

## **Production of Bioplastic and their Applications as Food Packaging: PLA AND PHB**

### **Producción de bioplásticos y sus aplicaciones como empaque de alimentos: PLA Y PHB**

Mayra Chico<sup>1\*2\*</sup>; Tatiana Sampedro<sup>2\*</sup>

#### **ABSTRACT**

Food industry contributes around 40% of the containers and packaging used and discarded until 2020 worldwide. Social, environmental, and political interest towards the development of biodegradable containers is growing, as is the demand of consumers for fresh and quality food products. Bioplastics are classified according to their chemical composition, origin and synthesis process. Polyhydroxyalkanoates (PHA) are materials of microbial origin, while polylactic acid (PLA) is obtained from lactic acid and the chemical reaction of lactide that produces the biomaterial. This work explores, through a bibliographic review, the principles and production of bioplastics made from polylactic acid (PLA) and polyhydroxybutyrate (PHB) and their application in food packaging. These materials constitute particularly interesting materials due to their potential in a wide range of applications. Physical-chemical properties of the biomaterials requested to make food packaging are permeability to moisture, oxygen permeability and mechanical properties. The requirements established for the different types of packaging used in the food industry can be achieved by these biomaterials. In the same way, the environmental, economic, and industrial advantages and the challenges encountered for their massive use have been estimated. It was identified that the reduction of manufacturing costs can be achieved through the use of agricultural biomass residues as a source of substrate for fermentation processes. PLA and PHB are particularly interesting materials due to their potential in a wide range of applications in the food industry due to their biodegradation capacity and efficiency.

**Keywords:** biodegradable packaging, biomaterials, food packaging, fermentation biomaterials

---

Recibido 28 de febrero de 2022 Aceptado 09 de diciembre de 2022

---

1 Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Central del Ecuador, Quito, Código postal: EC170136,

2 Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato, 180150, Ambato

\*\*Autor para correspondencia: Telf. de contacto: +593 995426192; mfchicot@uce.edu.ec

## RESUMEN

La industria alimentaria aporta con alrededor del 40% de envases y embalajes utilizados y desechados hasta el 2020 alrededor del mundo. El interés social, ambiental y político hacia el desarrollo de envases biodegradables es creciente, de igual forma la demanda de los consumidores por productos alimenticios frescos y de calidad. Los bioplásticos se clasifican según su composición química, origen y proceso de síntesis. Los polihidroxicanoatos (PHA) son materiales de origen microbiano, mientras que el ácido poliláctico (PLA) se obtiene a partir del ácido láctico y de la reacción química de la lactida que produce el biomaterial. Este trabajo explora mediante una revisión bibliográfica los principios y la producción de los bioplásticos fabricados a partir de Ácido poliláctico (PLA) y Polihidroxibutirato (PHB) y su aplicación en el envase de alimentos. Estos materiales se constituyen como materiales particularmente interesantes por su potencial en un amplio rango de aplicaciones. Se ha visto que las principales propiedades físico-químicas de los biomateriales solicitados para realizar empaques alimenticios son: la permeabilidad a la humedad, permeabilidad al oxígeno y las propiedades mecánicas. Los requisitos establecidos para los diferentes tipos de empaques y envases utilizados en la industria alimentaria pueden ser alcanzados por los biomateriales. De igual manera se han estimado las ventajas a nivel ambiental, económico e industrial y los retos encontrados para su masificación. Se identificó que la reducción de los costos de su fabricación puede ser lograda mediante el uso de residuos de biomasa agrícola como fuente de sustrato para los procesos de fermentación. El PLA y PHB se constituyen como materiales particularmente interesantes por su potencial en un amplio rango de aplicaciones en la industria alimentaria por su capacidad de biodegradación y eficacia.

**Palabras clave:** empaques biodegradables, biomateriales, empaques para alimentos, biomateriales de fermentación.

---

Recibido 28 de febrero de 2022 Aceptado 09 de diciembre de 2022

---

1 Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Central del Ecuador, Quito, Código postal: EC170136,

2 Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato, 180150, Ambato

\*\*Autor para correspondencia: Telf. de contacto: +593 995426192; mfchicot@uce.edu.ec

## 1. INTRODUCCIÓN

Los elevados porcentajes de contaminación plástica derivada de la industria alimentaria por la utilización de envases y embalajes ha iniciado un interés social, ambiental y político hacia el desarrollo de envases biodegradables. En el año 2020 el 39.6% de plástico producido se usó en el envasado primordialmente de alimentos (Plásticos Europa, 2020). Esto se comprende por la demanda de los consumidores al querer tener acceso a los productos alimenticios empaquetados ya sea procesados o frescos. En la actualidad los esfuerzos de los países en el sector ambiental están dirigidos a minimizar la utilización del plástico convencional debido a que ciertos estudios sugieren que las bolsas de plástico y recipientes de espuma de poliestireno pueden tardar hasta 1000 años en descomponerse (ONU Medio Ambiente, 2018). La finalidad de este trabajo es explorar los principios y la producción de los bioplásticos fabricados a partir de Ácido poliláctico (PLA) y Polihidroxibutirato (PHB) y su aplicación en el envase de alimentos.

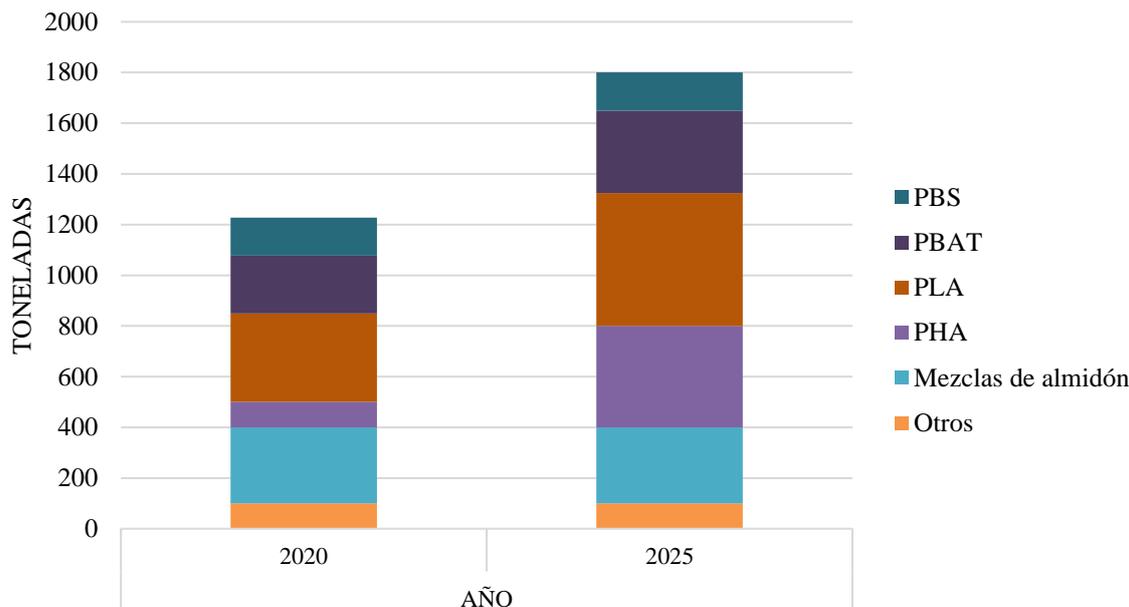
## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La información a utilizarse en el estudio se obtuvo a partir de un 80% de material bibliográfico de artículos publicados en un tiempo de antigüedad de no mayor a 5 años a la fecha de publicación de este trabajo. La búsqueda bibliográfica de revistas científicas, reportes oficiales, folletos y libros se realizó en las bases de datos electrónicas de e-books y journals proporcionadas por la Universidad Técnica de Ambato: eLibro, Proquest Ebook Central, Digitalia HISPANICA, Springer, Wiley Online Library, Scopus, Taylor & Francis, Scielo, Dialnet, Google académico, ScienceDirect.

