

CIRCULARIDAD DE PLÁSTICO: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DESDE PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y ECONOMÍA CIRCULAR

PLASTIC CIRCULARITY: LITERATURE REVIEW FROM THE PERSPECTIVE OF LIFE CYCLE ANALYSIS AND CIRCULAR ECONOMY

Zapata Martínez, María Agustina¹
Civit, Bárbara M.²
Arena, Pablo³

Zapata Martínez, M. A., Civit, B. M. y Arena, P. (2023). Circularidad de plástico: revisión bibliográfica desde perspectiva de análisis de ciclo de vida y economía circular. *Revista INNOVA, Revista argentina de Ciencia y Tecnología*, 12.

RESUMEN

La importancia de los plásticos en la vida diaria moderna es indiscutible. Debido a sus ventajas y versatilidad, están presentes en todas las áreas del desarrollo humano. Sin embargo, el aumento en su producción y la disposición irresponsable de los plásticos usados ha llevado a la acumulación de residuos, generando impactos negativos en el medio ambiente y el desperdicio de recursos valiosos. En el presente artículo se revisa información sobre la problemática, analizando investigaciones sobre disposición final de residuos plásticos, circularidad de los mismos a través de distintos indicadores basados en balances de masa y Análisis de Ciclo de Vida como metodología para evaluar impactos.

¹ Grupo CLIOPE, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional -Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET-CCT, Argentina/ azapata@mendoza-conicet.gob.ar / ORCID 0009-0007-8530-8627

² Grupo CLIOPE, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional -Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET-CCT, Argentina/ bcivit@frm.utn.edu.ar /ORCID 0000-0002-2895-6747

³ Grupo CLIOPE, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional -Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET-CCT, Argentina/ aparena@frm.utn.edu.ar /ORCID 0000-0002-1073-8039

ABSTRACT

The importance of plastics in modern daily life is indisputable. Due to their advantages and versatility, they are present in all areas of human development. However, the increase in their production and irresponsible disposal of used plastics has led to waste accumulation, producing negative impacts on the environment and the wastage of valuable resources. This article reviews information on the problem, analyzing research on the final disposal of plastic waste, its circularity through different indicators based on mass balances and Life Cycle Analysis as a methodology to evaluate impacts.

PALABRAS CLAVE

plástico / plástico de un solo uso / análisis de ciclo de vida (ACV) / circularidad / economía circular

KEY WORDS

plastic / plastic one use / Life Cycle Assessment (LCA) / circularity / circular economy

Introducción

1. Introducción

Los plásticos son una de las innovaciones industriales del mundo moderno que forman parte de la vida cotidiana, con aplicaciones en muchos sectores como el embalaje, equipos eléctricos y electrónicos (EEE), construcción y muebles, agricultura, atención médica, industria textil y automotriz, entre otros. Debido a su naturaleza liviana, duradera, versátil y fácil de procesar, la producción de plásticos ha aumentado en los últimos 50 años, alcanzando aproximadamente 322 millones de toneladas en 2015, con una proyección de duplicar esta cantidad para 2035 (Hahladakis et al., 2020). Sin embargo, esto también significa que aproximadamente el 78% termina como residuos plásticos que se depositan en vertederos u otros lugares en el medio ambiente, lo que plantea graves amenazas para los ecosistemas y la salud humana (Geyer et al., 2017). Los plásticos pueden tardar mucho tiempo en degradarse, causando problemas potenciales para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Boucher, 2017), y cuando se degradan, se descomponen en pequeñas partículas llamadas microplásticos, que no son visibles y pueden tener consecuencias al causar efectos perjudiciales para la salud humana y otras especies a través de la bioacumulación y la exposición crónica. En otras palabras, los residuos plásticos se consideran un grave problema de gestión de residuos sólidos que está en la cima de la agenda política global (Hahladakis et al., 2020).

En Argentina, se estima que el consumo per cápita de plástico es de 40,8 kg al año. En 2021, se calculó que el consumo aparente de plástico fue de 1.697.342 toneladas, y se reciclaron 307.000 toneladas, lo que representa un porcentaje de plástico reciclado del 18,08% (CAIP, Ecoplas, 2021).

La producción y el consumo de plásticos en la región de América Latina han experimentado un crecimiento significativo en las últimas cuatro décadas. En 1980, el consumo per cápita en la región era de 7 kg por habitante por año. En la actualidad, el consumo promedio supera los 30 kg por habitante por año. En México y Chile, los dos países con el mayor consumo per cápita, se consume más de 50 kg por habitante por año, seguidos de Argentina y Brasil, con valores cercanos a 40 kg por habitante por año (Bianco et al., 2021).

Por lo tanto, existe una necesidad urgente de encontrar sistemas de producción y consumo que permitan gestionar los materiales desde la etapa de diseño hasta el final de su vida útil, y la idea de circularidad en la producción para cambiar la economía actual lineal hacia una economía circular está ganando cada vez más impulso. La idea de circularidad de los plásticos de un solo uso requiere precaución y un método armonizado para evaluar si una estrategia específica contribuye efectivamente a lograr un consumo y una producción sostenibles (Peña et al., 2021). Las acciones deben ir acompañadas de un proceso de evaluación utilizando indicadores que permitan determinar la idoneidad de las propuestas para lograr la circularidad de los sistemas de

producción y consumo de plásticos, valorando las materias primas, los residuos y las decisiones de los usuarios.

2. Objetivos

En este trabajo se presenta el resultado de una revisión bibliográfica de los artículos relacionados con la circularidad de los plásticos en diversos sistemas y con diferentes enfoques metodológicos a nivel local y global. El objetivo de esta revisión es ofrecer una visión general de las principales publicaciones, avances y desafíos en este tema en los últimos años, con el propósito de comprender el estado actual del conocimiento y señalar las áreas que requieren una mayor investigación en esta temática.

3. Metodología

La revisión de la literatura se llevó a cabo mediante la exploración de diversos trabajos académicos utilizando dos motores de búsqueda y bases de datos ampliamente reconocidos: *Google Scholar* y *Scopus*. Estas herramientas recopilan artículos y publicaciones de diversas revistas científicas de renombre.

La revisión tuvo como objetivo identificar un conjunto de artículos pertinentes y representativos en el ámbito del estudio y el estado actual del tema en cuestión. Para lograr esto, se empleó una estrategia de búsqueda basada en palabras clave, que incluyó los siguientes términos "plástico" o "plástico de un solo uso", "circularidad" y "ACV" (siglas en inglés de Análisis del Ciclo de Vida). El período de estudio se restringió a artículos publicados entre 2018 y 2022, aunque se consideraron algunos artículos fuera de este período si resultaban pertinentes.

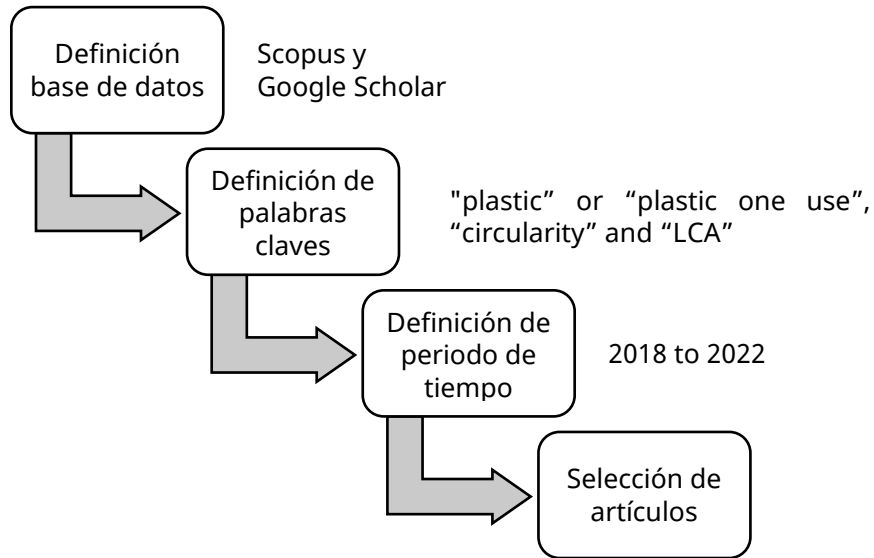
Se dio preferencia a los artículos escritos en inglés, debido a su predominancia en la cantidad de publicaciones en este campo. Además, se aplicó un filtro de "tipo de artículo" para incluir únicamente "artículos", "revisiones de literatura" y "artículos en prensa". Asimismo, se llevó a cabo una clasificación de los artículos según el número de citas que habían recibido.

Posteriormente, se procedió a la tabulación y análisis de las publicaciones, teniendo en cuenta una serie de criterios clave, que incluyen la región de estudio, el año de publicación, la revista de origen, la metodología utilizada para abordar la circularidad, la aplicación de la metodología de Evaluación del Ciclo de Vida (ACV), así como los métodos y bases de datos empleados en aquellos estudios que se valieron de esta metodología. Asimismo, en el caso de los plásticos de un solo uso, se consideró el tipo específico de plástico de un solo uso. Un aspecto de suma importancia que se evaluó fue el desarrollo o uso de indicadores específicos relacionados con la circularidad de los plásticos, los cuales desempeñaron un papel fundamental en nuestro análisis.

Para llevar a cabo este proceso de análisis, se utilizó la herramienta gráfica Excel (2013), lo que permitió realizar una evaluación sistemática de la literatura seleccionada.

En el gráfico 1 se presenta el diagrama de la metodología aplicada en la revisión bibliográfica.

Gráfico 1: Diagrama de metodología de revisión de literatura.



Fuente: elaboración propia

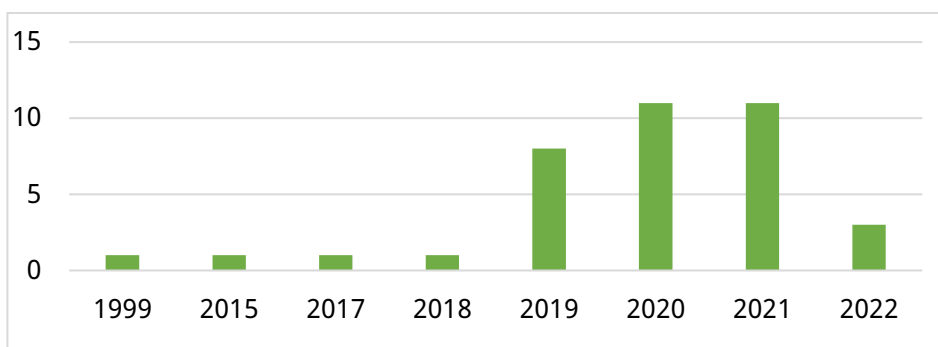
4. Resultados

Siguiendo la metodología explicada, se encontraron 567 artículos, de los cuales se seleccionaron 20 artículos de la base de datos de *Scopus* y 17 artículos de la base de datos de *Google Scholar*.

4.1 Análisis de la Distribución de Publicaciones por Región y Año

Con el fin de analizar la evolución de la investigación sobre el tema, así como para conocer la información más actualizada, se analizaron las publicaciones por año en el período de tiempo seleccionado. El análisis se presentan en gráfico 2.

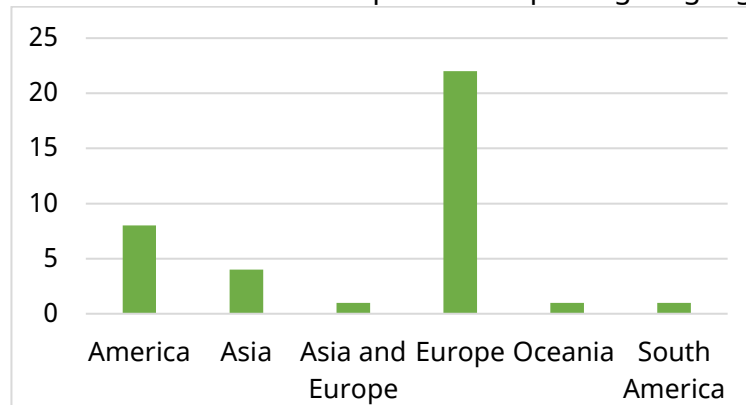
Gráfico 2: Cantidad de artículos publicados por año.



Fuente: elaboración propia.

La ubicación geográfica es un punto clave en la metodología de análisis del ciclo de vida y en los estudios de circularidad de materiales, debido a la influencia de las características culturales y tecnológicas de cada región. Es por ello que es importante analizar la región geográfica de origen de los artículos y de los casos de estudios presentados. Los artículos seleccionados provienen de los siguientes países, como se muestra en el gráfico 3:

Gráfico 3: Cantidad de artículos publicados por región geográfica.



Fuente: elaboración propia

4.2 Metodologías utilizadas para abordar el tema.

Analizar la circularidad de un sistema ya sea desde el punto de vista de producto o material con perspectiva de sostenibilidad, es bastante complejo. Es una tarea que involucra una gran cantidad de variables cuyas relaciones entre sí no son fáciles de establecer. Esto se vuelve aún más complicado cuando el estudio de caso es un producto con una vida útil muy corta en el que la principal estrategia de Economía Circular es el reciclaje que implica tener más de un ciclo de vida, como es el caso de plásticos de un solo uso. Surgen preguntas, como: ¿Cuáles son los límites del sistema? ¿Qué variables describen mejor la circularidad de un material? ¿Qué variables son claves en la circularidad de un producto específico? ¿Cómo se evalúan los impactos ambientales generados? ¿Cómo se puede medir de manera objetiva y completa la circularidad y sus supuestos beneficios? ¿Qué categorías de impacto son las más representativas e importantes para analizar?

Para intentar responder a estas preguntas, en la revisión de la literatura se analizaron las metodologías actualmente utilizadas para abordar el tema y los casos de aplicación de cada una. Los 37 artículos seleccionados se clasificaron en las siguientes metodologías o enfoques del tema:

- Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) de procesos de reciclaje: artículos que aplican ACV en métodos de reciclaje de plástico y analizan los impactos ambientales asociados a estos procesos.

- Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) de productos: artículos que aplican ACV en productos de plástico, donde se tiene en cuenta su aspecto funcional y posible sustitución de otros materiales.
- Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) de productos vs. percepción del consumidor: artículos que aplican ACV en productos de plástico y comparan los resultados con la percepción del consumidor sobre los productos de plástico.
- Teoría de la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV): artículos que desarrollan el aspecto teórico de la metodología de ACV.
- Análisis de Flujo de Materiales (MFA): artículos que aplican MFA a sistemas de materiales plásticos.
- Percepción del consumidor: artículos que desarrollan la percepción del consumidor sobre productos de plástico.
- Métodos de reciclaje: artículos que desarrollan y abordan con metodologías distintas a ACV los métodos de reciclaje de plástico.
- Bioplásticos: artículos que se centran en el tema de los bioplásticos.
- Teoría de la Economía Circular (EC): artículos que desarrollan los conceptos teóricos de la economía circular en cuestiones relacionadas con el plástico.
- Indicadores de la Economía Circular (EC): artículos que aplican y/o desarrollan indicadores para evaluar estrategias de economía circular en sistemas de plástico.

Según esta clasificación, los resultados se presentan en la tabla 1:

Tabla 1. Cantidad de artículos publicados por metodología utilizada.

Tema	Cantidad de artículos
Teoría de EC	4
Indicadores de CE	6
ACV de procesos de reciclaje	4
ACV de productos	7
ACV productos vs percepción de consumidores	1
ACV teoría	2
MFA	4
Percepción de consumidores	1

Métodos de reciclaje	4
Bioplásticos	4
Total general	37

Fuente: elaboración propia

Aunque el ACV no es una metodología nueva, ya que se desarrolló en la década de 1960, ha evolucionado introduciendo nuevas categorías de impacto y nuevos métodos para la evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA). Dentro de los artículos que aplican el ACV a productos de plástico, se encontraron artículos que proponen nuevas categorías de impacto para casos específicos de plásticos. Tal es el caso del estudio realizado por Stefanini y otros (2021), en donde se propone agregar como nueva categoría de impacto en el análisis de ciclo de vida el indicador de residuos marinos (MLI por sus siglas en inglés, *Marine Litter Indicator*). Este indicador se ha propuesto para evaluar el potencial de contaminación de los productos de plástico dispersos en el mar Mediterráneo. Los autores analizaron la evaluación ambiental de botellas de Tereftalato de Polietileno (PET), PET Reciclado (R-PET), vidrio y vidrio retornable, utilizadas para envasar 1 litro de leche pasteurizada.

Los resultados y la discusión presentada en este artículo utilizando ACV, muestra que la botella de R-PET es la que menos contribuye al calentamiento global, la degradación de la capa de ozono estratosférico, la acidificación terrestre, la escasez de recursos fósiles, el consumo de agua y la toxicidad carcinogénica (categoría de impacto de ACV) para los seres humanos. Seguida por la botella de PET, la botella de vidrio retornable y, finalmente, la botella de vidrio no retornable. El vidrio es la peor opción de envasado debido a la alta demanda de energía en la producción de las botellas y su peso durante la fase de transporte. Se pueden lograr algunas mejoras con el vidrio retornable, pero incluso si se considera que una botella podría reutilizarse ocho veces, los resultados no son comparables a las botellas de PET o R-PET que se utilizan solo una vez. Sin embargo, según el MLI, las botellas de vidrio retornable se convierten en la primera opción, debido a que muchas botellas de plástico podrían potencialmente dispersarse en el mar (Stefanini et al., 2021).

También en esta línea, se encuentra un artículo de revisión interesante cuyo nombre puede traducirse como "Pérdidas y desperdicios de alimentos relacionados con el envasado: Una visión general de impulsores y problemas." ("Packaging-Related Food Losses and Waste: An Overview of Drivers and Issues") de Bernhard Wohner, Erik Pauer, Victoria Heinrich y Manfred Tacker (2019). Esta revisión ha identificado necesidades adicionales de investigación en la implementación de pérdidas y desperdicio de alimentos relacionados con el envasado (PFLW por sus siglas en inglés de *Packaging Food Loss Waste*) en estudios de ACV. Los autores proponen el cálculo de las tasas de equilibrio. Esto significa que los diseñadores de envases o los analistas de ACV podrían calcular cuándo un aumento en el envasado se justificaría a cambio de una menor pérdida y desperdicio de alimentos (Wohner et al., 2019).

En otros artículos se aplicó la metodología de ACV para comparar productos de plástico entre sí o con sustitutos de otros materiales con la misma unidad funcional, considerando el escenario actual de fin de vida. Otros autores compararon los impactos de diferentes tratamientos en la fase de fin de vida (EoL, por sus siglas en inglés) para un tipo de plástico. Dentro del primer grupo, se destaca el artículo en español "Una Evaluación Comparativa del Ciclo de Vida de Bandejas para Carne Hechas de Diversos Materiales de Envasado" ("*A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials*") de Maga Daniel y otros (2019). En este trabajo, como método de evaluación ambiental, se aplicó ACV siguiendo las normas ISO 14040/44 a nueve soluciones de envasado: bandejas a base de PS (poliestireno extruido y poliestireno extruido con estructura de cinco capas que contiene etileno y alcohol de vinilo), bandejas a base de PET (tereftalato de polietileno reciclado, con y sin capa de polietileno, y tereftalato de polietileno amorfo), polipropileno (PP) y ácido poliláctico (PLA). El alcance del estudio de ACV incluyó la producción de la bandeja y la etapa de fin de vida. Los resultados muestran que las bandejas a base de Poliestireno (PS), especialmente las soluciones de un solo material hechas de poliestireno extruido (XPS), muestran el impacto ambiental más bajo en las 12 categorías de impacto analizadas, excepto en la de agotamiento de recursos. Los productos multicapa muestran impactos ambientales más altos. El ACV también muestra que la etapa de fin de vida tiene una influencia importante en el desempeño ambiental de las bandejas. Sin embargo, la producción de las bandejas domina los resultados generales como fase con mayor impacto. Además, el análisis de sensibilidad ilustra que, incluso si en el futuro se lograran tasas de reciclaje más altas, las soluciones basadas en XPS seguirían siendo las mejores desde una perspectiva ambiental (Maga et al., 2019).

En lo que respecta a los artículos que se centran en analizar diferentes etapas de fin de vida, destaca el artículo en inglés "*Waste Polypropylene Plastic Recycling toward Climate Change Mitigation and Circular Economy: Energy, Environmental, and Technoeconomic Perspectives*" ("Reciclaje de Plástico de Polipropileno hacia la Mitigación del Cambio Climático y la Economía Circular: Perspectivas Energéticas, Ambientales y Tecnoeconómicas") de Bora, R. R., Wang, R. y You, F. (2020). En el cual se analiza el potencial del reciclaje químico para reducir los impactos ambientales de los residuos de plástico, mitigar el cambio climático y contribuir a la economía circular. Este estudio compara el rendimiento ambiental y económico de dos tecnologías, la pirólisis rápida y la gasificación, con los métodos convencionales de eliminación para tratar los residuos de PP. Se realizan simulaciones de procesos de alta fidelidad para cada tecnología a fin de obtener los datos necesarios de masa, energía y económicos para análisis posteriores. A través de una extensa evaluación del ciclo de vida utilizando los métodos IPCC 2013, ReCiPe y ILCD 2.0, se determina que la pirólisis rápida y la gasificación tienen menores emisiones totales de gases de efecto invernadero y un mejor rendimiento ambiental en general que los métodos convencionales de incineración y vertedero. Además, en el artículo se realiza un Análisis Tecno económico a través de una comparación del rendimiento económico mediante el cálculo de precios de equipos, costos de capital totales (CAPEX), inversión total del proyecto, costos operativos (OPEX), servicios públicos y generación de ingresos. Estos valores se combinan para calcular los valores netos presentes (NPV) resultantes al final de 20 años con una tasa de descuento

del 10%. Como resultado de este estudio se encuentra que los sistemas de reciclaje químico son considerablemente rentables para la pirólisis rápida y la gasificación, respectivamente. La tasa de descuento, el precio del PP de desecho y la vida útil de la planta son los factores más influyentes en el rendimiento económico de ambos sistemas (Bora et al., 2020).

Hsien H. Khoo y otros (2020), en su artículo en español "ACV del tratamiento de residuos plásticos al incluir las capacidades de las plantas en la comparación del sistema de ACV." ("*LCA of plastic waste treatment by including plant capacities in the LCA system comparison*,") estudian el ACV para investigar ocho escenarios de opciones de gestión de residuos de plástico. En una nación con escasez de tierra, también se tiene en cuenta la escala y el tamaño de cada método de reciclaje/recuperación de residuos de plástico. Los resultados demostraron cómo diferentes combinaciones de cuatro tecnologías de valorización de plásticos y las capacidades asociadas afectaron los posibles beneficios y desventajas ambientales de los sistemas de tratamiento de residuos de plástico. Para seleccionar la mejor opción entre los ocho escenarios, se llevó a cabo una normalización y ponderación (Khoo, 2019).

Para abordar el estudio de los flujos de materiales, una de las metodologías más apropiadas y ampliamente utilizadas es el MFA. Entre los artículos revisados en los que se utilizó esta herramienta, Graedel (2019) explica que el MFA es una de las metodologías centrales de la ecología industrial. Es a través del MFA que se puede mapear y cuantificar un "metabolismo industrial" (los flujos de recursos hacia y desde una entidad particular de la sociedad humana), de manera similar a cómo un contador determina y cuantifica los depósitos y retiros monetarios. Los MFAs dinámicos (aquellos que tratan una región o sistema específico a lo largo del tiempo) van más allá; permiten determinar los stocks en uso y "en hibernación" de materiales en una industria o sociedad (la versión de materiales del "activo y pasivo" del contador)

A nivel práctico, esta metodología se aplica principalmente en el análisis a nivel macro, como es el caso de los artículos "¿Qué tan circulares son los plásticos en la UE?: ACV de plásticos en la UE y rutas hacia la circularidad" ("*How circular are plastics in the EU?: MFA of plastics in the EU and pathways to circularity*". Hsu et al., 2021), "Análisis Dinámico del Flujo de Materiales de PET, PE y PP en Europa: Evaluación del Potencial para la Economía Circular" ("*Dynamic Material Flow Analysis of PET, PE, and PP Flows in Europe: Evaluation of the Potential for Circular Economy*". Eriksen et al., 2020) y "Plásticos en los Estados Unidos: hacia una caracterización del flujo de materiales de la producción, mercados y fin de vida" ("*Plastics in the US: toward a material flow characterization of production, markets and end of life*". Heller et al., 2020).

Otro punto de vista interesante es la percepción de los consumidores, ya que son actores fundamentales en la EC. En algunos artículos como el escrito por Testa et al. (2021) se aborda esta compleja perspectiva. En este artículo, los autores buscan explorar la conciencia de los consumidores sobre estas estrategias y su efecto durante el momento de la compra. Este estudio consiste en un experimento entre sujetos, donde se probaron cinco tipos de envases de plástico para productos de consumo (por ejemplo, jugo

embotellado en diferentes tipos de plástico) en una muestra representativa de la población italiana (1.236 individuos) mediante un muestreo aleatorio estratificado. La metodología propuesta en el artículo mencionado, cuenta con el diseño de un experimento de factores 2x2 (plásticos reciclados vs. plásticos compostables × certificación de terceros vs. sin certificación) con un grupo de control (plástico reciclable). Los datos se procesaron a través de Modelado Lineal Generalizado Bayesiano. La conclusión del estudio es que, a pesar de las suposiciones sobre el consumo sostenible de envases de plástico en el sector alimentario, los consumidores pueden estar confundidos y no pueden establecer las consecuencias en la economía circular en términos de cada tipo de envase de plástico. Independientemente de si se proporcionan certificaciones de terceros, las intenciones de compra de los consumidores se ven principalmente afectadas por la atractividad, la calidad percibida y la amigabilidad con el medio ambiente del envase. También se encontró que las preocupaciones sobre la contaminación y la disposición al cambio son relevantes en las elecciones de envases de productos de consumo masivo (Testa et al., 2021).

En el artículo cuyo título se puede traducir como "Sostenibilidad ambiental del envasado de alimentos líquidos: ¿Existe una brecha entre la percepción de los consumidores daneses y los aprendizajes de la evaluación del ciclo de vida?" ("*Environmental sustainability of liquid food packaging: Is there a gap between Danish consumers' perception and learnings from life cycle assessment?*") se investiga cómo los consumidores jóvenes bien educados que viven en Dinamarca comprenden la sostenibilidad ambiental de cinco tipos diferentes de envases para alimentos líquidos (leche, cerveza, refresco, aceite de oliva y tomates pelados) mediante una encuesta en línea y entrevistas cualitativas. Los resultados se comparan con un ACV simplificado que realizaron para el envasado de cerveza y refrescos, y se validan mediante ACVs comparativos de estas cinco categorías de productos publicados en la literatura científica. Los resultados de la investigación muestran que los consumidores evalúan principalmente la sostenibilidad ambiental de los tipos de envases probados en función del tipo de material y de lo que pueden hacer personalmente en la etapa de disposición final. En general, los consumidores incluidos en este estudio no consideran los impactos de la producción y el transporte. Estos hallazgos indican una brecha entre la percepción de los consumidores daneses sobre la sostenibilidad ambiental de los envases y los resultados del ACV, así como un conocimiento limitado de las etiquetas ecológicas relacionadas con la sostenibilidad. Para cerrar estas brechas, se requieren acciones por parte de los productores, los comercios minoristas y los responsables de las políticas. El objetivo final de estos esfuerzos de mejora debería ser proporcionar a los consumidores una mejor información que les permita tomar decisiones informadas (Boesen et al., 2019).

En cuanto a los artículos que abordan indicadores de EC, se destaca el trabajo de Rossi et al. cuyo objetivo es desarrollar un conjunto de indicadores que vinculen los principios de la EC, el Modelo de Negocio Circular y los pilares de la Sostenibilidad. El conjunto de indicadores se desarrolló en base al enfoque hipotético-deductivo, siguiendo una serie de iteraciones (ciclos) y probando la teoría en el mundo empírico. Se aplicó una combinación de métodos de investigación (por ejemplo, consulta a expertos, retroalimentación de usuarios y estudios de casos). La principal contribución de este

artículo es el desarrollo de un grupo de indicadores, centrados en las tres dimensiones de la Sostenibilidad (ambiental -desde una perspectiva material-, económica y social), aplicados en Modelos de Negocios Circulares para capturar las innovaciones que la EC aporta y que los indicadores convencionales no miden. Estos indicadores se aplicaron en tres empresas brasileñas que tienen tres modelos de negocios circulares diferentes. Los resultados muestran que los datos de las dimensiones económica y social no estaban disponibles o no se difundían en las empresas. Esto representa una barrera porque la mayoría de los impactos positivos obtenidos con la EC se presentan en la dimensión social, incluida la creación de empleo y el cambio de mentalidad (Rossi et al., 2020).

Otro artículo de interés es 'Plásticos: ¿amigos o enemigos? La circularidad y la huella de residuos plásticos', cuyo título original en inglés es '*Plastics: friends or foes? The circularity and plastic waste footprint*'. Este trabajo contribuye a la discusión sobre qué recomendaciones deberían desarrollarse para la industria y los negocios para minimizar los impactos ambientales. En el artículo se propone un nuevo indicador llamado "*Plastic Waste Footprint*" que se puede traducir como Huella de Residuos Plásticos, para comprender los impactos netos potenciales del plástico y facilitar la toma de decisiones para su reemplazo. Este estudio destaca que el plástico podría ser un aliado si se sigue adecuadamente las estrategias de EC. La reducción (contención, rediseño/reducción, reutilización, reparación, restauración, remanufactura, reutilización con otro propósito), el reciclaje y la recuperación (sin vertidos en el océano u otros cauces) desempeñan un papel decisivo para minimizar y recuperar la energía incorporada, promoviendo una cadena de valor del plástico sostenible. Las políticas para regular/alentar a los fabricantes hacia prácticas sostenibles (impuestos, recolección al final de la vida útil, incentivos para el uso de materias primas secundarias) y la educación (contención, reutilización, separación y reciclaje) para los usuarios potenciales son importantes para evitar que el plástico pase de ser un aliado con alta funcionalidad a un enemigo (Klemeš et al., 2021).

En el artículo "Beneficios ambientales del reciclaje: un estudio de caso sobre residuos plásticos posconsumo para producir postes en Mendoza, Argentina", Arce F. et al. tienen como objetivo evaluar el desempeño ambiental de un caso de estudio sobre el reciclaje de residuos plásticos en Mendoza, Argentina. Aplicaron el indicador de tasa de beneficio de reciclabilidad en bucle abierto en el tratamiento de residuos plásticos, que se basa en un enfoque de ACV. El indicador arroja un resultado del 22%, lo que indica un ahorro ambiental potencial relacionado con el reciclaje de residuos plásticos posconsumo en comparación con la producción de material virgen (madera) y el vertido de residuos en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se realizó un análisis de sensibilidad para estudiar el efecto del parámetro que considera la vida útil de los productos. Es necesario tener en cuenta la vida útil del producto fabricado con material reciclado y el fabricado con material virgen. El cálculo podría determinarse en función de aspectos económicos, técnicos o calidad del material (Universidad Tecnológica Nacional & Arce-Bastias, 2022)

4.3 Análisis de casos de estudio

Otro aspecto analizado en la revisión bibliográfica seleccionada son los estudios de casos que se analizaron en función de si involucraban o no plásticos de un solo uso. En función de ello, se definió la siguiente clasificación:

- Envases de alimentos: estudios de casos en los que se analizaron plásticos de un solo uso utilizados en envases de alimentos.
- Otros plásticos de un solo uso (no envases): estudios de casos en los que se analizaron plásticos de un solo uso utilizados en aplicaciones de envases no alimentarios.
- No aplicable: estudios de casos en los que no se analizaron plásticos de un solo uso, es decir, era de plástico en general.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2:

Tabla 2. Cantidad de artículos publicados por caso de estudio.

Categoría	Cantidad de artículos
Envases de alimentos	10
No aplicable	26
Otros artículos de un solo uso (no envases)	1
Total	37

Fuente: elaboración propia

4.3 Revistas

Finalmente, la bibliografía seleccionada se clasificó según las revistas en las que se publicaron los artículos. Este análisis se presenta en la tabla 3:

Tabla 3: Cantidad de artículos publicados por revista científica

Nombre de Revista científica	Cantidad de artículos
ACS Sustainable Chem. Eng.	2
ASADES	1
Chinese Journal of Chemical Engineering	1
Cleaner Engineering and Technology	1
Cleaner Environmental Systems	1
Energy Sources	1
Environ. Res.	1
Environ. Sci. Technol.	2
Environmental Pollution	1

Journal of Cleaner Production	6
Journal of Hazardous Materials	1
Journal of Industrial Ecology	1
MDPI	4
Ocean and Coastal Management	1
Resources, Conservation & Recycling	5
Revista Ciencia, Tecnología e Innovación	1
Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica	1
Science of the Total Environment	1
Sustainability	3
The International Journal of Life Cycle Assessment	1
Waste Management	1
Total	37

Fuente: elaboración propia

5. Discusión

Después de analizar la bibliografía seleccionada de los 567 artículos que cumplieron con los filtros establecidos, se puede observar que se trata de un tema de relevancia global que ha aumentado en los últimos años. Sin embargo, no existen suficientes publicaciones de la región de América Latina y, en particular, de Argentina. Se destaca la importancia de contar con estudios e información local para el análisis de los impactos ambientales negativos asociados con la cadena de producción y consumo de plásticos. No solo como diagnóstico, sino también para proponer acciones viables desde una perspectiva social que puedan brindar una posible solución.

Los autores proponen diferentes metodologías para abordar el estudio del tema. Cada una presenta sus ventajas o resulta más apropiada según el objetivo y el estudio de caso. El ACV es una herramienta ampliamente aceptada en el campo científico, con una metodología bien establecida regida por la norma ISO 14040, que cuenta con software y bases de datos disponibles para su modelado. Debido al tipo de resultados que ofrece, se utiliza y es adecuado para identificar puntos críticos con los mayores impactos ambientales negativos y comparar productos o procesos que tienen la misma unidad funcional. Es una metodología poderosa y la más completa para evaluar más de una categoría de impacto y todo el ciclo de vida de manera sistemática. Sin embargo, no permite medir la circularidad por sí sola, es decir, se puede utilizar como complemento para evaluar las ventajas ambientales de una estrategia de circularidad. De la bibliografía seleccionada, se puede tomar de ejemplo el artículo "Evaluación de la Sostenibilidad de una Prohibición de Plásticos de un Solo Uso" ("*Sustainability Assessment of a Single-Use Plastics Ban*"), en el trabajo se evalúa la política pública de prohibir el uso de ciertos artículos plásticos comparando los resultados de ACV de dichos productos con sus sustitutos elaborados en otro material (Herberz et al., 2020).

Otro enfoque se centra únicamente en la circularidad de la masa material, estudiando los flujos de materiales de un sistema mediante MFA. Puede aplicarse a los tres niveles de la EC (micro, meso y macro). Sin embargo, en la bibliografía revisada, se utilizó para estudios a nivel macro. Esta metodología permite medir la circularidad directamente, pero, como limitación, sólo desde el punto de vista del material sin considerar otros impactos ambientales.

Utilizando las ventajas de las dos metodologías mencionadas anteriormente y para compensar sus limitaciones, dentro de los artículos analizados algunos autores proponen indicadores de la EC, donde se combinan ambas metodologías. Tal es el caso de Arce F. et al., en su artículo "Beneficios ambientales del reciclaje: un estudio de caso sobre el reciclaje de residuos plásticos posconsumo para producir postes en Mendoza, Argentina". Aunque esta integración parece ser la mejor estrategia para analizar la circularidad, en muchos casos, este tipo de estudios considera sólo una categoría de impacto del ACV. Además, no hay un solo indicador o metodología con esta perspectiva que esté ampliamente aceptada y aplicada en la comunidad científica.

En cuanto a los estudios de casos, hay más estudios sobre plásticos en general que sobre plásticos de un solo uso, y dentro de esta última categoría, hay un mayor enfoque en los utilizados en envases de alimentos, estos se caracterizan por su criticidad en su disponibilidad y calidad. Con respecto a las revistas, hay una amplia variedad, ya que los artículos analizados se publicaron en diferentes revistas especializadas en la disciplina.

6. Conclusiones

A partir del análisis exhaustivo de la bibliografía seleccionada y de las evaluaciones realizadas sobre la misma, se pueden extraer conclusiones cruciales que destacan la necesidad de abordar la problemática de los plásticos y su circularidad desde una perspectiva más local, particularmente en el contexto de Argentina y América Latina. Se observa una escasez notable de investigaciones y estudios con enfoque regional en esta área geográfica. A pesar de que la producción y consumo de plásticos son realidades significativas en la región, la mayoría de la literatura revisada proviene de contextos internacionales, lo que resalta la importancia de impulsar investigaciones específicas que aborden los desafíos y las soluciones desde una perspectiva local.

La revisión de la literatura pone de manifiesto la falta de indicadores ampliamente utilizados y aceptados en la comunidad científica para medir la circularidad de los plásticos. A pesar de la existencia de diversas metodologías y enfoques para evaluar determinados aspectos de la circularidad, como el ACV y el MFA, estos presentan sus limitaciones y no son del todo específicos. Es decir, no se ha establecido un indicador o set de indicadores para medir de forma precisa y coherente la circularidad en diferentes contextos geográficos y sistemas. Esta carencia resalta la necesidad de desarrollar y promover la adopción de indicadores estandarizados que faciliten la evaluación y el seguimiento de la circularidad de los plásticos.

Referencias bibliográficas

Bianco C., Isso F., Moskat M. (2021). *Plásticos en América Latina: Breve reseña de su producción, consumo e impactos ambientales.*

Boesen, S., Bey, N., & Niero, M. (2019). Environmental sustainability of liquid food packaging: Is there a gap between Danish consumers' perception and learnings from life cycle assessment? *Journal of Cleaner Production*, 210, 1193-1206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.055>

Bora, R. R., Wang, R., & You, F. (2020). Waste Polypropylene Plastic Recycling toward Climate Change Mitigation and Circular Economy: Energy, Environmental, and Technoeconomic Perspectives. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(43), 16350-16363. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06311>

Boucher J., Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources. *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN.)* Gland.

Eriksen, M. K., Pivnenko, K., Faraca, G., Boldrin, A., & Astrup, T. F. (2020). Dynamic Material Flow Analysis of PET, PE, and PP Flows in Europe: Evaluation of the Potential for Circular Economy. *Environmental Science & Technology*, 54(24), 16166-16175. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03435>

Geyer R., Jambeck JR., Law KL. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv*, 3.

Graedel, T. E. (2019). Material Flow Analysis from Origin to Evolution. *Environmental Science & Technology*, 53(21), 12188-12196. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03413>

Hahladakis, J. N., Iacovidou, E., & Gerassimidou, S. (2020). Plastic waste in a circulareconomy. *Plastic Waste and Recycling*, 481-512. doi:10.1016/b978-0-12-817880-5.00019-0

Heller, M. C., Mazor, M. H., & Keoleian, G. A. (2020). Plastics in the US: Toward a material flow characterization of production, markets and end of life. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9e1e>

Herberz, T., Barlow, C. Y., & Finkbeiner, M. (2020). Sustainability Assessment of a Single-Use Plastics Ban. *Sustainability*, 12(9), 3746. <https://doi.org/10.3390/su12093746>

Hsu, W.-T., Domenech, T., & McDowall, W. (2021). How circular are plastics in the EU?: MFA of plastics in the EU and pathways to circularity. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100004>

Khoo, H. H. (2019). ACV of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.010>

Klemeš, J. J., Fan, Y. V., & Jiang, P. (2021). Plastics: Friends or foes? The circularity and plastic waste footprint. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(13), 1549-1565. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1801906>

Maga, D., Hiebel, M., & Aryan, V. (2019). A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials. *Sustainability*, 11(19), 5324. <https://doi.org/10.3390/su11195324>

Peña C., Civit B., Gallego-Schmid A., Druckman A., Caldeira- Pires A, Weidema B., Mieras E., Wang F., Fava J., Milà i Canals L., Cordella M., Arbuckle P., Valdivia S., Fallaha S., Motta W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z>

Rossi, E., Bertassini, A. C., Ferreira, C. dos S., Neves do Amaral, W. A., & Ometto, A. R. (2020). Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137>

Stefanini, R., Borghesi, G., Ronzano, A., & Vignali, G. (2021). Plastic or glass: A new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(4), 767-784. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01804-x>

Testa, F., Di Iorio, V., Cerri, J., & Pretner, G. (2021). Five shades of plastic in food: Which potentially circular packaging solutions are Italian consumers more sensitive to. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105726. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105726>

Universidad Tecnológica Nacional, & Arce-Bastias, F. (2022). Beneficios ambientales del reciclaje de residuos plásticos posconsumo para la producción de postes en Mendoza, Argentina. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(Supl.1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.nSupl.1.2022.2145>

Wohner, B., Pauer, E., Heinrich, V., & Tacker, M. (2019). Packaging-Related Food Losses and Waste: An Overview of Drivers and Issues. *Sustainability*, 11(1), 264. <https://doi.org/10.3390/su11010264>

Fecha de recepción: 5/9/2023

Fecha de aceptación: 4/12/2023