2024. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/R
esoluci%C3%B3n%20No%20591%20de%202024.pdf

Miu, D. M., Eremia, M. C., & Moscovici, M. (2022). Polyhydroxyalkanoates (PHAs) as Biomaterials in
Tissue Engineering: Production, Isolation, Characterization. *Materials (Basel, Switzerland)*, 15(4).
<https://doi.org/10.3390/ma15041410>

MMA. (2026). *Plásticos - Economía Circular*. <https://economiacircular.mma.gob.cl/plasticos/>

Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial. Por
un plan de rescate para las personas y el planeta*.

Naser, A. Z., Deiab, I., Defersha, F., & Yang, S. (2021). Expanding Poly(lactic acid) (PLA) and
Polyhydroxyalkanoates (PHAs) Applications: A Review on Modifications and Effects. *Polymers*,
13(23). <https://doi.org/10.3390/polym13234271>

NEMA. (2026). *Plastic Bags - National Environment Management Authority (NEMA)*.
<https://nema.go.ke/ban-on-plastic-carrier-bags/>

Nielsen, T. D., Holmberg, K., & Strippel, J. (2019). Need a bag? A review of public policies on plastic
carrier bags – Where, how and to what effect? *Waste Management*, 87, 428–440.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.025>

Nøklebye, E., Adam, H. N., Roy-Basu, A., Bharat, G. K., & Steindal, E. H. (2023). Plastic bans in India –
Addressing the socio-economic and environmental complexities. *Environmental Science and Policy*,
139, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.11.005>

Nomadolo, N., Mtibe, A., Ofosu, O., Mekoa, C., Letwaba, J., & Muniyasamy, S. (2024). The Effect of
Mechanical Recycling on the Thermal, Mechanical, and Chemical Properties of Poly (Butylene
Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly (Butylene Succinate) (PBS), Poly (Lactic Acid) (PLA),
PBAT-PBS Blend and PBAT-TPS Biocomposite. *Journal of Polymers and the Environment* 2024
32:6, 32(6), 2644–2659. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03151-y>

NPAP. (2025). *Alternativas a los plásticos convencionales*.

OECD. (2022a). Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options.
Global Plastics Outlook. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>

OECD. (2022b). *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>

Ogut, M. O., Akor, J., Mulindwa, M. S., Heshima, O., & Nsengimana, C. (2023). Implementing circular economy and sustainability policies in Rwanda: Experiences of Rwandan manufacturers with the plastic ban policy. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1092107.

<https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1092107>

Oladele, I. O., Okoro, C. J., Taiwo, A. S., Onuh, L. N., Agbeboh, N. I., Balogun, O. P., Olubambi, P. A., & Lephuthing, S. S. (2023). Modern Trends in Recycling Waste Thermoplastics and Their Prospective Applications: A Review. *Journal of Composites Science* 2023, Vol. 7, 7(5).

<https://doi.org/10.3390/jcs7050198>

Olguin, J. Q. (2025). Clasificación del nivel de madurez (TRL) de la tecnología Heliocaminus para el secado solar de madera. *South Florida Journal of Development*, 6(12), e6051.

<https://doi.org/10.46932/sfjdv6n12-023>

Operato, L., Panzeri, A., Masoero, G., Gallo, A., Gomes, L., & Hamd, W. (2025). Food packaging use and post-consumer plastic waste management: a comprehensive review. *Frontiers in Food Science and Technology*, 5, 1520532. <https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1520532>

Ortiz, A. A., Sucozhañay, D., Vanegas, P., & Martínez-Moscoso, A. (2020). A Regional Response to a Global Problem: Single Use Plastics Regulation in the Countries of the Pacific Alliance. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 8093, 12(19), 8093. <https://doi.org/10.3390/su12198093>

Parker, L. (2024). *Por qué la contaminación por plásticos se convirtió en una crisis mundial*.

<https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2024/04/por-que-la-contaminacion-por-plasticos-se-convirtio-en-una-crisis-mundial>

Peng, Y., Wu, P., Schartup, A. T., & Zhang, Y. (2021). Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(47), e2111530118.

<https://doi.org/10.1073/PNAS.2111530118>;WEBSITE:WEBSITE:PNAS-

SITE;WGROU:STRING:PUBLICATION

Pérez, R. I., & Vargas, H. A. (2016). El uso del método MICMAC, para la definición de procesos de intervención en las organizaciones. *Ciencia y Poder Aéreo*, 11(1).

<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.156>

Phaal, R. (2004). Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution.

Technological Forecasting and Social Change, 71(1–2), 5–26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6)

Pilapitiya, N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. En *Cleaner Materials* (Vol. 11). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>

Pinlova, B., Sudheshwar, A., Vogel, K., Malinverno, N., Hischier, R., & Som, C. (2024). What can we learn about the climate change impacts of polylactic acid from a review and meta-analysis of lifecycle assessment studies? En *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 48, pp. 396–406). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.021>

Plastics Europe. (2022). *Plastics - the Facts 2022*. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/03/PE-PLASTICS-THE-FACTS_FINAL_DIGITAL-5.pdf

Plastics Europe. (2025). *Plastics the Fast Facts 2025*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2025/>

PNUMA. (2018). *Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability (rev. 2)*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/25496>

PNUMA. (2021a). *Los microplásticos también están contaminando nuestros suelos*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/los-microplasticos-tambien-estan-contaminando-nuestros-suelos>

PNUMA. (2021b, octubre 21). *De la contaminación a la solución: una evaluación global de la basura marina y la contaminación plástica*. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

PNUMA. (2023, mayo 16). *Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy*. <https://www.unep.org/resources/turning-off-tap-end-plastic-pollution-create-circular-economy>

Pollutec Learn & Connect. (2024). *AGEC Act - What will change in the fight against waste in 2024?* -

Pollutec Learn & Connect. <https://learnandconnect.pollutec.com/en/agec-act-what-will-change-in-the-fight-against-waste-in-2024/>

Quiceno, S., Urrego, W., Carlos, J. C., & Valencia, A. (2023). *Revisión de modelos de gestión tecnológica e innovación orientados a la construcción de una metodología para el desarrollo de biomateriales biodegradables.* <https://orcid.org/0000-0002-8526-4544>

Rajendran, N., & Han, J. (2023). Techno-economic analysis and life cycle assessment of poly (butylene succinate) production using food waste. *Waste Management*, 156, 168–176.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.037>

Rangel, N., & Gracia, A. (2024). Colombia acts to combat plastic pollution. *Journal of Bio-X Research*, 386(6720), 389. <https://doi.org/10.1126/science.adr5243>

Rashid, S., Majeed, L. R., Mehta, N., Radu, T., Martín-Fabiani, I., & Bhat, M. A. (2025). Microplastics in terrestrial ecosystems: sources, transport, fate, mitigation, and remediation strategies. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 2025 10:4, 10(4), 2633–2659.
<https://doi.org/10.1007/s41207-025-00766-6>

Reyes Jaime, A., Aguilar Ibarra, A., Anglés Hernández, M., & Güereca Hernández, L. P. (2024). Legislaciones estatales para los plásticos de un sólo uso en México: ¿Qué sectores están incluidos? *Revista internacional de contaminación ambiental*, 40, 105–117.
<https://doi.org/10.20937/RICA.54930>

Rikhter, P., Dinc, I., Zhang, Y., Jiang, T., Miyashiro, B., Walsh, S., Wang, R., Dinh, Y., & Suh, S. (2022). *Life Cycle Environmental Impacts of Plastics: A Review.* <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.22-032>

Ríos, M., Márquez, F., Gatti, M., Galván, D., Bravo, G., Bigatti, G., & Brogger, M. (2020). Microplásticos: Macroproblemas. *Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - ANCEFN*, 16, 8–22.

Rodríguez, L., Romero, F., & González, M. (2025). Analyzing Government Plans for the Plastic Value Chain in the Latin American Circular Economy. *Circular Economy and Sustainability* 2025 5:5, 5(5), 4447–4468. <https://doi.org/10.1007/s43615-025-00558-8>

Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews. Materials*, 7(2), 117. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>

Rossel, A., & Saul, M. (2023). *Normalización de plásticos*.

<https://es.scribd.com/document/730961934/INFORME-GRADO-DE-POLIMERIZACION-1>

Ruíz-Santoyo, V., Cruz-Mérida, J. A., García Carvajal, S., & Arenas Arroccena, M. C. (2025).

Microplásticos y nanoplásticos: una amenaza para la salud humana y el medio ambiente. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 18(34), e69832.

<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69832>

Sales plastic. (2026). *High-Performance Thermoplastic Starch (TPS): Food Packaging*.

<https://salesplastics.com/thermoplastic-starch-food-packaging/>

SEDEMA. (2026). *Bienvenidos a datos maestros - SEDEMA*.

<https://proyectos.sedema.cdmx.gob.mx/datos/>

Sehgal, R., & Gupta, R. (2020). Polyhydroxyalkanoate and its efficient production: an eco-friendly

approach towards development. *3 Biotech*, 10(12), 549. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02550-5>

Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2012). Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based

PET, recycled PET, PLA, and man-made cellulose. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(6), 625–639. <https://doi.org/10.1002/bbb.1368>

Silva, R. R. A., Marques, C. S., Arruda, T. R., Teixeira, S. C., & de Oliveira, T. V. (2023). Biodegradation

of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. *Macromol 2023, Vol. 3, Pages 371-399*, 3(2), 371–399. <https://doi.org/10.3390/macromol3020023>

Singh, A., Chauhan, A., & Gaur, R. (2025). A comprehensive review on the synthesis, properties,

environmental impacts, and chemiluminescence applications of polystyrene (PS). *Discover Chemistry 2025 2:1*, 2(1), 47-. <https://doi.org/10.1007/s44371-025-00125-y>

Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (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*, 12(8).

<https://doi.org/10.3390/polym12081641>

- Stanley, J., Culliton, D., Jovani-Sancho, A. J., & Neves, A. C. (2025, enero 15). The Journey of Plastics: Historical Development, Environmental Challenges, and the Emergence of Bioplastics for Single-Use Products. *Eng*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/eng6010017>
- SUIN Juriscol. (s/f). *Sistema Único de Información Normativa*. Recuperado el 9 de marzo de 2026, de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1635523>
- Superservicios. (2025). *Informe sectorial de la actividad de Aprovechamiento Elaborado por: Profesionales Grupo de Estudios Sectoriales de Acueducto*.
- Surendren, A., Mohanty, A. K., Liu, Q., & Misra, M. (2022). A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. *Green Chemistry*, 24(22), 8606–8636. <https://doi.org/10.1039/d2gc02169b>
- Tacker, M., Hafner-Kuhn, T., Gstöhl, A., Nduagu, E., Vozzola, E., Roux, T. W., & Auras, R. (2025). Life cycle assessment of polyethylene packaging and alternatives on the European market. *Cleaner Environmental Systems*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100270>
- Tang, K. H. D. (2025). An Overview of Circular Economy Approaches for Plastics. *Recent Progress in Materials 2025, Vol. 7, 011*, 7(3), 1–22. <https://doi.org/10.21926/rpm.2503011>
- TOMRA. (2024). *Norway's deposit return scheme is world's recycling role model | TOMRA*. <https://www.tomra.com/reverse-vending/media-center/feature-articles/norway-deposit-return-scheme>
- Torres-Agullo, A., Karanasiou, A., Moreno, T., & Lacorte, S. (2021). Overview on the occurrence of microplastics in air and implications from the use of face masks during the COVID-19 pandemic. *En Science of the Total Environment* (Vol. 800). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149555>
- Ukhi. (2025). *PHA Market Report 2025–2030 | Size, Growth, Trends & Forecast*. <https://ukhi.com/pha-market-report-2025-2030/>
- UNDP. (2023). *Umuganda: Rwanda's audacity of hope to end plastic pollution | United Nations Development Programme*. <https://www.undp.org/blog/umuganda-rwandas-audacity-hope-end-plastic-pollution>

UNEP, & ISWA. (2024). Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an Age of Waste – Turning

Rubbish into a Resource. *Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste:*

Turning rubbish into a resource, 0–116. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>

Unión Europea. (2019, junio 5). *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.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019L0904>

Velásquez, S. T. R., Hu, Q., Kramm, J., Santin, V. C., Völker, C., & Wurm, F. R. (2025). Plastics of the

Future? An Interdisciplinary Review on Biobased and Biodegradable Polymers: Progress in

Chemistry, Societal Views, and Environmental Implications. *Angewandte Chemie - International*

Edition, 64(23), e202423406. <https://doi.org/10.1002/anie.202423406>

Waiganjo, C. (2020). *Implementation and Enforcement of the Single-Use Plastic Ban in Kenya | Wilson*

Center. [https://www.wilsoncenter.org/blog-post/implementation-and-enforcement-of-the-single-use-](https://www.wilsoncenter.org/blog-post/implementation-and-enforcement-of-the-single-use-plastic-ban-in-kenya)

[plastic-ban-in-kenya](https://www.wilsoncenter.org/blog-post/implementation-and-enforcement-of-the-single-use-plastic-ban-in-kenya)

Walter Pack. (2023, abril 1). *6 tipos de plásticos y sus características*. [https://www.walterpack.com/6-](https://www.walterpack.com/6-tipos-de-plasticos-y-sus-caracteristicas/)

[tipos-de-plasticos-y-sus-caracteristicas/](https://www.walterpack.com/6-tipos-de-plasticos-y-sus-caracteristicas/)

Walter Pack. (2025, enero 10). *¿Cuáles son los 7 tipos de plásticos?* [https://www.walterpack.com/cuales-](https://www.walterpack.com/cuales-son-los-7-tipos-de-plasticos/)

[son-los-7-tipos-de-plasticos/](https://www.walterpack.com/cuales-son-los-7-tipos-de-plasticos/).

Wang, Q., Tweedy, A., & Wang, H. G. (2022). Reducing plastic waste through legislative interventions in

the United States: Development, obstacles, potentials, and challenges. *Sustainable Horizons*, 2.

<https://doi.org/10.1016/j.horiz.2022.100013>

Westmark, J. (2026). *Oslofjord plastic pollution is falling, but the job is not done - NordiskPost*.

<https://www.nordiskpost.com/2026/02/12/norway-oslofjord-plastic-pollution-falling/>

Wojnarowska, M., Rychwalski, M., & Witko, T. (2025). *Environmental Life Cycle Assessment of Poly(3-*

hydroxybutyrate) (PHB): A Comparative Study with Petrochemical and Bio-Based Polymers.

<https://doi.org/10.3390/resources>

World Resources Institute. (2022). *Implementing the Plastic Resource Circulation Act*.

<https://action.oceanpanel.org/initiative/japan/enforcement-of-the-plastic-resource-circulation-act/>

Zambrano-Pinto, M. V., Tinizaray-Castillo, R., Riera, M. A., Maddela, N. R., Luque, R., & Díaz, J. M. R.

(2024). Microplastics as vectors of other contaminants: Analytical determination techniques and remediation methods. *Science of The Total Environment*, 908, 168244.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168244>