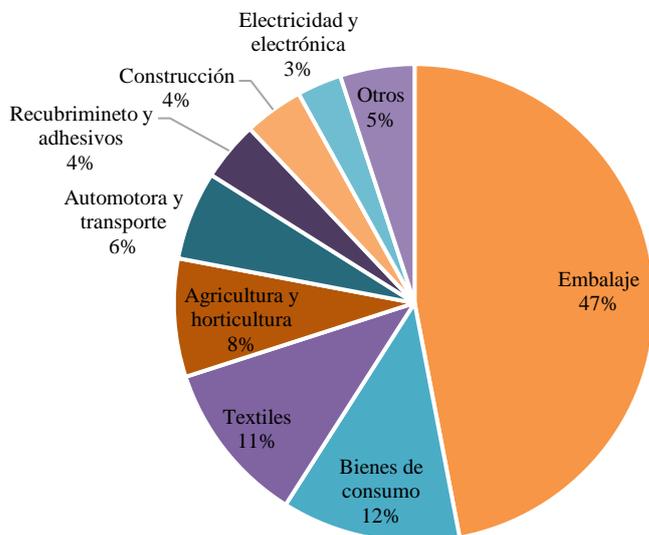
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Producción global de los bioplásticos

Los bioplásticos representan apenas el uno por ciento de los más de 368 millones de toneladas de plástico que se generan anualmente. En el año 2020 alrededor de 2.111 millones de toneladas de bioplásticos fueron fabricados y partir del año 2021 se prevé un incremento en la producción de bioplásticos en especial de PLA y PHB (Figura 1). El área de envases y empaques es el sector con más demanda con el 47% del costo global (Figura 2) (Plásticos Europa, 2020).



**Figura 1.** Producción Global de bioplásticos 2020-2025 (Bioplástico Europeo, 2020)..  
**Nota:** PBS (Polibutileno succinato), PBAT (Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato)), PLA (Ácido poliláctico), PHA (Polihidroxiácidos).



**Figura 2.** Aplicaciones Globales de los bioplásticos en el año 2020 (Bioplástico Europeo, 2020).

### 3.2 Bioplásticos obtenidos por fermentación para envasar alimentos

Los plásticos tradicionales provienen de derivados de petróleo, por otro lado, los bioplásticos se generan a partir de materiales de origen biológico llamados biopolímeros, los mismos que

son sintetizados y acumulados en condiciones de estrés (Sillanpää & Ncibi, 2017) (Candia & Simón, 2015) Los bioplásticos tienen la posibilidad de clasificar según su composición química, origen y proceso de síntesis. Una de estas categorías comprende a los polímeros microbianos, siendo la familia de los polihidroxialcanoatos (PHA) su representante más sobresaliente (Katiyar, Gupta, & Ghosh, 2019). Estos se obtienen por fermentación bacteriana o de hongos utilizando fuentes de carbono (glucosa, fructosa, sacarosa) o sustancias de desecho de otro tipo de industrias como ácidos orgánicos y desperdicios lignocelulósicos (Colombo et al., 2019). En la categoría de los derivados por síntesis química está el ácido poliláctico (PLA), que es un poliéster obtenido en dos etapas, la primera es la obtención del ácido láctico mediante fermentación de trigo, maíz, arroz o remolacha y, en una segunda etapa, la reacción química de la lactida produce el biomaterial. El uso de microorganismos es una de las mejores herramientas para la producción de polímeros con el potencial de solucionar la problemática de la gestión de residuos agropecuarios. En la Tabla 1 Ehman, N., & Area, M. C. (2021) indican los bioplásticos que son de interés en el área industrial. Destacan los que se utilizan como embalajes en el sector alimentario, son biodegradables y de origen biológico: ácido poliláctico (PLA) y los de la familia de los Polihidroxialcanoatos (PHA) (Bioplástico Europeo, 2020) & (Urbanek et al., 2020).

**Tabla 1.** Descripción de los bioplásticos más usados actualmente a nivel industrial (Modificado de Ehman & Area, 2021).

<b>Biopolímero</b>	<b>Materia prima</b>	<b>Tipo de descomposición</b>	<b>Ciclo de vida</b>	<b>Aplicación</b>	
<b>BioPP</b>	Bio polipropileno / Bio basado polipropileno	Caña de azúcar	No biodegradable	Reciclables	Embalaje, industria textil
<b>BioPE</b>	Biopolietileno o/ Bio basado polietileno	Granos de trigo, caña de azúcar, remolacha	No biodegradable	Reciclables	Embalaje para todo tipo de producto, botellas, tubos.
<b>BioPET</b>	Bio polietileno tereftalato	Caña de azúcar	No biodegradable	Reciclables	Embalaje, industria textil, películas delgadas para condensadores.
<b>PA</b>	Biopoliamida / Poliamida de base biológica	Aceite de resino	No biodegradable	Reciclables	Industria textil, impresión 3D

<b>PLA</b>	Ácido poliláctico	Caña de azúcar, maíz, microorganismos.	Hasta 180 días (en abono)	Compostables	Película de envase de alimentos, bandejas de espuma, botellas, impresión 3D.
<b>PHA</b>	Polihidroxicanoatos	Caña de azúcar, microorganismos	60-365 días (en suelo) 14-90 días (agua de mar)	Biodegradable	Impresión 3D para uso médico, película de envase de alimentos.
<b>Base en almidón</b>		Papa, arroz, trigo, maíz	14-110 días (en suelo)	Biodegradable	Película de envase de alimentos, productos médicos.
<b>Base en celulosa</b>		Caña de azúcar, madera	Hasta 154 días (en suelo y abono)	Biodegradable	Película de envase de alimentos, fibras textiles, etc.

### 3.3 Ácido poliláctico-PLA

El PLA (ácido poliláctico) pertenece a los biopolímeros termoplásticos más elegidos para empacar y envasar alimentos de vida útil corta, como frutas y vegetales, de la misma forma, ciertos productos como yogures, agua embotellada y jugos por sus propiedades mecánicas cercanas a los polímeros convencionales (J. Ahmed & Varshney, 2011a). La producción de este biomaterial puede verse afectada de forma notable por las variaciones de temperatura en el proceso, siendo este un punto crítico que conlleva a la pérdida de estabilidad térmica (Urbanek et al., 2020). El PLA únicamente se biodegrada en determinadas condiciones de compostaje, es decir es compostable y biocompatible.

Este compuesto es una molécula quiral que tiene dos enantiómeros y que existe de dos formas ópticas: L-lactida y D-lactida (Wei, Guo, Gong, Gou, & Qian, 2011). En el proceso de fermentación se genera primordialmente un 99.5% del isómero L y un 0.5% del isómero D. A partir de la obtención de los monómeros bioderivados, el PLA se obtiene por síntesis química en donde la pureza de los isómeros es fundamental para establecer las características físicas del PLA (M. S. Singhvi, Zinjarde, & Gokhale, 2019). El ácido poliláctico tiene tres estructuras diferentes: poli (L-lactida) (PLLA), poli (D-lactida) (PDLA) y poli (D, L-lactida) (Tang et al., 2004), siendo la última de importancia en el área de envases y presentando un 90% de L-lactida. Por otro lado, si la concentración de D-lactida se incrementa, además aumentará su precio de venta ya que se producen polímeros de PLA con mejores características que aumentan la calidad de los materiales para usos que lo requieran: una composición más cristalina y películas con mejor estabilidad térmica, resistencia mecánica y propiedades de

barrera (Ikada, Jamshidi, Tsuji, & Hyon, 1987) Este biopolímero es el primer biomaterial de base biológica y biodegradable en ser comercializado en gran escala (Sin & Tueen, 2019). Para su procesamiento tienen la posibilidad de emplearse casi cada una de las técnicas como: moldeo por inyección, extrusión de películas, soplado, termoformado, entre otras. Sobre todo, la extrusión es la técnica más usada en la producción de un biomaterial (Murariu & Dubois, 2016).

### **3.4 Polihidroxibutirato-PHB**

Dentro de la familia de los polihidroxicanoatos (PHAs) esta el biopolímero termoplástico polihidroxibutirato (PHB o PH3B) que fue el primero en ser aislado y caracterizado. Hasta la fecha se han identificado 150 moléculas diferentes producidas y encontradas en las células como reserva de carbono de una extensa variedad de cepas bacterianas como las bacterias grampositivas, gramnegativas, aerobias, anaerobias, bacterias fotosintéticas capaces de acumular PHA intracelular (Pal et al., 2020) & (McAdam, Brennan Fournet, McDonald, & Mojicevic, 2020). Una limitante para su venta extensiva es el elevado costo de producción del PHB en comparación con los plásticos derivados de la petroquímica (Raza, Abid, & Banat, 2018). Como respuesta a esta problemática, una de las estrategias es usar residuos agrícolas para reducir el costo del sustrato.

### **3.5 Fuentes de sustratos usados en la fermentación para obtener PLA y PHB**

El elevado costo de producción de los bioplásticos es un limitante para su uso masivo, el valor de los biopolímeros oscila entre los 6 a 15 USD/kg, que es bastante elevado en comparación con polímeros como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), que cuestan 0,23–0,48 USD/kg respectivamente (Sirohi, Prakash Pandey, Kumar Gaur, Gnansounou, & Sindhu, 2020). Investigadores como (Raza et al., 2018) indican que el costo de producción de los bioplásticos puede llegar a ser entre cinco a diez veces más alto que el plástico común. El sustrato representa alrededor del 50% total del costo de producción (Ciesielski, Mozejko, & Pisutpaisal, 2015) & (Koller, Maršálek, de Sousa Dias, & Braunegg, 2017). Como respuesta a esta problemática se ha dado impulso a la investigación de fuentes reutilizables, baratas, renovables, accesibles a nivel local y que cumplan con criterios de sostenibilidad, como los residuos agrícolas, agropecuarios y agroindustriales que permitan obtener biopolímeros por medio de fermentación como el PLA y PHB (Al-battashi et al., 2018). El costo de adquisición de algunos residuos agropecuarios o industriales en el Ecuador puede llegar a tener un valor

nulo, en donde las empresas alimenticias están dispuestas a destinar los residuos que se generen en los procesos de producción de alimentos. El Atlas Bioenergético del Ecuador realizado por el Ministerio de Ambiente (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Ministerio Coordinador de Producción, & Instituto Nacional de Preinversión, 2014) indica que el país dispone de tres fuentes de biomasa que predominan en volumen: desperdicios agrícolas, pecuarios y forestales. Los desperdicios agrícolas comprenden los subproductos que se generan durante los procesos de recolección y transformación de las cosechas generando alrededor de 18 millones de toneladas por año en el país. Los desperdicios pecuarios provienen de actividades avícolas, porcinas y vacunas, los residuos de estas actividades superan el millón de toneladas por año. Los desechos forestales provienen de las plantaciones de bosques del país como los residuos foresto industriales llegando a las 216.157 toneladas por año. Los residuos agropecuarios son los que más se generan y los que tienen mayor potencial para aportar fuentes de carbono utilizable (Fredí & Dorigato, 2021) La biomasa agrícola lignocelulósica contiene celulosa (35%-50%), hemicelulosa (15%-30%) y lignina (20%-30%) y su composición depende del tipo de residuo y la especie de cultivo (Zhang, Luo, Ding, & Jaffrin, 2015; Assi & King, 2007; Bhardwaj et al., 2020; Bhuyan et al., 2020; Birania et al., 2022; El-Tayeb, T. S., Abdelhafez, A. A., Ali, S. H., & Ramadan, E. M., 2012; Javed, Ahmad, Tahir, & Shabbir, 2019; Llanos Páez, Ríos Navarro, Augusto Jaramillo Páez, & Fernando Rodríguez Herrera, 2016; Mahmud & Anannya, 2021; Mamma & Christakopoulos, 2014; Singh Nee Nigam, Gupta, & Anthwal, 2009) (Tabla 2). En (M. Singhvi & Gokhale, 2013) señalan que la celulosa es el biopolímero más abundante que se encuentra en la naturaleza y consta de microfibrillas largas que son dímeros de molécula de glucosa. Estas biomoléculas poseen dominios cristalinos y son degradadas por ácidos o enzimas denominadas celulasas a su monómero la glucosa que se fermenta para la obtención de biomateriales o en combustible. El segundo compuesto lignocelulósico es la hemicelulosa que es polímero heterogéneo que varía según su origen y está compuesta principalmente por pentosas, hexosas y ácidos de azúcar. La hidrólisis del polímero requiere varias enzimas como xilanasas, mananasas, entre otras. Por último, la lignina es un polímero que en realidad funciona como un pegamento entre la celulosa y la hemicelulosa y los tres juntos le dan fuerza a la planta haciendo que la pared celular vegetal sea resistente a degradaciones mecánicas y biológicas.

**Tabla 2.** Residuos agrícolas lignocelulósicos del Ecuador adecuados para la obtención de PLA y PHB.

Fuente natural	Tipo de residuo agrícola/procesamiento	Composición química (% w/w)			Fuente
		Celulosa	Hemi-celulosa	Lignina	
Caña de azúcar	Bagazo	26-47	19-33	14-23	(Mahmud & Anannya, 2021)
Remolacha azucarera	Bagazo	26.3	18.5	2.50	(El-Tayeb et al., 2012)
Banana	Cáscara	13.2	14.8	14	(Birania et al., 2021)
Maíz	Tallo	61.20	19.30	6.90	(El-Tayeb et al., 2012)
Naranja	Cáscara	9.21	10.50	0.84	(Birania et al., 2021)
Piña	Cáscara	20.80	17.20	8.90	(Birania et al., 2021)
Plátano	Cáscara	12.17	10.19	2.88	(Birania et al., 2021)
Arroz	Panca (pajilla)	25-35	32-37	6-10	(Llanos Páez et al., 2016) & (Bhardwaj et al., 2020)
	Cáscara	41.2	21	22.4	
Cebada	Paja	33.8	21.90	13.80	(Singh nee' Nigam et al., 2009)
Coco	Cáscara	27.80	13.60	36	(Bhuyan et al., 2020)
Limón	Cáscara	23.10	8.09	7.60	(Mamma & Christakopoulos, 2014)
Papa	Cáscara	21	12.50	---	(Javed et al., 2019)
Tomate	Orujo	31	11.50	---	(Assi & King, 2007)
Zanahoria	Orujo	32.20	15.50	---	(Bhardwaj et al., 2020)
Forestal	Aserrín	45.10	28.10	24.20	(El-Tayeb et al., 2012)

### 3.6 Microorganismos productores de PLA y PHB

El polihidroxitirato (PHB) se produce utilizando sustratos sintetizados por microorganismos en particular por bacterias. El poliéster se halla dentro de la estructura intracelular almacenado en forma de gránulos blancos como reserva de energía y de carbono (Sillanpää & Ncibi, 2017). El porcentaje de biomaterial extraído depende de parámetros como el tipo de microorganismo utilizado, las condiciones de fermentación y el residuo utilizado. (Aljuraifani, Berekaa, & Ghazwani, 2018) en su investigación para obtener biopolímeros a partir de fuentes sostenibles de bajo costo sugiere que una elevada relación carbono/nitrógeno tiene un efecto profundo con el crecimiento celular y la acumulación de PHB. El bloque básico de construcción para la producción de PLA es el ácido láctico (S. Ahmed, 2020). La producción de ácido láctico se puede hacer mediante procesos químicos, aunque el 90% se produce por fermentación bacteriana que se cultivan en condiciones anaeróbicas y con baja producción de energía. Existen más de 20 géneros del phylum Firmicutes que incluyendo a *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Aerococcus*, *Carnobacterium*, entre otros, que producen ácido láctico. Los *Lactobacillus* son los más significativos y existen 80 géneros que producen ácido láctico (Sin & Tueen, 2019). Del mismo modo, existen más de 80 cepas bacterianas que fermentan azúcares o lípidos para producir polihidroxitirato (PHB), destacan los géneros: *Bacillus*, *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Rhodospirillum* y *Alcaligene* por la acumulación del biopolímero (Li & Wilkins, 2020).

### 3.7 Parámetros físico-químicos que requieren los biomateriales PLA y PHB para usarse en el envasado de alimentos

Un estudio llevado a cabo por (Coppola et al., 2021b) indican que las principales propiedades físico-químicas de los biomateriales solicitados para realizar empaques alimenticios son: la permeabilidad a la humedad, permeabilidad al oxígeno y las propiedades mecánicas (Coppola et al., 2021a; Rapisarda et al., 2020a) (Tabla 3). La importancia de estos parámetros se relaciona con la seguridad microbiológica requerida por los alimentos para inhibir el crecimiento de patógenos anaerobios y aerobios (J. P. Kerry, 2012). La permeabilidad al oxígeno en los biomateriales es admisible obteniendo una valoración media, esta propiedad es fundamental para prevenir la oxidación de los lípidos y la proliferación de microorganismos. El oxígeno también es responsable de la decoloración, cambios en la textura, ranciedad, malos olores y problemas de sabor (U. , R. S. , D. N. , & K. M. R. Hebbar, 2020). La permeabilidad a la humedad previene la alteración de humedad de los alimentos ya

sea por la pérdida de agua al exterior como la ganancia de humedad (Labeaga Viteri, 2018). Esta propiedad en el caso del PLA y PHB puede ser considerada satisfactoria principalmente en los biomateriales a base de ácido poliláctico (Coppola et al., 2021b). Por otro lado, la exposición a la humedad de los biopolímeros afecta de manera negativa el rendimiento de los compuestos, mientras que el agua tiene tendencia a plastificar la fibra natural y el biopolímero y, por consiguiente, disminuye la rigidez del material compuesto (Aaliya, Sunooj, & Lackner, 2021). Las características mecánicas de los biopolímeros indican la resistencia del bioplástico para moldearlo y el impacto que este puede soportar a golpes que se presenten a lo largo del transporte y venta de los alimentos (S. Ahmed, 2020). Por ejemplo, el PLA tiene alta fuerza de tensión, módulo de tensión y alargamiento a la rotura, permitiendo tener diversas funciones para lograr moldear y diseñar envases. Otra propiedad que muestran los biopolímeros de interés para el estudio es la característica de ser termoplásticos y termoestables, la primera propiedad le posibilita fundirse a altas temperaturas y darle diversa forma, mientras la segunda propiedad le posibilita adoptar la forma después de haber sido moldeado (Aaliya et al., 2021).

**Tabla 3.** Comparación entre los principales plásticos y bioplásticos utilizados en el envasado de alimentos (Raspisarda et al., 2020 & Coppola et al., 2021).

<b>Polímero</b>	<b>Permeabilidad a la humedad</b>	<b>Permeabilidad al oxígeno</b>	<b>Propiedades mecánicas</b>	<b>Biodegradabilidad/Desintegración</b>
<b>PHB</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Satisfactorio</b>	<b>3-12 meses</b>
<b>PLA</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Satisfactorio</b>	<b>3-meses</b>
<b>PP</b>	Alto	Muy alto	Moderado	>500 años
<b>LDPE</b>	Bajo	Muy alto	Moderado	>150 años
<b>HDPE</b>	Medio	Medio	Satisfactorio	>150 años
<b>PET</b>	Medio	Medio	Satisfactorio	>300 años
<b>PS</b>	Alto	Muy alto	Moderado	>500 años

La Tabla 4 (Cherpinski, Torres-Giner, Cabedo, & Lagaron, 2017; Misra, Pandey, & Mohanty, 2015) muestra las propiedades mecánicas de los principales bioplásticos y plásticos convencionales de interés en el empaquetado. El PLA puede suplir al polietileno de alta

densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), PET (tereflatalato de polietileno) y PS (poliestireno) como material de embalaje debido a sus propiedades mecánicas apropiadas para el uso como material de envase (Jabeen, Majid, & Nayik, 2015a). Del mismo modo McAdam et al. (2020) indican que generalmente el PHB es de naturaleza rígida con un alto grado de cristalinidad, sus propiedades mecánicas son semejantes al polímero PP (polipropileno), PE (polietileno), LDPE (polietileno de baja densidad), y HDPE (polietileno de alta densidad). Por otro lado, los biopolímeros además poseen ciertas limitantes como: la baja resistencia a la humedad, la temperatura de descomposición térmica, el fuego, los rayos UV y la resistencia biológica en comparación con los plásticos tradicionales (Aaliya et al., 2021). Para mejorar las propiedades mecánicas como la rigidez y resistencia de los biopolímeros se puede desarrollar una etapa extra de refuerzo con fibras de origen animal o vegetal. (Aaliya et al., 2021) recopilaron información del refuerzo aplicado al ácido poliláctico con fibra de gusano de seda, fibra de pluma de pollo, fibra de paja de arroz y fibra de yute. Los resultados mostraron incremento en la elasticidad y estabilidad térmica en la primera mezcla, en la segunda mezcla incrementó el módulo de tracción y la estabilidad térmica, en la tercera incrementó la hidrofobicidad, la resistencia a la tracción y la estabilidad térmica y en el último incrementó el módulo de tracción y en la resistencia al impacto.

**Tabla 4.** Propiedades mecánicas de los polímeros usados en envases para alimentos.

Polímero	Densidad ( $g/cm^3$ )	Fuerza de tensión (MPa)	Módulo de tensión (MPa)	Alongamiento a la rotura (%)	Punto de fusión ( $^{\circ}C$ )	Fuente
PHB	1.18-1.26	25-40	3500	5-8	168-182	(Cherpinski et al., 2017).
PLA	1.21-1.25	48-60	3500	30-240	150-162	(Misra et al., 2015).
PP	0.9-1.16	30-40	1100-1600	20-400	161-170	(Cherpinski et al., 2017).
LDPE	0.94	8-20	300-500	100-1000	98-115	(Misra et al., 2015).
HDPE	0.97	10	177	700	110	(Cherpinski et al., 2017).
PET	1.38	56	2800-4100	30-300	262	(Misra et al., 2015).
PS	1.05	34-50	2300-3300	1.2-2.5	70-115	(Misra et al., 2015).

### 3.8 Envasado de carnes crudas

Se han realizado estudios como el que se utilizan dos materiales diferentes para el envasado para carne de res fresca (ácido poliláctico de base biológica y polietileno amorfo de base fósil combinación de tereftalato/polietileno + PVC). Los resultados de los análisis microbiológicos relacionados con el tiempo de vida útil (recuento de psicrófilos viables totales, *Pseudomonas spp.* y recuentos de especies de *Lactobacillus* viables totales) mostraron el mismo comportamiento en carne envasada en PLA frente a carne almacenada en sistema de envasado convencional. El análisis sensorial del color indicó que el envasado con PLA es un material adecuado para conservar el color rojo cereza en carnes rojas refrigeradas. De la misma forma, la puntuación de acidez también se consideró más baja en la carne envasada en PLA (Panseri et al., 2018). El valor de acidez y pH, son indicadores de retención de agua, resistencia microbiana, los cuales influyen en el sabor y el color de las carnes. Estos parámetros son los que determinan el grado de aceptabilidad por parte del consumidor (Safaei & Roosta Azad, 2020).

### 3.9 Envasado de frutas y verduras

La elección de un adecuado material de embalaje es difícil ya que los diferentes alimentos tienen distintas tasas de respiración y transpiración. En las frutas y vegetales la impermeabilidad al gas y al agua conducen al deterioro del alimento ya que se lleva un proceso de fermentación dentro del empaque (S. Ahmed, 2020). Las estrategias de protección de las frutas y verduras después de la cosecha apuntan a mantener la calidad del alimento sin que esto signifique incrementar la cantidad de materiales utilizados ni los daños al ambiente. La evaluación de envases compostables a base de poliláctida y celulosa para tomates cherry recién cortados indican que el envase biodegradable tiene la capacidad de actuar como una barrera para el oxígeno manteniendo casi sin cambios el alimento. Esta evaluación demostró que las películas y bandejas pueden ser reemplazadas de manera efectiva por el empaque tradicional sin comprometer la calidad y la vida útil del producto. Adicionalmente al cambiar la concentración de gas dentro del empaque evita la presencia de acetato de etilo que es el responsable de conducir a la maduración de frutas y verduras (Rapisarda et al., 2020c).

El EMAP (envasado en atmósferas modificadas en equilibrio) prolonga la vida útil de productos frescos y es una técnica que se puede combinar con el envasado con biomateriales. Un estudio en tomates Cherry y en melocotones fue realizado para probar el sistema de embalaje a base de ácido poliláctico (PLA) demostrando ser un material versátil para el diseño

que además permite el control de la atmósfera en el interior del empaque (Mistriotis, Briassoulis, Giannoulis, & D'Aquino, 2016).

### **3.10 Envasado de quesos**

El queso al ser un producto rico en proteínas y al tener un alto contenido de agua respira continuamente y produce dióxido de carbono, lo que hace que el uso de materiales de base biológica sea una opción interesante. Los polímeros PHA y PLA ya sea por separado o combinados se pueden aplicar en el envase de estos alimentos ya que estos materiales tienen buena permeabilidad al oxígeno, característica que es esencial para proteger la calidad del queso (S. Ahmed, 2020).

### **3.11 Envasado de jugos**

Los envases de PLA se han utilizado para envasar alimentos como agua embotellada Biota™ PLA, jugos embotellados Noble™ PLA y yogures Dannon™. Estudios sugieren la incorporación de bacteriocinas en el polímero PLA como un sistema de envasado antimicrobiano para alimentos líquidos. Se han evaluado películas de PLA/Nisina para fabricar botellas o recubrir la superficie de la botella para envasar líquidos como jugos. La nisina incorporada controla los patógenos transmitidos por los alimentos. Los estudios fueron realizados en jugo de naranja y clara de huevo demostrando una inhibición de crecimiento contra *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 y *Salmonella enteritidis*. Esta investigación demostró que la combinación de un biopolímero y una bacteriocina natural tienen potencial para fabricar envases antimicrobianos usados en alimentos (Jin & Zhang, 2008).

### **3.12 Ventajas de los biopolímeros PLA y PHB obtenidos por fermentación**

Los polímeros biodegradables han recibido mucha atención en las últimas décadas debido a sus potenciales aplicaciones, su protección al medio ambiente, a las ventajas económicas, industriales y legales resumidas en la Tabla 5 (Al-Battashi et al., 2019; Arun et al., 2020; Coppola et al., 2021a; Luís, Domingues, & Silva, 2020; Rapisarda et al., 2020b).

**Tabla 5.** Resumen de las ventajas de biopolímeros PLA y PHB

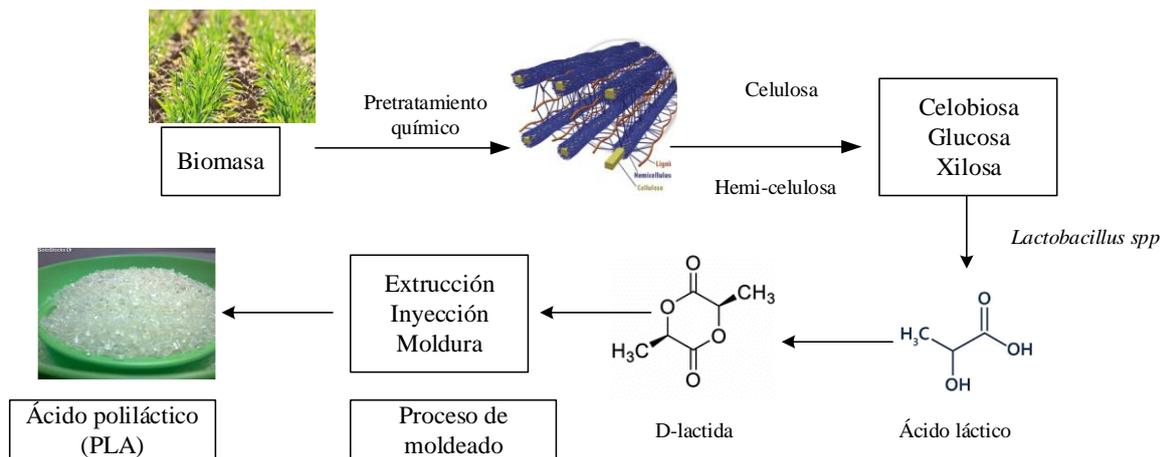
Sector	Ventajas	Referencias
<b>Legal-Normativa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los biopolímeros PLA y PHB están certificados por la FDA como biomateriales biocompatibles y de baja toxicidad.</li> <li>- Los materiales de envasado a base de PLA se han considerado seguros (GRAS), lo que los coloca en una posición única para aplicaciones alimentarias</li> </ul>	(Arun et al., 2020)
<b>Económico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recursos renovables abundantes y disponibles anualmente.</li> <li>- Aprovechamiento de los residuos agrícolas reduciendo el costo de producción hasta el 50% en todo el proceso.</li> </ul>	(Al-battashi et al., 2018).
<b>Industrial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las propiedades mecánicas del PLA y PHB son aceptables para envasar carne empacadas al vacío o en atmósferas modificadas.</li> <li>- Control de la migración intercomponente de humedad y gases.</li> <li>- Se requiere una menor cantidad de energía en la producción de plástico biodegradable.</li> </ul>	(Coppola et al., 2021) & (Luís, Domingues, & Silva, 2020).
<b>Ambiental</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los biopolímeros PLA y PHB son compostables, biodegradables y de origen biológico</li> <li>- Periodo de biodegradabilidad no mayor a un año.</li> <li>- Reducción del volumen, peso y desperdicio de envases</li> <li>- Bacterias del suelo pueden biodegradarlo.</li> <li>- La descomposición de plásticos biodegradables en el suelo mejora la eficacia nutricional liberando compuestos extracelulares y por lo tanto mejora la fertilidad del suelo.</li> </ul>	(Rapisarda et al., 2020), (Luís, Domingues, & Silva, 2020) & (Coppola et al., 2021)

### 3.12.1 Ventajas Económicas

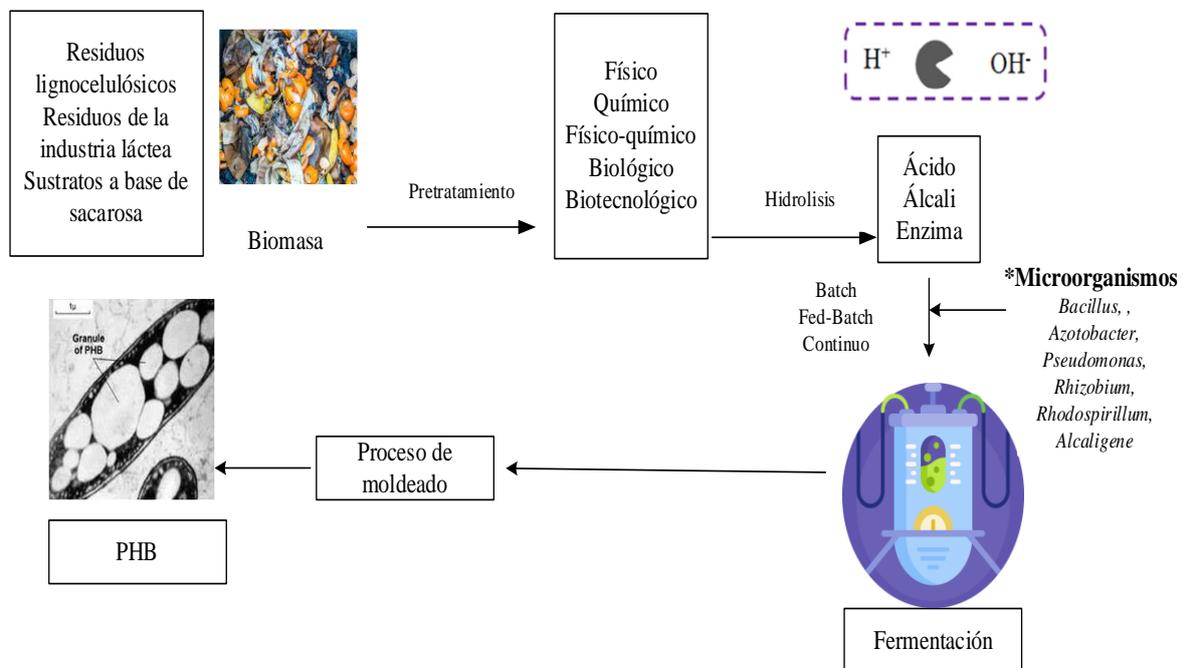
En su estudio (Khalil et al., 2016) informan que la reducción en el precio de los bioplásticos como el PLA se debió al aprovechamiento de nuevos recursos biotecnológicos y de sustratos. En 1990 el PLA se vendía a tres dólares la libra, pero a partir del 2010 su precio oscila los 90 centavos la libra. Del mismo modo el costo del sustrato proveniente de recursos nuevos como la glucosa tiene un costo de 0,493 USD/kg, mientras el costo de sustratos proveniente de residuos agrícolas como la melaza de caña tiene un valor de 0,22 USD/kg. El suero de queso también tiene un valor inferior a 0,071 USD/kg. Todos estos son factores favorables para la reducción de los costos del proceso de elaboración del PLA y PHB. En la Tabla 12 se pueden comparar el precio de la glucosa como biomasa natural y la biomasa residual del suero (Coppola et al., 2021b) & (McAdam et al., 2020).

### 3.12.2 Ventajas Industriales

FoodsServiceWareHouse establece que se necesita menos energía en la producción de bioplástico biodegradable en comparación con los plásticos comunes (Labeaga Viteri, 2018). El alto costo de la producción de PHA es el resultado de la alta demanda de energía relacionada con el proceso de esterilización y la aireación intensiva, la baja conversión de sustratos de carbono en productos PHA, el lento crecimiento de microorganismos y los procesos discontinuos. Como respuesta a esta problemática los estudios se centran en el uso de bacterias extremófilas que son resistentes a la contaminación acompañada de técnicas de ingeniería metabólica y biología sintética para manipulaciones moleculares (Chen & Jiang, 2017). El pretratamiento previo a un proceso de fermentación es importante porque permite reducir el tamaño de los sustratos, extraer compuestos químicos más pequeños y simples y eliminar materiales inertes que no son adecuados para los siguientes procesos, este procedimiento se lo puede observar en la producción del PLA (Figura 2) y PHB (Figura 4) (Tsang et al., 2019).



**Figura 3.** Representación esquemática de la producción de PLA (Singhvi et al., 2019).



**Figura 4.** Representación esquemática de la producción de PHB (Sirohi et al., 2020).  
 \*Nota: Se podría utilizar biología sintética.

### 3.12.3 Ventajas Ambientales

La producción de plástico convencional cada año alcanza más daños ambientales a nivel global, incentivando a realizar estudios para la producción de bioplásticos. Debido al alto costo de producción de estos biomateriales se está usando desechos orgánicos como una respuesta a la problemática económica y ambiental porque de esta manera se reduce el

volumen de desecho y de subproductos agroalimentarios generados, y se incentiva a las prácticas de una economía circular (Jögi & Bhat, 2020). Otra ventaja ambiental de los biopolímeros es su biodegradabilidad. La biodegradación tiende a realizarse en condiciones aerobias o anaeróbicas en escenarios naturales o industriales. Las condiciones aeróbicas incluyen el suelo, compost y algunos entornos acuáticos, dando como resultado de esta descomposición: biomasa, dióxido de carbono y agua. Mientras que en condiciones anaerobias se utiliza digestión con plantas y hábitats acuáticos obteniendo como productos resultantes; biomasa, dióxido de carbono, metano y agua (Jögi & Bhat, 2020) & (Dilkes-Hoffman, Ashworth, Laycock, Pratt, & Lant, 2019). Sin embargo, la biodegradación de los bioplásticos comerciales (PLA y PHB) en condiciones naturales o en vertederos es muy lenta, por lo que se puede considerar como contaminación ambiental porque da a lugar emisiones de metano no controladas, por esta razón se considera como una mejor opción el uso de plantas de compostaje (Fredri & Dorigato, 2021). Específicamente el biopolímero PLA debería ser referido técnicamente como compostable ya que requiere de condiciones específicas de mayor temperatura y humedad en presencia de microorganismos apropiados. El bioplástico se descompone completamente a gran escala a una temperatura de 50-60 °C en 90 días (Lamberti, Román-Ramírez, & Wood, 2020). Los microorganismos que degradan el PLA se encuentran significativamente en menor cantidad en el medio ambiente en comparación con otros degradadores. El porcentaje de microorganismos que degradan el PLA en el suelo es solo del 0-0,04 % (Tokiwa & Calabria, 2007), mientras que los microorganismos que degradan el PHB están entre el 0.2 y el 11.4 % (Jögi & Bhat, 2020). En el caso del PHB debido a su alta biocompatibilidad tiene una mayor tasa de degradación en ambientes marinos. Después de un año en un ambiente marino a 30 °C, el PLA solo se biodegrada aproximadamente en un 8%, mientras que PHB en aproximadamente un 80% (Lamberti et al., 2020)(Wang et al., 2018) indican que el PHB se biodegrada fácilmente en compost, suelo y ambientes marinos siendo estable en ausencia de microorganismos. En condiciones anaeróbicas y a temperatura ambiente, el PHB experimenta una conversión del 62,9 % de su carbono en gas en solo 85 días. Bajo condiciones aeróbicas de agua de mar a temperatura ambiente, el mismo copolímero tiene una pérdida de carbono gaseoso del 83% en 195 días.

### **3.12.4 Alimentos empacados en envases PLA y PHB**

Los empaques biodegradables o ecológicos deben cumplir con los requisitos básicos para ser usados en alimentos que incluyen: propiedades de barrera (vapor de agua, gases, luz y aroma), propiedades ópticas (transparencia), resistencia, propiedades de soldadura y moldeo,

propiedades de impresión, resistencia a la migración, propiedades químicas y de resistencia a la temperatura, requisitos de eliminación, propiedades antiestáticas, propiedades sensoriales de retención y, sobre todo, siga estrictamente la seguridad alimentaria (J. Ahmed & Varshney, 2011a). Actualmente, los materiales de envasado basados en PLA se utilizan para productos de supermercados en Europa y América del Norte para envasar agua embotellada, jugos y yogures y productos frescos (J. Ahmed & Varshney, 2011b; Jabeen, Majid, & Nayik, 2015b) (Tabla 6) ya que sobresale en resistencia a las manchas en pruebas estándar con café, té, refrescos de cola, salsa de tomate y otros productos alimenticios.

**Tabla 6.** Usos y propiedades del PLA y PHB como material de empaque en varios tipos de alimentos

<b>Bioplástico</b>	<b>Tipo de comida</b>	<b>Molde</b>	<b>Propiedades de película</b>	<b>Fabricante comercial</b>
PLA	Agua embotellada	Botellas	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Biota
	Jugo embotellado	Botellas	Barrera contra la humedad, la luz y los gases, inerte a la migración del sabor	Noble
	Leche	Películas	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Cadbury Schwepps
	Yogur	Tarros	Resistencia mecánica, barrera de oxígeno, dióxido de carbono, humedad y grasa.	Dannon
	Queso	Bandejas	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Supermercados Iper (Italia) Coop Italia
	Mantequilla/Margarina	Bandejas	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Supermercados Iper (Italia) Coop Italia
	Champiñón	Bandejas	Resistencia mecánica, barrera equilibrada contra gases y humedad; protección contra aplastamiento/magulladuras	Mosburger (Japón)
	Café y té	Vasos de cartón recubiertos con PLA	Barrera contra la humedad, la luz y los gases, inerte a la migración del sabor	KLM
	Ensaladas frescas	Cuencos	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Mc Donald's
	Frutas y verduras recién cortadas	Bandejas y packs de PLA rígido	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Asda (minorista)

	Patatas fritas	Bolsas	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Frito-lay de PepsiCo
	Pan de molde	Bolsas de papel con ventana PLA	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Delhaize (minorista)
	kiwi	Bandejas de base biológica envueltas con film de celulosa	Resistencia mecánica, barrera equilibrada contra gases y humedad; protección contra aplastamiento/magulladuras	Walmart
PHB	Patatas fritas	Película	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Cañón de roca
	Dulces	Película	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Calle de calidad, Thomson
	Pastas orgánicas	Envases	Barrera contra la humedad, la luz y los gases	Birkel

**Fuente:** (Modificado de J. Ahmed & Varshney, 2011; Jabeen et al., 2015).

#### 4. CONCLUSIONES

Los amplios beneficios que ofrecen los bioplásticos hacen que los objetivos a nivel de la investigación y de la industria estén encaminados hacia una transición de los plásticos derivados del petróleo a los biomateriales. Tan pronto como los costos de obtención lleguen a ser competitivos, la industria alimentaria puede revolucionar la manera en que se realiza el empaquetado de sus productos. La complejidad de las materias primas propuestas como sustrato para el proceso de fermentación de los compuestos, hace que las metodologías del pretratamiento y de la producción deban ser evaluadas continuamente. Esto es especialmente necesario en función de lograr estandarizar y garantizar las características de los biomateriales de cada lote de producción. En el corto plazo se prevé que las tecnologías que permitan que estos materiales puedan establecerse como comercialmente competitivos van a estar disponibles para la producción industrial. El PLA y PHB se constituyen como materiales particularmente interesantes por su potencial en un amplio rango de aplicaciones, su capacidad de biodegradación y eficacia. La fabricación de este tipo de bioplásticos podría ser posible en el Ecuador al ser un gran generador de biomasa agrícola.

**Contribuciones de los autores:** Conceptualización, Chico Mayra Fernanda y Sampedro Tatiana.; metodología, Chico Mayra Fernanda.; análisis formal, Sampedro Tatiana.; investigación, Sampedro Tatiana.; recursos, Sampedro Tatiana.; escritura—preparación del borrador original, Sampedro Tatiana.; redacción—revisión y edición, Chico Mayra Fernanda.; supervisión, Chico Mayra Fernanda.; Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Agradecimientos:** A la facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la UTA.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## REFERENCIAS

- Aaliya, B., Sunooj, K. V., & Lackner, M. (2021). Compuestos de biopolímeros: una revisión. *Revista Internacional de Plásticos de Base Biológica*, 3(1), 40–84. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/24759651.2021.1881214>
- Ahmed, J., & Varshney, S. K. (2011a). Polilactidas: química, propiedades y tecnología de envasado ecológico: una revisión. *Revista Internacional de Propiedades Alimentarias*, 14(1), 37–58. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10942910903125284>
- Ahmed, J., & Varshney, S. K. (2011b). Polylactides—Chemistry, Properties and Green Packaging Technology: A Review. *International Journal of Food Properties*, 14(1). Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10942910903125284>
- Ahmed, S. (Ed.). (2020). *Materiales de base biológica para el envasado activo de alimentos*. Retrieved from <https://doi.org/10.1201/9780429322129-1>
- Al-battashi, H., Annamalai, N., Al-kind, S., Nair, A. S., Al-bahry, S., Verma, J. P., & Sivakumar, N. (2018). Producción de bioplástico (poli-3-hidroxitirato) utilizando papel de desecho como materia prima: Optimización de la hidrólisis enzimática y la fermentación empleando *Burkholderia sacchari*. *Revista de Producción Más Limpia.*, 214, 236–247. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.239>
- Al-Battashi, H., Annamalai, N., Al-Kindi, S., Nair, A. S., Al-Bahry, S., Verma, J. P., & Sivakumar, N. (2019). Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia sacchari*. *Journal of Cleaner Production*, 214. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.239>
- Aljuraifani, A. A., Berekaa, M. M., & Ghazwani, A. A. (2018). Producción de biopolímero bacteriano (polihidroxialcanoato) a partir de fuentes sostenibles de bajo costo. *Microbiología Abierta*, 8(6), 1–7. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mbo3.755>
- Arun, K. B., Madhavan, A., Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., R, R., & Sirohi, R. (2020). Remodeling agro-industrial and food wastes into value-added bioactives and biopolymers. *Industrial Crops and Products*, 154. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112621>
- Assi, J. A., & King, A. J. (2007). Assessment of selected antioxidants in tomato pomace subsequent to treatment with the edible oyster mushroom, *Pleurotus ostreatus*, under solid-state fermentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(22), 9095–9098. Retrieved February 20, 2022 from <https://doi.org/10.1021/JF070770V>
- Bhardwaj, A., Alam, T., Sharma, V., Alam, M. S., Hamid, H., & Deshwal, G. K. (2020).

- Lignocellulosic Agricultural Biomass as a Biodegradable and Eco-friendly Alternative for Polymer-Based Food Packaging. *Journal of Packaging Technology and Research*, 4(2), 205–216. Retrieved February 20, 2022 from <https://doi.org/10.1007/S41783-020-00089-7>
- Bhuyan, N., Narzari, R., Gogoi, L., Bordoloi, N., Hiloidhari, M., Palsaniya, D. R., ... Katakai, R. (2020). Valorization of agricultural wastes for multidimensional use. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64309-4.00002-7>
- Bioplástico Europeo. (2020). *Mercado de bioplásticos de desarrollo 2020*.
- Birania, S., Kumar, S., Kumar, N., Attkan, A. K., Panghal, A., Rohilla, P., & Kumar, R. (2022). Advances in development of biodegradable food packaging material from agricultural and agro-industry waste. *Journal of Food Process Engineering*, 45(1). Retrieved February 20, 2022 from <https://doi.org/10.1111/JFPE.13930>
- Candia, M. N., & Simón, M. H. (2015). *BIOPOLÍMEROS Y BIOPLÁSTICOS*. Argentina.
- Chen, G. Q., & Jiang, X. R. (2017, September 1). Ingeniería de bacterias para la biosíntesis mejorada de polihidroxialcanoatos (PHA). *Biotecnología Sintética y de Sistemas*. KeAi Communications Co. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2017.09.001>
- Cherpinski, A., Torres-Giner, S., Cabedo, L., & Lagaron, J. M. (2017). Post-processing optimization of electrospun submicron poly(3-hydroxybutyrate) fibers to obtain continuous films of interest in food packaging applications. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(10). Retrieved from <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1355115>
- Ciesielski, S., Mozejko, J., & Pisutpaisal, N. (2015). Los aceites vegetales como sustratos prometedores para la producción de polihidroxialcanoatos. In *Revista de producción más limpia* (Vol. 106, pp. 408–421). Elsevier Ltd. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.040>
- Colombo, B., Villegas Calvo, M., Pepè Sciarria, T., Scaglia, B., Savio Kizito, S., D'Imporzano, G., & Adani, F. (2019). Biohidrógeno y polihidroxialcanoatos (PHA) como productos de un bioproceso de dos pasos de desechos lácteos desproteinizados. *Gestión de Residuos*, 95. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.052>
- Coppola, G., Gaudio, M. T., Lopresto, C. G., Calabro, V., Curcio, S., & Chakraborty, S. (2021a). Bioplastic from Renewable Biomass: A Facile Solution for a Greener Environment. *Earth Systems and Environment*, 5(2). Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00208-7>
- Coppola, G., Gaudio, M. T., Lopresto, C. G., Calabro, V., Curcio, S., & Chakraborty, S. (2021b). Bioplástico de biomasa renovable: una solución fácil para un medio ambiente más verde. *Sistemas Terrestres y Medio Ambiente*, 5(2), 231–251. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00208-7>
- Dilkes-Hoffman, L., Ashworth, P., Laycock, B., Pratt, S., & Lant, P. (2019). Actitudes públicas hacia los bioplásticos: conocimiento, percepción y gestión del final de la vida. *Recursos, Conservación y Reciclaje*, 151(104479). Retrieved December 13, 2021 from <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104479>
- Ehman, N., BioResources, M. A., & 2021, undefined. (n.d.). Bioplastics Are Revolutionizing the Packaging Industry. *Search.Ebscohost.Com*. Retrieved February 20, 2022 from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authType=crawler&jrnl=19302126&AN=151907751&h=XXgnjAGpHSQF3kMpW91kQbFY%2BM4ZFU6MSP970hmKMquilBGjHGOi9y8pQcpxJDkFF%2BGPt0mXiMj1Z1aGAgW%2Bg%3D%3D&crl=c>
- El-Tayeb, T., Abdelhafez, A., ... S. A.-B. journal of, & 2012, undefined. (2012). Effect of acid

- hydrolysis and fungal biotreatment on agro-industrial wastes for obtainment of free sugars for bioethanol production. *SciELO Brasil*, 1523–1535. Retrieved February 20, 2022 from <https://www.scielo.br/pdf/bjm/v43n4/37.pdf>
- Fredi, G., & Dorigato, A. (2021). Reciclaje de residuos bioplásticos: una revisión. *Investigación Avanzada de Polímeros Industriales y de Ingeniería*, 4(3), 159–177. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.006>
- Hebbar, U. , R. S. , D. N. , & K. M. R. (2020). *Nano-food Engineering*. (U. Hebbar, S. Ranjan, N. Dasgupta, & R. Kumar Mishra,Eds.). Cham: Springer International Publishing. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44552-2>
- Ikada, Y., Jamshidi, K., Tsuji, H., & Hyon, S. H. (1987). Portadores de maltopentaosa y maltoheptaosa macrómeros de estireno y sus homopolímeros. *Macromoléculas*, 20, 906–908.
- J. P. Kerry. (2012). *Avances en el envasado de carnes, aves y mariscos* (Vol. 220). Woodhead Publishing.
- Jabeen, N., Majid, I., & Nayik, G. A. (2015a). Bioplásticos y envasado de alimentos: una revisión. *Alimentos y Agricultura Convincientes*, 1(1), 2. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749>
- Jabeen, N., Majid, I., & Nayik, G. A. (2015b). Bioplastics and food packaging: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1). Retrieved from <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749>
- Javed, A., Ahmad, A., Tahir, A., & Shabbir, U. (n.d.). Potato peel waste-its nutraceutical, industrial and biotechnological applications. *Researchgate.Net*. Retrieved February 20, 2022 from <https://doi.org/10.3934/agrfood.2019.3.807>
- Jin, T., & Zhang, H. (2008). Polímero de ácido poliláctico biodegradable con nisina para uso en envases de alimentos antimicrobianos. *Revista de Ciencia de Los Alimentos*, 73(3). Retrieved from <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00681.x>
- Jōgi, K., & Bhat, R. (2020). Valorización de residuos y subproductos del procesamiento de alimentos para la producción de bioplásticos. *Química y Farmacia Sostenibles*, 18, 100326. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100326>
- Katiyar, V., Gupta, R., & Ghosh, T. (2019). *Avances en polímeros sostenibles*. (V. Katiyar, R. Gupta, & T. Ghosh,Eds.). Singapore: Springer Singapore. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9804-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9804-0_10)
- Khalil, H. P. S. A., Davoudpour, Y., Saurabh, C. K., Hossain, S., Adnan, A. S., Dungani, R., ... Haa, M. K. M. (2016). Una revisión sobre fibras nanocelulósicas como nueva material para envases sostenibles: Proceso y aplicaciones., 64, 823–836. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.072>
- Koller, M., Maršálek, L., de Sousa Dias, M. M., & Braunegg, G. (2017, July 25). Producir biopoliésteres de polihidroxialcanoato microbiano (PHA) de manera sostenible. *Nueva Biotecnología*. Elsevier B.V. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.05.001>
- Labeaga Viteri, A. (2018). *Polímeros biodegradables . Importancia y potenciales aplicaciones*. Universidsad Nacional de Educación distancia. Retrieved from [http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga\\_Viteri\\_Aitziber\\_TFM.pdf](http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Aitziber_TFM.pdf)
- Lamberti, F. M., Román-Ramírez, L. A., & Wood, J. (2020, October 1). Reciclaje de Bioplásticos: Rutas y Beneficios. *Revista de Polímeros y Medio Ambiente*. Springer. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01795-8>
- Li, M., & Wilkins, M. (2020). Citometría de flujo para la cuantificación de la producción de polihidroxibutirato por *Cupriavidus necator* utilizando licor alcalino pretratado de rastrojo de maíz. *Tecnología Bioambiental*, 295(122254.).
- Llanos Páez, O., Ríos Navarro, A., Augusto Jaramillo Páez, C., & Fernando Rodríguez

- Herrera, L. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación, 11(2). Retrieved February 20, 2022 from <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a12>
- Luís, Á., Domingues, F., & Silva, F. (2020). Bio-Based Materials for Active Food Packaging. In *Food Packaging*. First edition. | Boca Raton, FL : CRC Press, 2020.: CRC Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1201/9780429322129-1>
- Mahmud, Md. A., & Anannya, F. R. (2021). Sugarcane bagasse - A source of cellulosic fiber for diverse applications. *Heliyon*, 7(8). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07771>
- Mamma, D., & