

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Fuentes sostenibles para la producción de ácido poliláctico: Una revisión sistemática

Laura Viviana Sanabria Ordóñez y Dilan Andrés Gómez López

Director:

Cesar Augusto Guevara Lastre

M. Sc. Ciencias y tecnologías Ambientales.

Codirector:

Omar Andrés Benavides Prada

M. Sc. Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Tabla de Contenido

Introducción	7
1.Objetivos.....	9
1.1 Objetivo General	9
1.2 Objetivos Específicos.....	9
2.Estado del Arte.....	10
3.Metodología	13
3.1 Elección bases de datos para la búsqueda	14
3.2 Selección de la información	14
3.3 Análisis bibliométrico	15
3.4 Reconocimiento avances y desafíos.....	16
4. Resultados	17
4.1 Selección de información: aplicación del protocolo PRISMA	17
4.2 Análisis bibliométrico	18
4.3 Producción de PLA a partir de biomasa.....	22
4.4 Adición de biocompuestos al PLA.....	25
4.5 Análisis ciclo de vida (ACV)	36
4.6 Aplicaciones del ácido poliláctico.....	39
5. Desafíos.....	42
6. Conclusiones	45
7. Recomendaciones.....	47
Referencias.....	48

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Lista de tablas

Tabla 1.....	14
<i>Criterios de exclusión e inclusión utilizados en la revisión sistemática.....</i>	14
Tabla 2.....	15
<i>Ecuación de búsqueda.....</i>	15
Tabla 3.....	17
<i>Búsqueda en bases de datos y resultados.....</i>	17
Tabla 4.....	21
<i>Revistas con mayor número de citas en relación con las fuentes sostenibles para la producción de ácido poliláctico y sus aplicaciones.....</i>	21
Tabla 5.....	24
<i>Análisis del rendimiento de diferentes biomásas para la producción de 1 kg de PLA.....</i>	24
Tabla 6.....	26
<i>Propiedad mecánica de la membrana de ácido poliláctico/quitosano con combinación variable.....</i>	26
Tabla 7.....	27
<i>Valores de las propiedades reológicas y mecánicas de los compuestos de ácido poliláctico virgen (Sin CE), HDI, IPDI y TDI.....</i>	27
Tabla 8.....	29
<i>Valores de las propiedades mecánicas de los filamentos compuestos de ácido poliláctico puro (PLA) y PLA/madera, según el método de producción y el tipo de almacenaje.....</i>	29
Tabla 9.....	31
<i>Cambio de las propiedades de los compuestos de PLA reforzados con nano celulosa y agentes de acoplamiento, según el cambio de la temperatura.....</i>	31
Tabla 10.....	33
<i>Resultados de las propiedades mecánicas de PLA puro y biocompuesto de BC y tela de lino. ...</i>	33
Tabla 11.....	37
<i>Análisis del ciclo de vida (ACV) de los biocompuestos.....</i>	37
Tabla 12.....	38
<i>Datos de los compuestos verdes de PLA-PN y PLA-KB comparados con PLA puro y HDPE. ...</i>	38
Tabla 13.....	39
<i>Aplicaciones novedosas con PLA.....</i>	39

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Lista de Figuras

Figura 1	13
<i>Diagrama metodológico</i>	13
Figura 2	18
<i>Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos</i>	18
Figura 3	19
<i>Países con mayor cantidad de contribuciones contempladas en la revisión.</i>	19
Figura 4	20
<i>Cantidad total de artículos por cada base de datos.</i>	20
Figura 5	22
<i>Conexión entre las palabras claves identificadas en los artículos seleccionados. Imagen creada mediante Vosviewer.</i>	22
Figura 6	23
<i>Método de polimerización con apertura de anillo para la conversión de ácido láctico en ácido poliláctico.</i>	23
Figura 7	29
<i>Absorción de agua a través del tiempo</i>	30

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Resumen

Título: Fuentes sostenibles para la producción de ácido poliláctico: Una revisión sistemática *

Autores: Sanabria Ordóñez Laura Viviana, Gómez López Dilan Andrés **

Palabras Clave: Biopolímero, Ácido Poliláctico o PLA, Producción.

Descripción: En el proyecto se realizó una revisión sistemática sobre la producción sostenible de ácido poliláctico (PLA) la cual implica un análisis minucioso y organizado de la literatura existente. La búsqueda y clasificación de la información se realizó siguiendo el protocolo PRISMA. Se llevó a cabo una búsqueda rigurosa en bases de datos académicas, revistas científicas y otras fuentes pertinentes para recopilar artículos y publicaciones relacionados con la producción sostenible de PLA, para esto se emplearon palabras clave específicas y criterios de inclusión para identificar las fuentes relevantes; obteniendo una visión general del número de artículos publicados, autores y países.

Una vez recopiladas las fuentes, se procede a evaluar su relevancia y calidad. Las fuentes seleccionadas se organizan en función de su contribución a los objetivos de la revisión, mientras que se excluyen aquellas que no cumplen con los criterios de inclusión.

Finalmente se presentaron los resultados de esta revisión de manera clara y organizada en un informe. La revisión destaca que se han logrado avances significativos en la producción de PLA de manera sostenible. Estos avances incluyen mejoras en la eficiencia de los procesos de producción, la utilización de materias primas renovables y el desarrollo de tecnologías limpias.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Ingeniería química. Director: Cesar Augusto Guevara Lastre- M. Sc. Ciencias y tecnologías Ambientales. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada- M. Sc. Ingeniera Química.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Abstract

Title: Sustainable sources for the production of polylactic acid: A systematic review *

Authors: Sanabria Ordóñez Laura Viviana, Gómez López Dilan Andrés **

Keywords: Biopolymer, Polylactic Acid or PLA, Production.

Description: In the project, a systematic review was carried out on the sustainable production of polylactic acid (PLA), which involves a meticulous and organized analysis of the existing literature. The search and classification of the information was carried out following the PRISMA protocol. A rigorous search was carried out in academic databases, scientific journals and other relevant sources to collect articles and publications related to the sustainable production of PLA, for this specific keywords and inclusion criteria were used to identify the relevant sources; obtaining an overview of the number of articles published, authors and countries.

Once the sources are collected, their relevance and quality are evaluated. The selected sources are organized according to their contribution to the objectives of the review, while those that do not meet the inclusion criteria are excluded.

Finally, the results of this review were presented in a clear and organized way in a report. The review highlights that significant progress has been made in the production of PLA in a sustainable way. These advances include improvements in the efficiency of production processes, the use of renewable raw materials and the development of cleaner technologies.

*Degree work

**Faculty of physicochemical engineering. Chemical engineering school. Director: Cesar Augusto Guevara Lastre- M. Sc. Environmental Science and Technology. Co-director: Omar Andrés Benavides Prada- M. Sc. Chemical Engineering.

Introducción

En los últimos años, el ácido poliláctico (PLA) se ha considerado un candidato prometedor para reemplazar los polímeros no biodegradables a base de petróleo. Dicho compuesto es un poliéster alifático de base biológica obtenido a partir de ácido láctico (LA), utilizando, principalmente, materias primas como el almidón, el cual muestra un buen desempeño mecánico (rigidez y resistencia), transparencia, excelente imprimibilidad, procesabilidad y viabilidad económica, en comparación con otros polímeros biodegradables (Mitul *et al.* 2022).

Si bien el PLA es un polímero útil, presenta algunas desventajas al compararlo con los polímeros tradicionales; por ejemplo, es un material frágil con menos del 10 % de alargamiento a la rotura, su barrera a los gases es deficiente y es altamente hidrófobo. Por lo tanto, la capacidad de proceso es más difícil y el rendimiento del producto, en algunos casos, es menor en comparación con los polímeros a base de petróleo. Estas propiedades deben mejorarse mediante su modificación o refuerzo haciendo uso de diferentes técnicas, como la modificación de la superficie, el uso de agentes de acoplamiento, plastificantes o la mezcla con otros polímeros (María *et al.* 2022).

Partiendo de las premisas anteriores, el objetivo de este trabajo fue realizar una revisión sistemática, basada en el protocolo PRISMA (Moher *et al.* 2009), de los distintos desarrollos científicos en este campo durante los últimos 5 años, con el fin de abordar los avances en la producción de PLA y establecer los retos y perspectivas a futuro. Dado el reciente interés en este biopolímero, la información disponible es limitada, lo que dificulta la realización de una revisión sistemática exhaustiva y detallada. Por esta razón, se decidió ampliar la búsqueda al incluir el

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

análisis y revisión de las aplicaciones del PLA en diversos campos, logrando obtener una visión más amplia y completa sobre la producción y el uso del PLA. Las fuentes recopiladas se sometieron a una evaluación para determinar su relevancia y calidad; aquellas que cumplieron con los criterios de inclusión fueron seleccionadas y organizadas de manera coherente según su contribución a los objetivos del trabajo. Luego, se llevó a cabo un análisis detenido y un resumen efectivo de la información extraída, lo que permitió identificar patrones emergentes, tendencias y desafíos en la producción sostenible de PLA, proporcionando una visión actualizada de esta área de estudio.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una revisión sistemática sobre la producción de ácido poliláctico para la generación de biopolímeros a partir de fuentes sostenibles.

1.2 Objetivos Específicos

Implementar el protocolo PRISMA para la selección, clasificación y análisis de la información.

Identificar los avances científicos y tecnológicos más relevantes en la producción de ácido poliláctico a partir de fuentes sostenibles.

Establecer los desafíos actuales para la producción de ácido poliláctico a partir de fuentes sostenibles.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

2. Estado del Arte

Criado Bayona *et al.* (2021) realizaron una revisión sistemática enfocada en el uso de membranas para la separación de mezclas etanol-agua por pervaporación, de acuerdo con las declaraciones del protocolo PRISMA. Dicha metodología es un protocolo de 27 ítems adaptables que establecen la secuencia metodológica para realizar una investigación, permitiendo obtener resultados sin sesgos ni puntos ciegos a partir de la selección de la información, su criterio de elegibilidad, el proceso de cribado y de clasificación, y el análisis crítico de los resultados obtenidos, lo cual garantiza que los temas de interés se aborden de forma amplia, integral e imparcial. Dicho método se divide en cuatro fases: búsqueda de la información, selección y análisis, redacción, y socialización y discusión de los resultados. Al aplicar el protocolo los autores concluyen que las mejoras en la tecnología de membranas para la separación de etanol-agua vía pervaporación es un tema de investigación relevante, mostrando que China tiene una contribución notable en el campo con un 42 % de la cantidad total de artículos publicados en el período bajo revisión. En términos de materiales, las membranas hechas con materiales híbridos son las de mayor investigación, representando un 53 % de todos los artículos analizados.

Por otra parte, Yuan Ren *et al.* (2022) realizaron un análisis de la tendencia de investigación sobre la fermentación del ácido láctico mediante un estudio bibliométrico, el cual consistió en la definición de las palabras clave para generar frases de búsqueda usadas en la base de datos Web of Science. Los registros de todos los índices se descargaron y se les realizó un estudio lógico digital en un software de hoja de cálculo, con el fin de clasificar todos los datos relevantes. Finalmente, se analizaron las tendencias de los resultados en intervalos de cuatro años para minimizar las fluctuaciones de un año a otro. Los autores resumieron los últimos avances en la fermentación del

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

ácido láctico utilizando diferentes stocks de biomasa y microorganismos; así mismo, analizaron los efectos de diferentes modos de fermentación y métodos de acoplamiento para la separación en el proceso de fermentación. Finalmente, exponen las cepas microbianas para la fermentación cooperativa y la utilización de polisacáridos.

Otro estudio de vigilancia científica empleando la declaración PRISMA fue el desarrollado por Serrano Carrilo, *et al.* (2022), enfocado en alternativas tecnológicas anticorrosivas sobre acero al carbono de uso en la industria petroquímica. La metodología aplicada por los autores inició por la elección de motores de búsqueda, el planteamiento de palabras clave y ecuaciones de búsqueda, continuando con la exclusión de documentos duplicados, el planteamiento de criterios de exclusión y, finalmente, el análisis bibliométrico, bibliográfico y la identificación de desafíos. El trabajo evidenció una tendencia creciente en cuanto al volumen de publicaciones en los últimos 10 años, así como un enfoque en el desarrollo de recubrimientos multifuncionales, duraderos, resistentes y amigables con el medio ambiente, siendo el método sol-gel la estrategia de deposición más prometedora en las síntesis de recubrimientos.

Finalmente, Jiaming Yu *et al.* (2023) reportan que el PLA se toma como el biopolímero preferido para preparar alternativas plásticas a base de petróleo. De 2011 a 2020, la producción global de PLA aumentó de menos de 200 kt/año a alrededor de 800 kt/año. A pesar de la rápida expansión, el PLA no ha alcanzado la escala esperada y no puede reemplazar completamente a los plásticos derivados del petróleo. Esta situación se puede atribuir a los defectos inherentes del PLA, pero se debe más a su insuficiente capacidad de producción; solo en China, si el PLA se utilizara para reemplazar la película de acolchado agrícola existente, se necesitarían, al menos, 250 kt/año.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Con base en la información expuesta anteriormente, es posible proponer discusiones sobre la producción de PLA aplicando el protocolo PRISMA, debido a las ventajas ambientales y económicas que ofrece este biopolímero frente a los plásticos derivados del petróleo. El PLA es un material biodegradable, compostable, no tóxico y con propiedades mecánicas y térmicas adecuadas para diversas aplicaciones, especialmente en el campo biomédico.

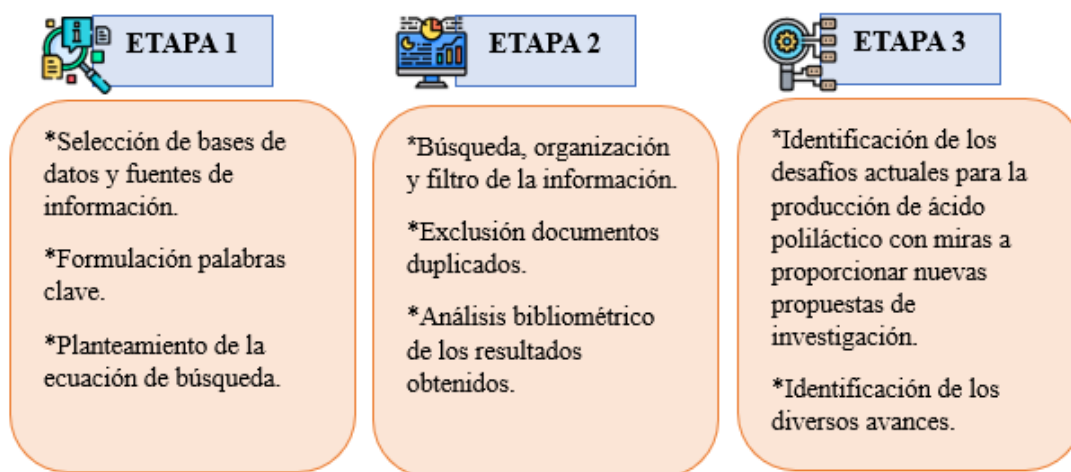
REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

3. Metodología

Esta revisión sistemática fue conducida siguiendo las pautas establecidas por la declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que comprende 27 elementos (Apéndice A) organizados en 7 fases: formulación de la pregunta de investigación, búsqueda de artículos, selección de estudios, extracción de datos, análisis de riesgo de sesgo, análisis de datos y presentación de resultados preliminares. Estas fases se han diseñado para asegurar la recopilación, estudio y presentación transparente de los datos, con el objetivo primordial de sintetizar y presentar de manera clara los avances tecnológicos vinculados al tema objeto de análisis (Yepes *et al.* 2021). Es relevante señalar que en esta investigación se decidió no emplear el metaanálisis, ya que los estudios examinados en la revisión muestran diferencias significativas en términos de diseño, metodología y resultados, lo cual dificulta una combinación efectiva de los datos. La metodología utilizada se detalla en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama metodológico



REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

3.1 Elección bases de datos para la búsqueda

Se optó por utilizar la base de datos Scopus y Web of science (WOS) debido a su relevancia en la investigación en ingeniería. Estas plataformas realizan un registro de diversas bases de datos, entre las que se incluyen Taylor & Francis, ACS Publications, Science Direct y Springer. Todas estas fuentes están disponibles para los estudiantes gracias a la Universidad Industrial de Santander. En la recopilación de información se emplearon las siguientes palabras clave como parte del proceso: "*biopolymer*", "*poly (lactic acid)*", "*PLA*" y "*production*", cada una de ellas separadas con los conectores "AND" y "OR". En la Tabla 1 se evidencian los criterios de inclusión y exclusión de la revisión.

Tabla 1.

Criterios de exclusión e inclusión utilizados en la revisión sistemática.

Criterios Exclusión	Criterios Inclusión
Estudios que no están centrados en ácido poliláctico.	Estudios sobre la producción de ácido poliláctico a partir de fuentes sostenibles.
Documentos tales como blogs, conferencias y tesis.	Estudios que hablen sobre aplicaciones de ácido poliláctico.
Documentos que hablen de producción de ácido poliláctico diferentes a fuentes sostenibles.	Todo estudio que usa fuentes sostenibles como materia prima.

3.2 Selección de la información

La formulación de la pregunta de investigación surgió a raíz de la utilización actual de biopolímeros y se afirmó de la siguiente manera: *¿cuáles son las materias primas y procesos de producción adecuados y sostenibles para la producción de ácido poliláctico, y cómo se comparan en términos de rendimiento (kg de biomasa/kg de PLA)?* Para dar respuesta a dicho

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

planteamiento, teniendo en cuenta que la gran mayoría de información se ha desarrollado en los últimos años, y siguiendo la tendencia de revisiones sistemáticas previas, se cubrió un período de 5 años (de 2019 a 2023). En la Tabla 2 se presenta la ecuación de búsqueda utilizada para la inclusión de trabajos en la revisión sistemática, limitándose a publicaciones en inglés.

Tabla 2.

Ecuación de búsqueda.

Área temática	Tipo de documento	Etapas de Publicación	Palabras clave	Idioma
Química	Artículo	Final	Biopolímero	Inglés
Ingeniería			Ácido	
Química			poliláctico o	
Ingeniería			PLA	
			Producción	

Luego, se procedió a descargar todos los documentos e importarlos a Mendeley, un software de gestión de referencias para eliminar cualquier duplicado. A continuación, los artículos que pasaron este filtro se introdujeron en la herramienta Rayyan, la cual es una aplicación web que tiene como propósito evaluar sistemáticamente a través de la elección de estudios, análisis de datos y presentación de resultados. Este sistema está accesible en línea de forma gratuita (Elmagarmid *et al.* 2014).

3.3 Análisis bibliométrico

Se efectuó la clasificación de los datos según el número de publicaciones por año, países, autores, número de citas por año y nombre de la revista. Una vez completada esta organización, se realizó un análisis bibliométrico utilizando los documentos resultantes luego de aplicar el método PRISMA. Estos documentos fueron organizados en una hoja de cálculo

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

en Excel, donde se incorporó información pertinente de cada artículo. Este procedimiento incluyó la revisión exhaustiva de cada documento para un análisis más detallado mediante la plataforma gratuita VosViewer, utilizada para representar y evaluar gráficamente las relaciones de colaboración, coautoría, conceptos clave y referencias bibliográficas en la literatura académica. La finalidad fue identificar tendencias y patrones en la investigación, simplificando la visualización y comprensión de los resultados obtenidos.

3.4 Reconocimiento de avances y desafíos

Se identificaron diversas tecnologías utilizadas a lo largo del tiempo, así como aquellas emergentes centradas en la producción de ácido poliláctico. Se tomaron en cuenta varios criterios de clasificación, como el tipo de fuente sostenible y el proceso empleado. Además, se evaluó la implementación de sus aplicaciones. Finalmente, se analizaron los desafíos que enfrentan las tecnologías comúnmente utilizadas, proporcionando así una base sólida para la planificación de futuras propuestas de investigación en este campo.

4. Resultados

4.1 Selección de información: aplicación del protocolo PRISMA

Los resultados de la búsqueda bibliográfica se presentan en la Tabla 3. Se identificaron inicialmente 91 artículos mediante la estrategia de exploración; después de eliminar los duplicados, el número de estudios se redujo a 38 artículos. Dentro de estos, 3 se encontraron en la base de datos de WOS y 35 en Scopus. Posteriormente, durante el proceso de cribado se excluyeron 12 artículos de acuerdo con los criterios de selección mostrados en las tablas 1 y 2. Finalmente, se eligieron 26 artículos de Scopus para llevar a cabo el análisis bibliométrico.

Tabla 3.

Búsqueda en bases de datos y resultados.

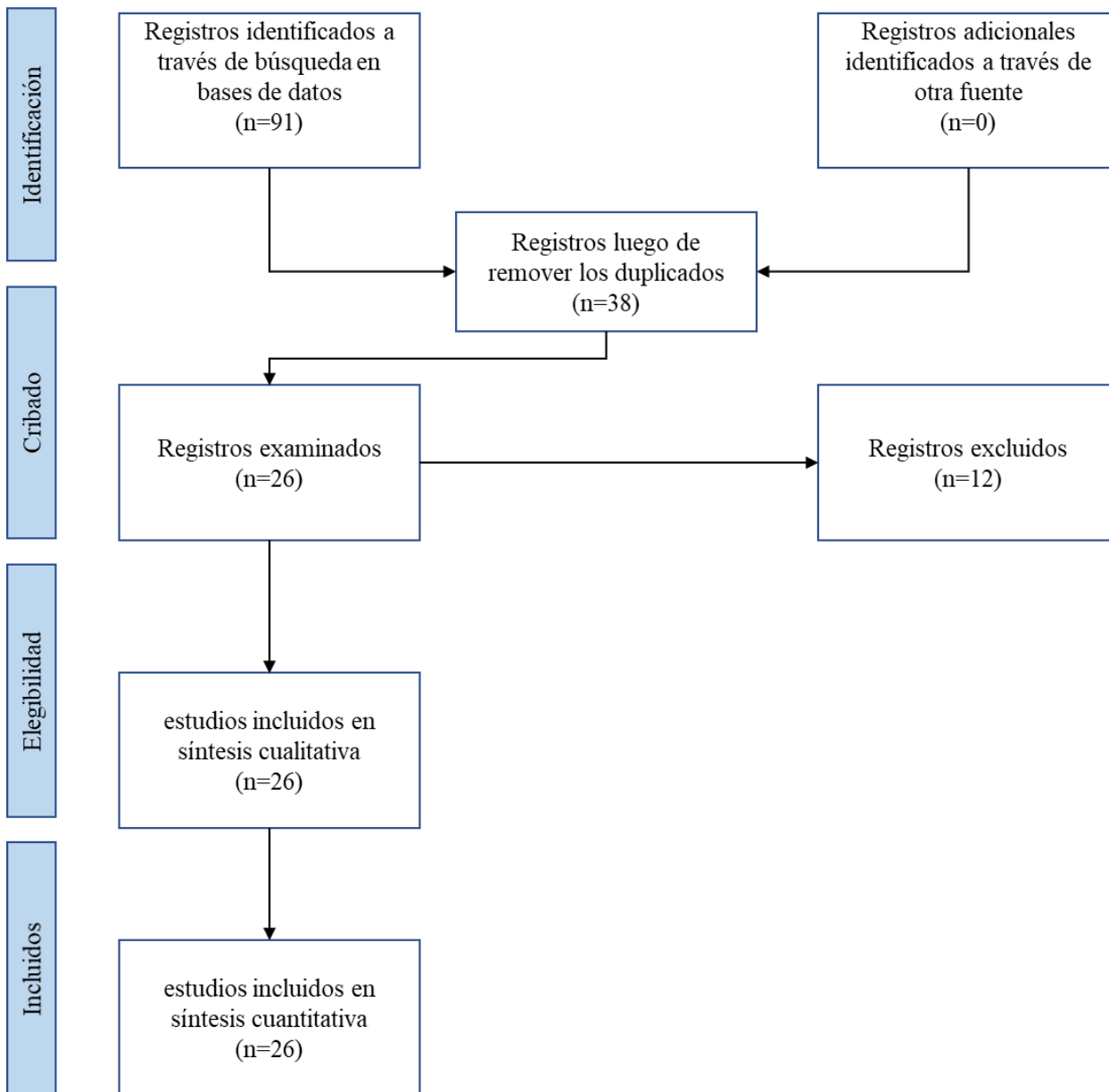
Base de datos	Consultas de búsqueda	Resultados
Scopus	TÍTULO, ABSTRAT, PALABRAS CLAVE (biopolymer AND "poly (lactic acid)" OR PLA AND production)	58
Web of Science WOS	TÍTULO, ABSTRAT, PALABRAS CLAVE (biopolymer AND "poly (lactic acid)" OR PLA AND production)	33
Total		91

En síntesis, la Figura 2 ilustra un diagrama de flujo que acopia el procedimiento de búsqueda y elección conforme al protocolo PRISMA. Como resultado, se optó por incluir 26 artículos, revisado cada uno de los 91 inicialmente recopilados.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Figura 2

Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos



4.2 Análisis bibliométrico

Se llevaron a cabo lecturas integrales y análisis completos de la información recopilada, con el fin de proporcionar una perspectiva clara sobre los avances en la producción de PLA

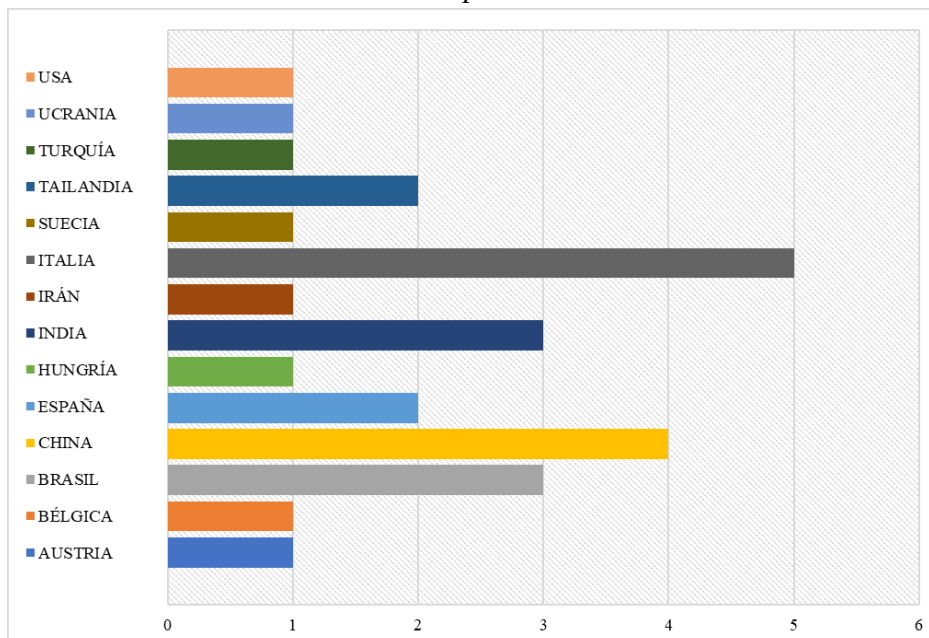
REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

a partir de fuentes sostenibles. Dado el reciente interés, se encontró una limitada cantidad de información disponible; por ello, se decidió incluir en la revisión las aplicaciones del PLA en diversos campos, tal como se mencionó en la Introducción. Las fuentes recopiladas se sometieron a una evaluación para determinar su relevancia y calidad; aquellas que cumplieron con los criterios de inclusión fueron seleccionadas y organizadas de manera coherente según su contribución a los objetivos de esta revisión.

Luego de extraer la información de los 26 artículos, los resultados obtenidos se ingresaron en Microsoft Excel. En esta herramienta se estructuró el contenido según año de publicación, autores, bases de datos, la revista y cantidad de citas de cada artículo. Además, se incluyen datos cruciales para el análisis de técnicas empleadas, como el tipo de biomasa, el proceso de producción y las aplicaciones. Este enfoque detallado en el análisis de los artículos permitió la identificación de tendencias y patrones.

Figura 3

Países con mayor cantidad de contribuciones contempladas en la revisión.

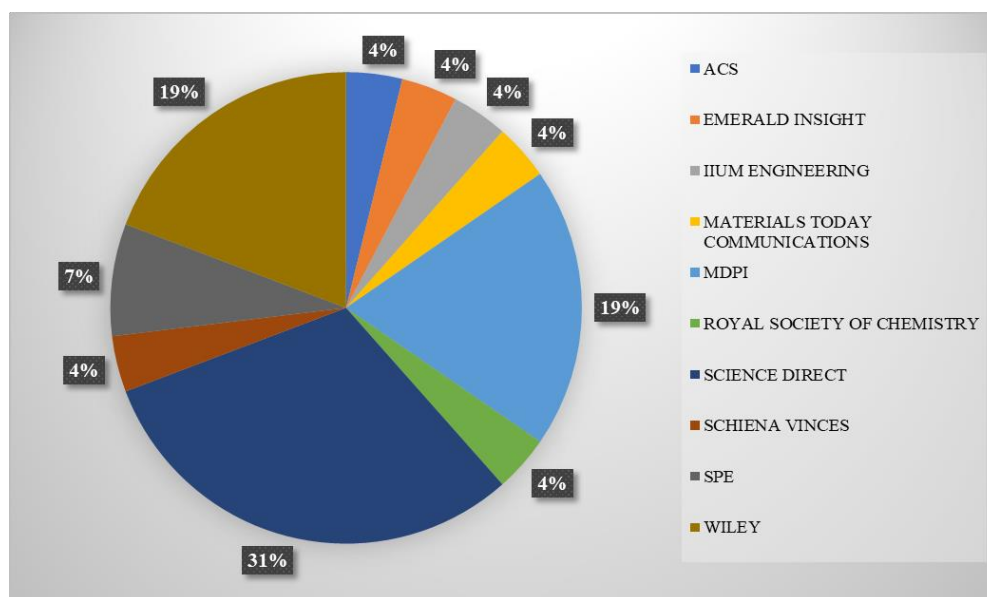


REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Italia destaca como el actor principal en la investigación relacionada con la producción de PLA, como se evidencia en la Figura 3. Este país ha centrado sus iniciativas tanto en la exploración de fuentes sostenibles para la fabricación de PLA como en sus aplicaciones. Así mismo, según se observa en la Figura 4, en lo que respecta a las bases de datos clave para difundir avances tecnológicos, Science Direct ocupa la posición principal con un 31 %, seguido por el Instituto Multidisciplinario de Publicaciones Digitales (MDPI), que aporta un 19 % del total de publicaciones.

Figura 4

Porcentaje total de artículos por cada base de datos.



Por otra parte, a través del análisis bibliométrico se pudo examinar que las revistas más destacadas en la publicación de artículos fueron Journal of Applied Polymer Science, Journal of Cleaner Production y Polymers. Además, Composites Part B: Engineering y Journal of Applied Polymer son las que acumulan el mayor número de citas, según se detalla en la Tabla 4.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Tabla 4

Revistas con mayor número de citas en relación con las fuentes sostenibles para la producción de ácido poliláctico y sus aplicaciones.

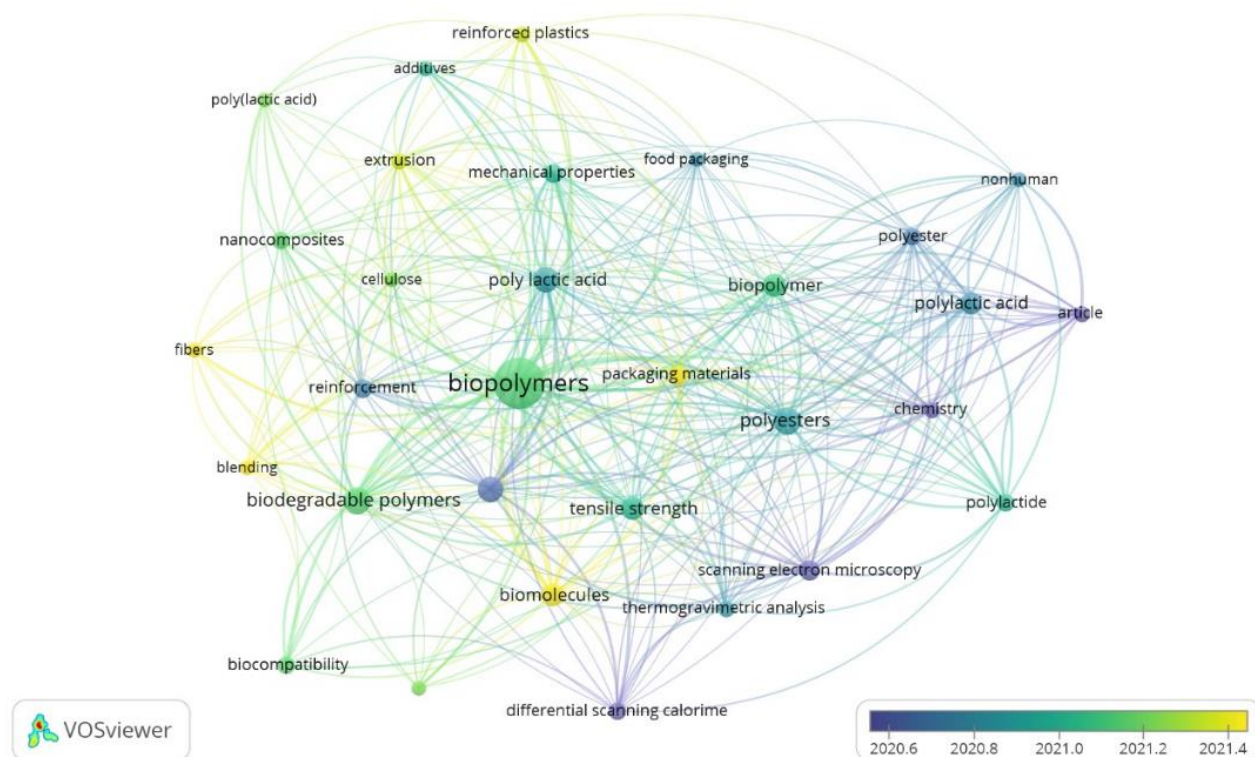
Revista	Citaciones
Composites Part B: Engineering	53
Journal of Applied Polymer Science	37
Rapid Prototyping Journal	36
Polymers	25
Journal of Cleaner Production	21
Express Polymer Letters	19
Polymer Composites	18
Colloids and Surfaces B: Biointerfaces	17
Journal of Bioscience and Bioengineering	16
Analytical Methods	14

Según se ilustra en la Figura 5, se puede observar que las expresiones más utilizadas fueron: *biopolymers*, *poly lactic acid*, *polyesters*, *cellulose*, *biodegradable polymers* y *biomolecules*. Además, dentro de los nodos de color amarillo se destaca el método principal para la producción de PLA: polimerización. Por otro lado, los nodos de color morado se centran en las aplicaciones de este biopolímero, proporcionando una visión clara de las áreas de atención y las conexiones en la investigación vinculada al PLA.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Figura 5

Conexión entre las palabras claves identificadas en los artículos seleccionados. Imagen creada mediante Vosviewer.



4.3 Producción de PLA a partir de biomasa

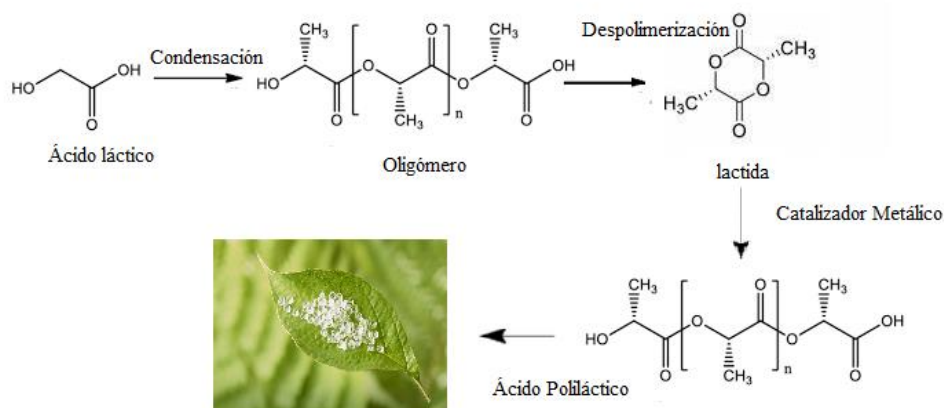
La biomasa constituye una diversidad de organismos biológicos originados a partir de materiales naturales y no fósiles, representando recursos renovables ricos en carbono y ampliamente disponibles a nivel mundial (Kumar, *et al.*, 2010). Entre las fuentes de biomasa se incluyen la lignocelulósica, algas, desechos de alimentos, residuos sólidos urbanos y aguas residuales con elevado contenido de materia orgánica. Los residuos agrícolas (maleza, estiércol de vaca y estiércol de cerdo), la madera (aserrín y cortezas) y los desechos agroindustriales (residuos de frutas y lignina Kraft como la *Prosopis juliflora*), son de las principales biomásas utilizadas. Es relevante señalar que, en la mayoría de los casos, la biomasa requiere un

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

pretratamiento para que mejore el rendimiento y la eficiencia de la producción de PLA; este proceso que puede ser químico (pretratamiento con vapor y ácido) o físico (lavado, picado, triturado, secado) (Bolívar, *et al.*, 2022).

Figura 6

Método de polimerización con apertura de anillo para la conversión de ácido láctico en ácido poliláctico.



Nota. Adaptado de (Sudharsan Kasirajan, *et al.*, 2019).

Se hallaron dos procesos de producción de PLA dependiendo del tipo de biomasa, tal como se aprecia en la Tabla 5. La polimerización con apertura de anillo (ROP) se usó para la mayoría de las biomásas, siendo los desechos alimentarios los que presentan el mejor rendimiento. En particular, la técnica usada por Kim, *et al.*, 2022, consta de tres secciones, iniciando por la policondensación del ácido láctico para obtener un polímero de menor peso molecular, que a su vez se despolimeriza en moléculas de lactida (diéster cíclico del ácido láctico) en la segunda sección; la lactida se lleva, finalmente, a la polimerización con apertura de anillo que da como resultado la resina de PLA. Este proceso lo podemos apreciar en la Figura 6.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Tabla 5

Análisis del rendimiento de diferentes biomásas para la producción de 1 kg de PLA.

Biomasa	Tipo	Rendimiento	Fuente
<i>Prosopis juliflora</i>	Polimerización con apertura de anillo modificada	1.56 (kg/kg)	(Sudharsan, <i>et al.</i> , 2019)
Desechos alimentarios	Polimerización con apertura de anillo	2.1 (kg/kg)	(Kim, <i>et al.</i> , 2022)
Estiércol porcino	Polimerización con apertura de anillo	2.8 (kg/kg)	(Kim, <i>et al.</i> , 2022)
Lodos de aguas residuales	Polimerización con apertura de anillo	3.1 (kg/kg)	(Kim, <i>et al.</i> , 2022)
Paja de trigo	Polimerización con apertura de anillo	4.54 (kg/kg)	(Rebolledo, <i>et al.</i> , 2023)

Por otra parte, el segundo proceso de producción es la polimerización con apertura de anillo modificada, donde se presenta una policondensación directa. Esta técnica fue usada solo para la biomasa *Prosopis juliflora*, y consiste en una reacción química entre moléculas de ácido láctico que tienen dos grupos funcionales, uno hidroxilo y otro carboxilo, que pueden reaccionar entre sí eliminando una molécula de agua, realizándose en un solo paso sin la necesidad de separar la lactida del ácido láctico y permitiendo obtener polímeros con mayor peso molecular y menor polidispersidad (Sudharsan, *et al.*, 2019). La técnica mostró el mejor rendimiento frente a las otras biomásas, consumiendo de 1.56 kg de *Prosopis juliflora* para la producción de 1 kg de PLA.

4.4 Adición de biocompuestos al PLA

El PLA es un bioplástico derivado de recursos renovables que se destaca por sus buenas propiedades mecánicas y moderada estabilidad térmica. Aunque el PLA tiene muchas aplicaciones prometedoras, su tendencia a degradarse dificulta su reutilización en procesos productivos que generan residuos (Ecker, *et al.*, 2019). Esto ha ocasionado nuevas investigaciones enfocadas en la adición de biocompuestos, generando cambios en las propiedades del material y permitiendo así un mayor campo de posibles aplicaciones.

Sudharsan Kasirajan, *et al.*, 2019, analizaron la producción de PLA a partir de las vainas de *Prosopis juliflora*, una especie vegetal invasora, junto con la incorporación de quitosano, un polisacárido natural, en la matriz de PLA para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas para aplicaciones de envasado. La viabilidad de utilizar *Prosopis juliflora* como materia prima se basa en factores como la disponibilidad de la biomasa, su contenido de azúcar (entre un 23 y 35 %) y su rendimiento en la producción de PLA (cercano al 64 %). Se destaca que el ácido láctico producido alcanza una concentración del 85 % de pureza, luego convertido a PLA. El rendimiento del PLA producido se establece en 54.5 g por cada 85 g de ácido láctico, utilizando el método de polimerización por condensación directa del ácido láctico para obtener un prepolímero de PLA de bajo peso molecular, seguido de despolimerización del prepolímero de PLA para conseguir lactida; luego, se hace nuevamente una polimerización por apertura de anillo de la lactida y se logra PLA de alto peso molecular. Adicionalmente, se observó que, reduciendo la presión de reacción y una temperatura menor a 180 °C, se favorece la eliminación del subproducto (agua) y la formación de enlaces éster entre las moléculas de ácido láctico, aumentando el grado de polimerización, la calidad del PLA y evitando la degradación térmica.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Así mismo, las películas compuestas de PLA-quitosano exhibieron una mayor resistencia a la tracción, menor alargamiento a la rotura y mayor módulo de Young que las películas de PLA puro. Sin embargo, esta mejora no ocurre simultáneamente en las tres propiedades, pues depende de la combinación realizada, tal como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6

Propiedad mecánica de la membrana de ácido poliláctico/quitosano con combinación variable.

PLA/quitosano	Resistencia a la tracción (MPa)	Alargamiento (%)	Módulo de Young (MPa)
100/0	24.682	261,32	9.41
80/20	20.111	280.13	11.12
60/40	17.809	300.11	5.9
50/50	22.048	222.10	9.9
40/60	26.132	170.11	15.3
20/80	28.223	83.12	33.3
0/100	300.21	72.00	41,6

Nota. Tomado de (Sudharsan Kasirajan, *et al.*, 2019).

Por otra parte, hay campos de producción en los que el uso del PLA parece prometedor, como lo estimaron Barletta, *et al.*, 2020. Sin embargo, la fuerte tendencia del PLA a degradarse compromete la posibilidad de recuperar el llamado material post proceso (residuos), significando que el PLA y la mayoría de los bioplásticos sean difíciles de usar en procesos de manufactura que requieren una reutilización fisiológica del material, como, por ejemplo, el termoformado, donde se produce una gran cantidad de material de desecho durante la fase de recorte.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Tabla 7

Valores de las propiedades reológicas y mecánicas de los compuestos de ácido poliláctico virgen (Sin CE), HDI, IPDI y TDI.

CE	Proporción (%)	Resistencia a la atracción (MPa)	Elasticidad (GPa)	Temperatura de descomposición (°C)	Absorción de agua (%)
Sin CE	0	45.6	2.8	343.7	1.2
HDI	0,5	50.4	3.1	345.1	0.9
HDI	1	54.2	3.4	346.3	0.7
HDI	2	57.8	3.8	347.6	0.5
IPDI	0,5	49.6	3.0	344.9	0.9
IPDI	1	53.4	3.3	346.1	0.7
IPDI	2	56.9	3.7	347.4	0.5
TDI	0,5	47.2	2.9	344.1	1.1
TDI	1	50.8	3.2	345.3	0.8
TDI	2	53.9	3.5	346.5	0.6

Nota. Tomado de (Barletta, *et al.*, 2020)

En el contexto mencionado en el párrafo anterior, han sido analizadas dos técnicas de producción: extrusión de doble tornillo y extrusión de láminas por fundición, con enfoque en las propiedades reológicas y térmicas de formulaciones de materiales bioplásticos compostables basados en PLA, agregando tres aditivos de extensor de cadena (CE): diisocianato de hexametileno (HDI), diisocianato de isoforona (IPDI) y diisocianato de tolueno (TDI). Los CE se añadieron al PLA reciclado en diferentes proporciones (0.5, 1 y 2 %) y se mezclaron mediante extrusión de doble tornillo. Luego, se obtuvieron láminas de PLA reciclado mediante extrusión de láminas por fundición y se caracterizaron sus propiedades mecánicas, térmicas y de degradación como se observa en la Tabla 7, buscando mejorar propiedades como el aumento del peso molecular y la viscosidad.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

La extrusión de doble tornillo consiste en hacer pasar un polímero fundido a través de dos tornillos que giran en el mismo sentido dentro de un cilindro calentado. Los tornillos pueden tener diferentes elementos para transportar, mezclar, fundir, reaccionar y desgasificar el polímero. El polímero sale por una boquilla al final del cilindro y se corta en gránulos o se moldea en otras formas. Mientras que la extrusión de láminas por fundición consiste en hacer pasar un polímero fundido a través de una boquilla plana que le da forma de lámina. La lámina se enfría sobre un rodillo refrigerado y se enrolla o se corta según el espesor y el ancho deseados. La extrusión de láminas se puede combinar con la extrusión de doble tornillo para producir láminas con varias capas de diferentes polímeros. Los autores expusieron que el proceso de compuesto de doble tornillo induce una menor degradación en el material, en comparación con la extrusión por fundición. Además, los hallazgos experimentales mostraron que agregar el extensor de cadena durante la extrusión por fundición resultó ser una estrategia efectiva de recuperación de material post proceso, sugiriendo que el HDI y el IPDI son los CE más adecuados para este propósito, ya que presentan una mayor compatibilidad con el PLA (Tabla 7).

Por otro lado, el trabajo de Ecker, *et al.*, 2019 se enfocó en caracterizar las propiedades mecánicas y el comportamiento de absorción de agua del PLA y los compuestos de PLA/madera, producidos mediante dos procesos: moldeo por inyección (MI) e impresión 3D (I3D), almacenados en agua (AH₂O) y sin almacenar (SA). El estudio examina las propiedades mecánicas del PLA y PLA/madera como la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, resistencia al impacto y la dureza, determinando cómo la adición de fibras de madera afecta dichos parámetros (Tabla 8). Además, los autores analizaron cómo el PLA y los compuestos

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

de PLA/madera absorben agua con el tiempo (Figura 7), pues esto es importante en aplicaciones donde la resistencia a la humedad es relevante, como en entornos exteriores o envasado. Se encontró que el contenido de madera reduce las propiedades mecánicas de PLA y compuestos PLA/madera. Las piezas impresas en 3D presentan menores propiedades mecánicas que las moldeadas por inyección, debido a la estructura anisotrópica y la presencia de huecos y defectos; además, muestran una mayor capacidad de absorción de agua en comparación con las moldeadas por inyección, incrementándose proporcionalmente con el contenido de madera.

Tabla 8

Valores de las propiedades mecánicas de los filamentos compuestos de ácido poliláctico puro (PLA) y PLA/madera, según el método de producción y el tipo de almacenaje.

Código compuesto	PLA (%)	Madera (%)	Método	Resistencia a la tracción (MPa) AH2O - SA	Resistencia al impacto ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$) AH2O - SA
PLA_IM	100	0	MI	67-69	30-31
PLA_3D	100	0	I3D	56-58	14-17
PLA/15W_IM	85	15	MI	44-55	8-12
PLA/15W_3D	85	15	I3D	17-26	4-7
PLA/30W_IM	70	30	MI	34-56	7-11
PLA/30W_3D	70	30	I3D	9-20	2-4

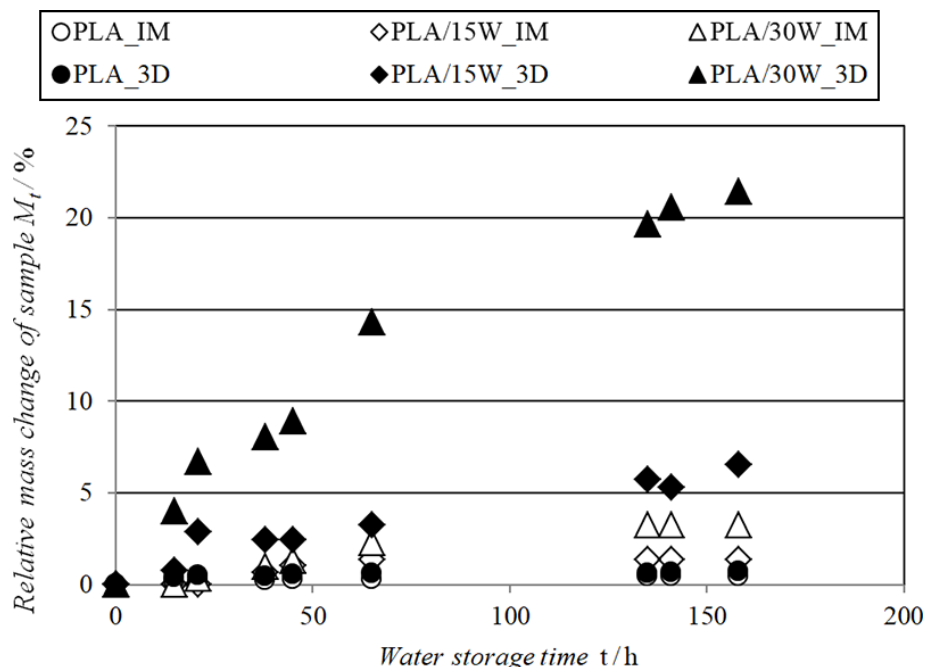
Nota. Adaptado de Barletta, *et al.*, (2020)

De este estudio se concluye que las diferencias en el rendimiento mecánico entre las muestras impresas en 3D y las moldeadas por inyección son mayores en el caso de los compuestos de PLA/madera que con el PLA sin relleno. Adicionalmente, los biocompuestos con PLA muestran mejores propiedades mecánicas usando el moldeo por inyección como proceso de producción.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Figura 7

Absorción de agua a través del tiempo



Nota. Tomado de Barletta, *et al.*, (2020)

Otros trabajos han incorporaron nano fibras de celulosa (a partir de residuos de biomasa como paja de arroz) en la matriz polimérica mediante un tratamiento químico ácido, buscando mejorar la estructura y las propiedades mecánicas del PLA (Fernández, *et al.*, 2022). Este tratamiento consiste en el uso de una solución de ácido sulfúrico al 64 % para hidrolizar la celulosa de la paja de arroz y así obtener nanofibras de celulosa (NfC). Para mejorar la incorporación de las fibras en la matriz, se utilizaron diferentes agentes de acoplamiento: polietileno injertado con anhídrido maleico (PE-g-MA), viniltrimetoxisilano (VTMS), polietilenglicol (PEG), y dos tipos de copolímeros basados en α -olefina-anhídrido maleico sintetizados experimentalmente: OMAC y OMACE. Se encontró que la mejora en las

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

propiedades depende de la temperatura, debido a las interacciones químicas y físicas entre las NfC, la matriz de PLA y los agentes de acoplamiento.

Tabla 9

Cambio de las propiedades de los compuestos de PLA reforzados con nano celulosa y agentes de acoplamientos, según el cambio de la temperatura

Código compuesto	Resistencia a la tracción (Mpa)			Resistencia a la tensión (Mpa)		
	-10 °C	20 °C	50 °C	-10 °C	20 °C	50 °C
PLA puro	18.1	16.8	12.7	30.3	25.1	19.5
NfC/PLA	17.4	15.8	9.20	25.8	25.3	17.1
PE-g-MA/NfC/PLA	18.9	18.4	13.4	41.5	39.3	27.2
VTMS/NfC/PLA	21.6	21.5	13.5	38.2	34.9	23.1
PEG-300/NfC/PLA	20.3	16.6	10.4	33.1	28.6	18.7
PEG-200/NfC/PLA	21.1	16.1	8.70	32.8	29.2	19.7
OMAC/NfC/PLA	23.7	18.3	12.6	40.7	34.8	24.6
OMACE/NfC/PLA	23.2	18.1	12.1	42.8	30.7	22.6

Nota. Adaptado de (Fernández, et al., 2022)

Con base en la información de la Tabla 9, se evidencia que los productos químicos añadidos a los compuestos NfC/PLA pueden mejorar la resistencia a la tracción a -10 °C en cada caso, pero se encontró menor resistencia a la tracción a 20 °C con la adición de PEG-300 y PEG-2000; demás, sólo la aplicación de PE-g-MA y VTMS en el compuesto NfC/PLA pudo aumentar la resistencia a la tracción a 50 °C, en comparación con el PLA. Por otra parte, al observar la resistencia a la tensión es notable la mejora respecto al PLA puro en todos los compuestos a 20 °C, siendo el PE-g-MA/C/PLA el de mayor resistencia a la flexión (41.3, 39.1 y 26.9 MPa a 10 , 20 y 50 °C, respectivamente) frente a los otros agentes de acoplamiento. Es importante señalar que la aplicación de copolímero de α -olefina-anhídrido maleico y copolímero de éster de α -olefina-anhídrido maleico tuvo un efecto positivo sobre la resistencia

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

a la tracción y el módulo de Young a -10 °C, mientras que el compuesto VTMS/NFC/PLA mostro la mejor resistencia a la tracción: 21.5 y 13.5 MPA a 20 y 50 °C, respectivamente.

Otra mezcla estudiada fue el uso de cascarilla del café (subproducto de la etapa de tostado) como relleno para los compuestos biodegradables de PLA o una mezcla de PLA y polibutileno succinato (PBS). La adición de cascarilla mejora el módulo elástico, la cristalinidad y la biodegradabilidad de los compuestos, al tiempo que reduce el coste y el impacto ambiental de los materiales. Ghazvini, *et al.*, 2022, encontraron que la adición de cascarilla aumentó el módulo elástico en un 28 % para PLA puro, y en un 35 % para PLA/PBS; pero disminuyó la resistencia a la tracción en un 25 y 30 %, respectivamente. Además, la adición de cascarilla indujo la cristalización del PLA y del PBS, incrementando el grado de cristalinidad de los compuestos en un 15 y 20 %, respectivamente. Una baja cristalinidad del PLA da como resultado una termo estabilidad limitada. Así mismo, el estudio demostró que la adición de cascarilla aceleró la biodegradación de los compuestos, provocando una pérdida de masa del 40 % para PLA puro y del 50 % para PLA/PBS después de 6 semanas de compostaje, mientras que los compuestos sin cascarilla perdieron solo el 10 (puro) y 20 % (PLA/PBS).

La celulosa bacteriana (BC) también se ha explorado como un material de refuerzo en biopolímeros. Tela de lino se utilizó como material de soporte para depositar BC en su superficie, producida por *Gluconacetobacter liquefaciens* (MTCC 3135) mediante un proceso de fermentación durante 1 semana. La superficie de la tela se alteró para obtener una variante modificada con BC y PLA. Los biocompuestos que contenían tela de lino y PLA fueron elaborados mediante el método de fundición, según lo descrito por Kumar, *et al.*, 2010. Estos biocompuestos de PLA reforzados con tela de lino modificado mostraron una mejora en la

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

resistencia de la tracción (cercana al 10 %), una mayor temperatura de descomposición y un aumento significativo de su biodegradabilidad (más de un 15 %); además, se observa una disminución en la elongación como se evidencia en la Tabla 10. Así mismo, la menor absorción de agua (13.40 ± 0.83 %) se observó en el caso de los biocompuestos de PLA reforzados con tela de lino (MFF-PLA), lo que implica un posible uso como membranas hidrofóbicas a partir de recursos renovables.

Tabla 10

Resultados de las propiedades mecánicas de PLA puro y biocompuesto de BC y tela de lino.

Propiedad	PLA puro	Biocompuesto con 10 % de BC y 20 % de tejido de lino
Resistencia a la tracción (MPa)	48.5	59.8
Elongación (%)	6.2	3.8
Temperatura de descomposición (°C)	351.6	355.8
Biodegradabilidad (% Pérdida de masa en 90 días)	3.2	18.6

Nota. Tomado de (Kumar, *et al.*, 2010)

Entre otros estudios se encuentra la preparación y caracterización de nanocompuestos de PLA reforzados con *nanoclays* (nanopartículas formadas por óxido de aluminio y óxido de silicio), usando una tecnología de *masterbatch*, la cual consiste en utilizar concentrados de aditivos dispersos en una matriz de PLA durante el proceso de extrusión. Este método se propone como una forma de mejorar la dispersión y la exfoliación de las *nanoclays* en la matriz de PLA, lo que a su vez favorece las propiedades de barrera, mecánicas y térmicas del material. Las *nanoclays* polares tienen una mayor dispersión y una estructura más intercalada que las *nanoclays* no polares, lo que se traduce en una mayor resistencia a la tracción: el PLA puro

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

tiene una resistencia a la tracción de 48.5 MPa, mientras que los nanocompuestos con 0.5, 1 y 2 % de nanoclays polares presentan una resistencia a la tracción de 51.2, 53.8 y 56.4 MPa, respectivamente. Respecto a la deformación a la tracción, esta aumenta entre un 5.1 y 15.3 % (Oliver-Ortega, *et al.*, 2021).

Por otra parte, Zhou, et al., 2021, buscaron lograr compuestos de PLA que tuviesen simultáneamente tres propiedades clave: retardante de llama, protección UV y refuerzo estructural, con el fin de mejorar las propiedades térmicas y de combustión, evitar el deterioro y el envejecimiento del biopolímero, y aumentar la resistencia y rigidez. Para ello emplearon derivados de fuentes biológicas: ácido tánico/sal férrica (TAFe) y quitosano/ácido fítico (CTSPA). El TAFe y el CTSPA forman complejos de coordinación con los grupos hidroxilo del PLA, mejorando la interacción entre la matriz y los rellenos, así como la cristalinidad y su estabilidad térmica. Adicionalmente, el TAFe y el CTSPA también actuaron como agentes ignífugos y anti-UV, respectivamente, reduciendo la inflamabilidad, evaluada mediante ensayos de combustión que miden la liberación de calor, humo y CO. La calorimetría de cono indicó que 2.5 % en peso de TAFe y CTSPA reduce la tasa máxima de liberación de calor y la liberación total de calor es, aproximadamente, un 19 (TAFe) y 37 % (CTSPA) del PLA. Por otra parte, la degradación fototérmica se evaluó mediante ensayos de exposición a la luz UV, donde el TAFe muestra una fuerte banda de absorción (250 – 350 nm), que se superpone con los rangos UVB y UVA, significando que mejora el rendimiento de bloqueo de los rayos UV del PLA. Es a resaltar que la estrategia sostenible empleada ilustra el concepto de fabricar compuestos poliméricos totalmente biobasados mediante un proceso sin solventes, que podría aplicarse también al diseño ecológico de otros sistemas poliméricos multifuncionales.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Otros estudios han evaluado las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de compuestos producto de la mezcla de ácido poliláctico y polibutileno succinato (PBS), rellenos con diferentes contenidos de pulpa de kraft de bambú dulce (SBKP). Los PLA/PBS rellenos con SBKP se prepararon mediante un proceso de extrusión y moldeo por inyección. Así mismo, se estudiaron los efectos causados a partir de la combinación de SBKP (0, 5, 10, 15 y 20 % en peso) en el compuesto PLA/PBS y el tratamiento de acoplamiento con anhídrido maleico (compuesto orgánico) injertado con polietileno (MAPE), buscando mejorar la adhesión entre la pulpa de kraft de bambú dulce y la mezcla de PLA/PBS, pues son materiales con diferente polaridad y afinidad (Jansiri, *et al.*, 2021). El anhídrido maleico actúa como un puente químico entre los grupos hidroxilo de la pulpa y los grupos éster de los biopolímeros, formando enlaces covalentes y aumentando la compatibilidad interfacial. Se obtuvo que la resistencia a la tracción de los compuestos disminuyó de 32.8 a 19.6 MPa cuando el contenido de SBKP aumentó de 0 a 20 %, mientras que la resistencia a la flexión se incrementó de 48.9 a 66.4 MPa. El tratamiento con MAPE acrecentó la resistencia a la tracción de los compuestos en un 10 %, mejorando la rigidez y disminuyendo la absorción de agua; el PLA/PBS puro absorbe un 50 % respecto a una muestra totalmente seca, mientras que para el compuesto de pulpa tratada con anhídrido se reduce al 35 %. La cristalinidad de los compuestos disminuyó del 31.4 al 25.7 % cuando el contenido de SBKP aumentó del 0 al 20 %, mientras que el tratamiento con MAPE no tuvo un efecto notable sobre la cristalinidad. Además, la adición de SBKP y el tratamiento con MAPE no afectaron significativamente la temperatura de transición vítrea ni la estabilidad térmica de los compuestos (Jansiri, *et al.*, 2021).

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Murariu, *et al.*, 2021, originaron nanocompuestos de PLA y óxido de zinc (ZnO) usando un método alternativo llamado *masterbatch* (MB), que consiste en mezclar previamente el ZnO en el PLA y luego usar esa mezcla como base para fabricar películas de nanocompuestos. Buscaron añadir valor a la producción de nanocompuestos de PLA-ZnO, que tienen propiedades multifuncionales como protección UV, acción antibacteriana y barrera de gases. Estas características los hacen interesantes para su uso como películas, fibras textiles y objetos moldeados por inyección. El método MB permite reducir el tiempo de residencia del PLA de 10 (método tradicional) a 2 min, aproximadamente, teniendo en cuenta que las películas de nanocompuestos son sensibles al calor y se degradan en contacto con las nanopartículas de ZnO. Así mismo, se logró producir PLA con hasta 40 % en peso de ZnO tratado con silano, usando extrusoras de doble tornillo. Comparados con el método tradicional de varios pasos, los nanocompuestos producidos por el método MB mostraron mejores propiedades: en la viscosidad relativa se halló una diferencia de 2.3 a 3.3, permitiendo concluir que los pesos moleculares son mayores; además, se tiene una menor estabilidad térmica, pasando de una descomposición inicial a 326 °C para el PLA puro, a un rango de 270 a 280 °C con el método MB. Así mismo, hay una buena distribución del nanorelleno y una leve mejora en la resistencia a la tracción (de 57 a 60 MPa).

4.5 Análisis ciclo de vida (ACV)

Rebolledo, *et al.*, 2023, examinaron el papel de una planta de reciclaje químico en el desempeño ambiental del PLA considerando una etapa temprana de diseño. Los autores utilizaron la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para comparar las consecuencias

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

inmediatas y a largo plazo, evaluando efectos ambientales directos e indirectos del sistema. Los resultados mostraron que la producción de ácido láctico, que es el principal paso intermedio para producir PLA, es el proceso con mayor impacto desde el punto de vista ambiental, debido al pretratamiento de la biomasa (paja de trigo) y las etapas de separación y purificación. Sin embargo, la integración de una planta de reciclaje disminuye de 1.38 a 0.44 kg CO₂ eq por kg de PLA.

Por otra parte, también se encuentra un análisis del ciclo de vida (ACV) que abarca desde la extracción de la fibra Durian (DSF) hasta la disposición final del PLA. El ACV mostró que el potencial de calentamiento global (GWP) y el potencial de acidificación (AP) son los principales impactos del biocompuesto PLA/DSF, como se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11

Análisis del ciclo de vida (ACV) de los biocompuestos.

Biocompuestos	GWP	AP
PLA/DSF	199.37 kg CO ₂ eq	0.58 kg SO ₂ eq
PLA/DSF/EPO	195.89 kg CO ₂ eq	0.57 kg SO ₂ eq

Nota. Tomado de (Anuar, *et al.*, 2021)

. El GWP y el AP son dos indicadores que miden el impacto ambiental de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. El GWP representa la cantidad de calor que puede atrapar un determinado gas en comparación con el dióxido de carbono (CO₂), usado como referencia. El AP indica la capacidad de un gas de contribuir a la formación de lluvia ácida y a la acidificación de los suelos y las aguas. El GWP y el AP se debieron, principalmente, al uso de electricidad en la fabricación de los biocompuestos de PLA/DSF; la electricidad se genera

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

a partir de la quema de combustibles fósiles, que emiten CO₂ y otros GEI a la atmósfera (Anuar, *et al.*, 2021).

Por otra parte, se ha realizado un ACV para productos verdes basados en ácido PLA compuesto con fibras naturales como agujas de pino (PN) o fibras de kenaf (KB). Operato, *et al.*, 2023, compararon su impacto ambiental con el PLA puro y el polietileno de alta densidad (HDPE), un plástico convencional. Los resultados mostraron que los materiales compuestos PLA-PN y PLA-KB registran menor huella de carbono, un menor consumo de energía primaria y un menor potencial de calentamiento global, donde PLA-PN presenta los mejores resultados con una huella de carbono de 1.2 kg CO₂ eq/kg, menor consumo de energía (43 MJ/kg), menos uso de recursos fósiles (0.9 kg petróleo eq/kg) y la mínima generación de residuos, seguido de PLA-KB (muestra resultados cercanos). La Tabla 12 resume los parámetros que fueron valorados para los cuatro materiales.

Tabla 12

Datos de los compuestos verdes de PLA-PN y PLA-KB comparados con PLA puro y HDPE.

Indicador	PLA puro	HDPE	PLA-PN	PLA-KB
Huella de carbono (kg CO ₂ eq/kg)	2.7	4.8	1.2	1.3
Consumo de energía (MJ/kg)	69	120	43	45
Uso de recursos fósiles (kg petróleo eq/kg)	2.7	5.1	0.9	1
Generación de residuos (kg/kg)	0.2	0.6	0.02	0.03

Nota. Tomado de (Operato, *et al.*, 2023)

4.6 Aplicaciones del ácido poliláctico

Dada las propiedades mostradas por el PLA puro y las que pueden alcanzarse al combinarse con otros compuestos, se han generado estudios enfocados en sus aplicaciones. Se analizaron algunos usos novedosos (Tabla 13), complementándose con un estudio TRL (Technology Readiness Levels), que consiste en una escala para medir el grado de madurez de una tecnología a partir de niveles, desde el Nivel 1, que representa la idea básica o principios teóricos de la tecnología, hasta el 9, que indica el haber alcanzado un estado de madurez completo y es apta para su uso comercial (Ayming, 2021) (Apéndice B).

Tabla 13

Aplicaciones novedosas con PLA

Aplicación	Área de aplicación prevista	Nivel TRL	Fuente
Groasis Waterboxx (GW)	Agricultura	1 a 2	(Dastjerdi, <i>et al.</i> , 2023)
Envasado de alimentos	Industria de alimentos	2 a 3	(Anuar, <i>et al.</i> , 2021)
Envasado de alimentos	Industria de alimentos	3 a 4	(Patel, <i>et al.</i> , 2022)
Microcontenedores	Medicina-Fármacos	3 a 4	(Gai M. <i>et al.</i> , 2019)
Envasado de alimentos	Industria de alimentos	3 a 4	(Aversa, <i>et al.</i> , 2023)
Sensor electroquímico	Industria de los Combustibles	3 a 4	(João, <i>et al.</i> , 2021)

Una de las aplicaciones reportadas consiste en evaluar la producción de *Groasis Waterboxx* (GW), una tecnología que ahorra agua y usa materiales ecológicos como una estrategia efectiva para contrarrestar el impacto negativo de la agricultura en el medio ambiente

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

y la sociedad. Se valoró el moldeo por inyección haciendo uso de PLA, con el objetivo de reemplazar el polipropileno (PP). Mediante simulaciones en Modflow se expuso una restricción en el uso del PLA, debido a la limitada capacidad para resistir tensiones térmicas, evidenciando la necesidad de estudios con la adición de otros compuestos y pruebas experimentales que corroboren esta información (Dastjerdi, *et al.*, 2023).

Las aplicaciones en la industria de alimentos son las que han tenido mayor interés, encontrando tres estudios en diferentes niveles. En el primero se desarrolló un biocompuesto reforzado con fibra de piel de durián (DSF) a nivel laboratorio, evaluando el ciclo de vida mediante el software GaBi, permitiendo concluir que el biocompuesto PLA/DSF puede ser un material potencial de envasado de alimentos biodegradable, ya que tiene propiedades favorables y no produce residuos (Anuar, *et al.*, 2021). El segundo trabajo consistió en producir, a escala piloto, películas nano compuestas basadas en PLA- poli(hidroxibutirato) (PHB), reforzadas con nano cristales de celulosa (CNC) y nano cristales de quitina (ChNC), destinadas también al envasado de alimentos; los resultados indicaron que la película multifuncional PLA-PHB-OLA-ChNC, preparada mediante extrusión asistida por líquido y soplado de película, tiene un gran potencial como película flexible y abre una nueva perspectiva para su aplicación industrial como envasado de alimentos a corto plazo (Patel, *et al.*, 2022). Finalmente, un tercer trabajo analizó el material compuesto por PLA y poli (3-hidroxibutirato-co-4-hidroxibutirato) - P(3HB-co-4HB) -, fabricando películas a escala laboratorio; la investigación mostró que el material PLA/P (3HB-co-4HB) muestra un aumento en la transparencia de 80 a 90 %, un incremento en la resistencia al impacto del 55 %, así como una disminución en la permeabilidad del oxígeno y el dióxido de carbono en un 50 %, respecto

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

al PLA puro. Estos resultados se traducen en una mayor visibilidad de los alimentos, más dureza y resistencia durante el transporte, y un incremento en la protección frente a la oxidación, humedad y microorganismos (Aversa, et al., 2023).

Por otra parte, el estudio de Gai, *et al.*, 2019, presentó la preparación de complejos poli electrolíticos (PEC) basados en polietileno (PE) a escala laboratorio. Estos PEC son sellados en un solo paso mediante un recubrimiento por inmersión en una solución de PLA, además de la introducción de nanopartículas de oro, lo que facilita la carga de pequeñas moléculas hidrófilas y permite la liberación local controlada de carga mediante láser. Esto abre las posibilidades para aplicaciones en la medicina, debido al potencial que los micro contenedores de PLA tienen para la administración controlada de sustancias bioactivas.

Otra aplicación es la presentada por João, *et al.*, 2021, quienes desarrollaron un sensor electroquímico impreso en 3D con material de grafeno integrado en ácido poliláctico (G/PLA) para el control de biocombustibles. El estudio demostró que el sensor posee alta precisión, exactitud y selectividad; por lo tanto, el uso de electrodos desechables permite detectar terc-butilhidroquinona (TBHQ), un antioxidante utilizado en el biodiesel de soja y coco para evitar la oxidación de los ácidos grasos que lo componen. Los sensores impresos en 3D que utilizan PLA son muy prometedores para la generación de sensores electroquímicos sostenibles, mostrando un rendimiento similar a los electrodos convencionales.

5. Desafíos

La producción de PLA presenta algunas dificultades como el alto costo de las materias primas, que provienen de fuentes naturales y tienen un mercado y una demanda distinta. Además, la fermentación de las materias primas nuevas, que suelen tener poca o ninguna demanda, tiene una baja eficiencia y requiere mayor desarrollo tecnológico. Además, es necesario purificar el ácido láctico, pues contiene impurezas que pueden afectar la calidad y las propiedades del PLA. Así mismo, el proceso es largo (dura más de 7 horas) y genera subproductos indeseables, como sales de sulfato de calcio cuando se usa ácido sulfúrico para purificar el ácido láctico, o compuestos de bajo peso molecular al realizar una policondensación directa, lo que conlleva a que la calidad del PLA se vea afectada y se hacen necesarios etapas adicionales de purificación (Bolívar, *et al.*, 2022).

Por otra parte, el PLA presenta algunas desventajas que restringen su uso en ciertas aplicaciones, debido a los problemas relacionados con su rendimiento ambiental y funcional. Entre dichos inconvenientes se encuentra el alto consumo de energía y productos químicos en su producción, la baja resistencia al calor y al impacto, la alta sensibilidad a la degradación por el agua y la falta de infraestructura para su reciclaje. En particular, el rendimiento funcional se refiere a la capacidad del PLA para cumplir con los requisitos de calidad y desempeño de algunos productos, como la resistencia al calor y al impacto, la estabilidad y la durabilidad. Estos requisitos se pueden medir y evaluar mediante el uso de herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que compara las ventajas y desventajas del PLA con otros materiales alternativos. Por lo tanto, la solución de estos problemas debe orientarse hacia el desarrollo de

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

nuevas tecnologías y estrategias que mejoren el proceso de producción y reciclaje del ácido poliláctico (Rebolledo, *et al.*, 2023).

Respecto a la producción de PLA a partir de fuentes sostenibles, esta es aún una tecnología en desarrollo con potencial para aplicarse a escala industrial. Según los resultados encontrados, el proceso presenta diferentes niveles de madurez según la técnica y materia prima utilizada. Los trabajos reportados tienen un TRL de 3 a 4, significando que la tecnología se ha probado a escala laboratorio, comprobando su funcionalidad en condiciones controladas. Sin embargo, aún hay espacio para la mejora y la innovación, especialmente en lo que se refiere a la optimización de los procesos, la reducción de los costes, el aumento de la eficiencia y la calidad, y el desarrollo de nuevos catalizadores y métodos de polimerización. Siendo la misma situación para sus aplicaciones en diversos campos, como su uso para el embalaje de alimentos, ya que el PLA tiene baja barrera de oxígeno y al vapor de agua, lo que afecta la conservación de los víveres. En el sector textil, por ejemplo, su baja resistencia al calor dificulta el teñido y planchado; y en aplicaciones médicas, al ser un material hidrófobo, puede afectar la esterilización y la biocompatibilidad de los implantes y dispositivos. Así mismo, se presentan desafíos para su aplicación en la agricultura, pues su baja degradabilidad en el suelo puede generar residuos. (Barletta, *et al.*, 2020; Ecker, *et al.*, 2019; Fernández, *et al.*, 2022).

Finalmente, los retos para la escalabilidad del proceso son, principalmente, de tipo económico, ya que se necesita aumentar la competitividad del PLA frente a los plásticos convencionales, reduciendo los costes de producción relacionados con la fermentación, la polimerización (requiere altas temperaturas y catalizadores), y el secado al vacío para la eliminación de agua. En lo referente a la fermentación, es necesario seleccionar un sustrato de

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

bajo valor en el mercado y optimizar las condiciones de procesamiento, como la temperatura, el tiempo de producción, la presión y el tipo de agente de acoplamiento para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de los compuestos verdes. Por otra parte, es importante la ampliación del mercado (desarrollando nuevos productos de envasado, por ejemplo) y minimizar el impacto ambiental del proceso, aun cuando este sea menor al de los plásticos convencionales; es necesario reducir mucho más el consumo de energía y recursos, evaluando la biodegradación del PLA, el impacto del uso de las materias primas, subproductos y desechos, y reduciendo el daño al hábitat circundante (Sudharsan, *et al.*, 2019; Operato, *et al.*, 2023; Ecker, *et al.*, 2019; Patel, *et al.*, 2022)

6. Conclusiones

Siguiendo el protocolo PRISMA, se realizó una revisión sistemática que mostró un aumento de las investigaciones en Italia, con un 19 % de las publicaciones seleccionadas para este estudio. Asimismo, se resalta que Science Direct fue la base de datos con más investigaciones, con un 31 % de los artículos publicados, y que revistas como Journal of Applied Polymer Science, Journal of Cleaner Production y Polymers son las más destacadas en la divulgación de información. Además, Composites Part B: Engineering y Journal of Applied Polyme, tienen el mayor número de citas.

Respecto a la producción de PLA a partir de fuentes sostenibles, el rendimiento más elevado se consigue mediante polimerización por apertura de anillo, logrando hasta un 45 % en volumen de producto. Para alcanzar estas concentraciones, se requiere una materia rica en azúcar y la optimización de las condiciones de fermentación, con una temperatura de 62 °C y un pH de 7. Así mismo, el uso de paja de trigo como biomasa es la que muestra mejores resultados, y la policondensación se destaca como el método más efectivo y con mayor potencial para la escalabilidad industrial en la producción sostenible de PLA.

Finalmente, se observó que las tecnologías actuales están en una fase inicial de desarrollo, con un TRL entre 2 y 3, significando que han sido validadas en un entorno relevante y se enfocan en prototipos con potencial de escalabilidad futura. Así mismo, para la producción y el uso del PLA se deben superar dos tipos de desafíos: económicos, relacionados con la competitividad, calidad, costo, disponibilidad y mercado de la biomasa y el PLA; y ambientales, afines con el impacto ecológico del proceso y el análisis del ACV de los biomateriales producidos. Estos desafíos exigen investigaciones más detalladas sobre el tipo

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

de biomasa, condiciones de operación, y transporte y distribución. Además, se deben considerar los aspectos que obstaculizan el desarrollo de la industria de producción de PLA: el alto costo de las materias primas, que compiten con la producción de alimentos; la baja eficiencia de la fermentación de las materias primas nuevas, que requiere más investigación; la necesidad de purificar el ácido láctico, implicando el uso de productos químicos y energía; la baja resistencia al calor y al impacto del PLA, limitando su uso en ciertas aplicaciones y sectores; la alta sensibilidad a la degradación por el agua del PLA, que reduce su estabilidad y durabilidad; y la falta de infraestructura para el reciclaje del PLA, dificultando su gestión como residuo y su reintegración en el ciclo de vida.

7. Recomendaciones

Además de la revisión sistemática, se sugiere realizar un estudio económico y energético sobre la producción y aplicaciones de ácido poliláctico (PLA) a partir de fuentes sostenibles. Esto ayudaría a conocer los aspectos que determinan el costo de producción de PLA, así como sus efectos ambientales y sociales.

Se propone un análisis enfocado en las fuentes de biomasa existentes en Colombia, los progresos en las tecnologías de producción de PLA y las políticas públicas que apoyan su desarrollo.

Referencias

- Gondal, A.H., Bhat, R.A., Gómez, R.L. *et al.* Advances in plastic pollution prevention and their fragile effects on soil, water, and air continuums. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20, 6897–6912 (2023).
- C. Wilcox, N.J. Mallos, G.H. Leonard, A. Rodriguez and B.D. Hardesty, *Mar. Policy* 5, 107 (2016).
- C.M. Rochman, M.A. Browne, A.J. Underwood, J.A. van Franeker, R.C. Thompson and L.A. Amaral-Zettler, *Ecology* 97, 302 (2016).
- Sarra N. Dimassi, John N. Hahladakis, Mohamed Najib Daly Yahia, Mohammad I. Ahmad, Sami Sayadi, Mohammad A. Al-Ghouti, Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review, *Arabian Journal of Chemistry*, Volume 15, Issue 11, 2022.
- Garlotta, D., 2001. A literature review of poly(lactic acid). *J. Polym. Environ.* 9, 6384.
- H. Benninga (Ed.) (1990) *A History of Lactic Acid Making*, Kluwer Academic Publishing, Boston, London, Dordrecht.
- R. Datta, S. Tsai, P. Bonsignore, S. Moon, and J. Frank (1995) *FEMS Microbiology Reviews* 16, 221–231.
- M. Kunarbekova, K. Shynzhirbai, M. Mataev, K. Bexeitova, K. Kudaibergenov, Ye. Sailaukhanuly, S. Azat, K. Askaruly, Ye. Tuleshov, S.U. Zhantikeyev, D. Ybyraiymkul, Biopolymers synthesis and application, *Materials Today: Proceedings*, 2023.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

CRIADO BAYONA, Viejo Abrante, F., & Duarte Duarte, D. P. (2021). MEMBRANES FOR SEPARATION OF ETHANOL-WATER MIXTURES VIA PERVAPORATION MEMBRANES FOR SEPARATION OF ETHANOL-WATER MIXTURES VIA PERVAPORATION: A SYSTEMATIC REVIEW [recurso electrónico]. UIS.

Yuan Ren, XiaonaWang, Yemei Li, Yu-Tú Li y Qunhui Wang Lactid Acid Production by Fermentation of Biomass: Recent Achievements and Perspectives, 2022.

Serrano Carrillo, & Díaz Sierra, L. H. (2022). *Estudio de vigilancia científica del desarrollo de alternativas tecnológicas anticorrosivas sobre acero al carbono de uso en la industria petroquímica*. Universidad Industrial de Santander.

Jiaming Yu, Shengchao Xu, Biao Liu, Hailan Wang, Fengmin Qiao, Xiulian Ren, Qifeng Wei, PLA bioplastic production: From monomer to the polymer, European Polymer Journal, Volume 193, 2023.

Juan José Yepes-Nuñez, Gerard Urrútia, Marta romero García y Sergio Alonso Fernández, Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas, 2021.

Elmagarmid, A. F. Rayyan: A systematic reviews web app for exploring and filtering searches for eligible studies for Cochrane Reviews. In Evidence-Informed Public Health: Opportunities and Challenges, 2014.

Sudharsan Kasirajan, Devika Umapathy, Chandramohan Chandrasekar, Vajiha Aafrin, Maria Jenitapeter, Lalithapriya Udhyasooriyan, Azhagu Saravana Babu Packirisamy, Sukumar Muthusamy 2019, Preparation of poly(lactic acid) from *Prosopis juliflora* and incorporation of chitosan for packaging applications.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

- Ecker, Josef Valentín; Haider, Andrés; Burzic, Ivana; Huber, Axel; Eder, Gerhard; Hild, Sabina 2019, Mechanical properties and water absorption behaviour of PLA and PLA/wood composites prepared by 3D printing and injection moulding.
- Barletta, M., Aversa, C., Puopolo, M. 2020, Recycling of PLA-based bioplastics: The role of chain-extenders in twin-screw extrusion compounding and cast extrusion of sheets.
- Anuar, H., Rashid, S.M.S.A., Nordin, N.M., Nasir, N.A.M., Asri, S.E.A.M. 2021, Potential Of Fabrication Of Durian Skin Fiber Biocomposites For Food Packaging Application Through The Electricity Impact Analysis.
- Murariu, M., Benalí, S., pintura, y., Ráquez, J.-M., Dubois, P. 2021, Adding value in production of multifunctional polylactide (PLA)ZnO nanocomposite films through alternative manufacturing methods.
- Wei, Z., Cai, C., Huang, Y., Deng, L., Fu, Y. 2021, Eco-friendly strategy to a dual-2D graphene-derived complex for poly (lactic acid) with exceptional smoke suppression and low CO₂ production.
- Jansiri, S., Deenu, A., Puangsin, B., Sungkaew, S., Kamthai, S. 2021, Characterization of sweet bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer) kraft pulp filled in poly(lactic acid)/polybutylene succinate blend composite.
- Ghazvini, A.K.A., Ormondroyd, G., Curling, S., Saccani, A., Sisti, L. 2022, An investigation on the possible use of coffee silverskin in PLA/PBS composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(22), 52264. <https://doi.org/10.1002/app.52264>
- Yurchenko, A.V., Golub, N.B., Jinping, L. 2022, DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR OBTAINING THE BIOPLASTICS BASED ON MICROBIAL BIOPOLYMERS

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

- AND LIGNIN. *Innovative Biosystems and Bioengineering*, 6(1), pp. 25–30.
<https://doi.org/10.20535/ibb.2022.6.1.253658>
- Fernandez, M.E.L., Miskolczi, N. 2022, Production of Cellulose Nano-Fibers and Its Application in Poly-Lactic-Acid: Property Improvement by New Types of Coupling Agents. *Polymers*, 14(9), 1887. <https://doi.org/10.3390/polym14091887>
- Aykanat, O., Ermeydan, M.A. 2022, Production of basalt/wood fiber reinforced polylactic acid hybrid biocomposites and investigation of performance features including insulation properties. *Polymer Composites*, 43(6), pp. 3519–3530.
<https://doi.org/10.1002/pc.26633>
- Patel, M.K., Zacccone, M., De Brauwier, L., ...Frache, A., Oksman, K. 2022, Improvement of Poly(lactic acid)-Poly(hydroxy butyrate) Blend Properties for Use in Food Packaging: Processing, Structure Relationships. *Polymers*, 14(23), 5104.
<https://doi.org/10.3390/polym14235104>
- Operato, L., Vitiello, L., Aprea, P., ...Salzano de Luna, M., Filippone, G. 2023, Life cycle assessment of poly(lactic acid)-based green composites filled with pine needles or kenaf fibers. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135901. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.jclepro.2023.135901>
- Rebolledo-Leiva, R., Ladakis, D., Ioannidou, S.-M., ...Moreira, M.T., González-García, S. 2023, Attributional and consequential life cycle perspectives of second-generation polylactic acid: The benefits of integrating a recycling strategy. *Journal of Cleaner Production*, 420,138354.
<https://doiorg.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.jclepro.2023.138354>

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

- Kim, T., Bhatt, A., Tao, L., Benavides, P.T. 2022, Life cycle analysis of polylactic acids from different wet waste feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, 380, 135110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135110>
- Wannawitayapa, W., Yoksan, R. 2022, Toughening polylactic acid by melt blending with polybutylene adipate-co-terephthalate and natural rubber, and the performance of the resulting ternary blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(31), e52693. <https://doi.org/10.1002/app.52693>
- Aversa, C., Barletta, M., Koca, N. 2023, Processing PLA/P(3HB)(4HB) blends for the manufacture of highly transparent, gas barrier and fully bio-based films for compostable packaging applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(13), e53669. <https://doi.org/10.1002/app.52693>
- Rocha, R.G., Ribeiro, J.S., Santana, M.H.P., Richter, E.M., Muñoz, R.A.A. 2021, 3D-printing for forensic chemistry: Voltammetric determination of cocaine on additively manufactured graphene-polylactic acid electrodes. *Analytical Methods*, 13(15), pp. 1788–1794. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1039/D1AY00181G>
- Dastjerdi, M., Mohammad-Ali Dastjerdi, A., Mohammad-Ali Dastjerdi, P., ...Shiroud Heidari, B., Davachi, S.M. 2023, Feasibility of developing green water batteries based on polylactic acid and polybutylene succinate: A computational study on groasis waterboxx technology. *Materials Today Communications*, 36, 106537. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106537>
- Silva, A.P.B., Montagna, L.S., Passador, F.R., Rezende, M.C., Lemes, A.P. 2021, Biodegradable nanocomposites based on PLA/PHBV blend reinforced with carbon

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

- nanotubes with potential for electrical and electromagnetic applications. *Express Polymer Letters*, 15(10), pp. 987–1003.
- M. Kunarbekova ,K. Shynzhyrbai y,M. Mataev y,K. Bexeitova b,K. Kudaibergenov a b,S.M. Sailaukhanuly a c,S. Azat a b d,K. Askaruly a,S.M. Tuleshov a,SU Zhantikeyev a b,D. Ybyraiymkul a, 2023. Biopolymers synthesis and application. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.367>
- Kumar, R., Kumari, P., Priyaragini, S., Dinesh Kumar, K. 2019 Fabrication of poly lactic acid incorporated bacterial cellulose adhered flax fabric biocomposites, doi:10.1016/j.bcab.2019.101277
- Kumar, R., Kumari, P., Priyaragini, S., Dinesh Kumar, K. (2019) Fabrication of poly lactic acid incorporated bacterial cellulose adhered flax fabric biocomposites doi:10.1016/j.bcab.2019.101277.
- Gai, M., Li, W., Frueh, J., Sukhorukov, G.B. (2019) Polylactic acid sealed polyelectrolyte complex microcontainers for controlled encapsulation and NIR-Laser based release of cargo doi:10.1016/j.colsurfb.2018.10.026
- João, A.F., Matias, T.A., Gomes, J.S., ...Sousa, R.M.F., Muñoz, R.A.A. (2021) An Environmentally Friendly Three-Dimensional Printed Graphene-Integrated Polylactic Acid Electrochemical Sensor for the Quality Control of Biofuel doi:10.1021/acssuschemeng.1c03361
- Oliver-Ortega, H., Tresserras, J., Julian, F., ...Espinach, F.X., Méndez, J.A. (2021) Nanocomposites materials of pla reinforced with nanoclays using a masterbatch

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

technology: A study of the mechanical performance and its sustainability

doi:10.3390/polym13132133

Zhou, Y., Tawiah, B., Noor, N., ...Yuen, R.K.K., Fei, B. (2021) A facile and sustainable

approach for simultaneously flame retarded, UV protective and reinforced poly(lactic

acid) composites using fully bio-based complexing couples

doi:10.1016/j.compositesb.2021.108833

Anonimo. (02 de 08 de 2021). Ayming. (Coast Digital) Recuperado el 15 de 17 de 2023, de

<https://www.ayming.es/insights-y-noticias/noticias/trl-technology-readiness-levels/#9>

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Apéndice A

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
TÍTULO		
Título	1	Identificar la publicación como una revisión sistemática
RESUMEN		
Resumen estructurado	2	Ver la lista de verificación para resúmenes estructurados de la declaración PRISMA 2020.
INTRODUCCIÓN		
Justificación	3	Describir la justificación de la revisión en el contexto del conocimiento existente.
Objetivos	4	Proporcionar una declaración explícita de los objetivos o las preguntas que aborda la revisión.
MÉTODOS		
Criterios de elegibilidad	5	Especificar los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.
Fuentes de información	6	Enumerar y detallar todas las fuentes de búsqueda utilizadas, incluyendo bases de datos, registros, sitios web y organizaciones, junto con la última fecha de consulta.
Estrategia de búsqueda	7	Mostrar las estrategias de búsqueda detalladas para todas las fuentes, incluyendo filtros y restricciones aplicados.
Proceso de selección de los estudios	8	Describir cómo se evaluaron los estudios para determinar si cumplen con los criterios de inclusión, incluyendo el número de revisores, su independencia y cualquier uso de herramientas de automatización.
Proceso de extracción de los datos	9	Describir cómo se obtuvieron los datos de los informes o publicaciones, incluyendo el número de revisores, su independencia, la validación de los datos por parte de los investigadores del estudio y el uso de herramientas de automatización, si las hubo.
Lista de los datos	10a	Enumerar y explicar todos los resultados buscados, especificando si se incluyeron todos los relacionados con cada aspecto del resultado. en caso de no ser así, explicar el proceso de selección de resultados.
	10b	Enumerar y definir otras variables de interés, como características de participantes e intervención, así como fuentes de financiamiento. Explicitar cualquier suposición realizada sobre datos faltantes o inciertos.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	11	Describir los métodos de evaluación del sesgo en los estudios incluidos, incluyendo las herramientas, el número de revisores, su independencia y, si corresponde, detalles sobre la automatización.
Medidas del efecto	12	Indicar las medidas de efecto (por ejemplo, razón de riesgos, diferencia de medias) utilizadas para cada resultado en la síntesis de los resultados.
Métodos de síntesis	13a	Explicar cómo se seleccionaron los estudios elegibles para la síntesis, como comparar las características de los estudios con los grupos previstos para cada síntesis.
	13b	Describir cualquier método necesario para preparar los datos, como el tratamiento de datos faltantes o conversiones, antes de su presentación o síntesis.
	13c	Describir los métodos utilizados para tabular o presentar visualmente los resultados de los estudios individuales y su síntesis.
	13d	Describir los métodos de síntesis de resultados, justificando las elecciones. en caso de haber un metaanálisis, explicar los modelos, la evaluación de la heterogeneidad y las herramientas informáticas utilizadas.
	13e	Describir los métodos utilizados para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios (por ejemplo, análisis de subgrupos, metarregresión).
	13f	Describir los análisis de sensibilidad que se hayan realizado para evaluar la robustez de los resultados de la síntesis.
Evaluación del sesgo en la publicación	14	Describir los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (derivados de los sesgos en las publicaciones).
Evaluación de la certeza de la evidencia	15	Describir los métodos utilizados para evaluar la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace.
RESULTADOS		
Selección de los estudios	16a	Describir los resultados de los procesos de búsqueda y selección, desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.
	16b	Citar los estudios que aparentemente cumplían con los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Características de los estudios	17	Citar cada estudio incluido y presente sus características.
Riesgo de sesgo de los estudios individuales	18	Presentar las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada uno de los estudios incluidos.
Resultados de los estudios individuales	19	Presentar para todos los desenlaces y para cada estudio: a) los estadísticos de resumen para cada grupo (si procede) y b) la estimación del efecto y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza), idealmente utilizando tablas estructuradas o gráficos.
Resultados de la síntesis	20a	Para cada síntesis, resumir brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes.
	20b	Mostrar los resultados del metaanálisis, incluyendo el estimador de resumen, su precisión (como intervalos de credibilidad o de confianza) y las medidas de heterogeneidad estadística. Si se comparan grupos, describir la dirección del efecto.
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones sobre las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.
Sesgos en la publicación	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (derivados de los sesgos de en las publicaciones) para cada síntesis evaluada.
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace evaluado.
DISCUSIÓN		
Discusión	23a	Proporcionar una interpretación general de los resultados en el contexto de otras evidencias.
	23b	Argumentar las limitaciones de la evidencia incluida en la revisión.
	23c	Argumentar las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.
	23d	Argumentar las implicaciones de los resultados para la práctica, las políticas y las futuras investigaciones.
OTRA INFORMACIÓN		
Registro y protocolo	24a	Proporcionar la información del registro de la revisión, incluyendo el nombre y el número de

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

		registro, o declarar que la revisión no ha sido registrada.
	24b	Indicar dónde se puede acceder al protocolo, o declarar que no se ha redactado ningún protocolo.
	24c	Describir y explicar cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.
Financiación	25	Describir las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.
Conflicto de intereses	26	Declarar los conflictos de intereses de los autores de la revisión.
Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales	27	Indicar qué elementos de los siguientes están públicamente disponibles y dónde encontrarlos: plantillas de extracción de datos, datos extraídos de estudios incluidos, datos para análisis, código de análisis y otros materiales utilizados en la revisión.

REVISIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIONES DE ÁCIDO POLILÁCTICO

Apéndice B

Nivel TRL	Descripción
1	Se encuentran los estudios donde muestran la tecnología como una idea o concepto y no hay evidencia experimental o teórica de la misma
2	En este nivel la tecnología se ha formulado de manera precisa y se han identificado los principios científicos que hacen posible la viabilidad de la tecnología.
3	En el presente nivel, la tecnología se ha probado a escala laboratorio comprobando su funcionalidad en condiciones controladas.
4	Se ha construido un prototipo funcional, se ha probado en condiciones controladas.
5	En este nivel la tecnología se ha probado que funciona en condiciones reales.
6	En este nivel el sistema se ha construido y probado en un entorno relevante (entorno cerrado)
7	El sistema se ha probado en un entorno operativo, donde se evidencia que puede ser utilizado por usuarios finales.
8	Aquí el sistema se ha fabricado demostrando su viabilidad para ser aplicado en un entorno operativo, donde dicha tecnología puede ser aplicada de manera rentable.
9	En este último nivel el sistema ya opera de manera industrial, es económicamente viable y está siendo usado por los usuarios finales en el mercado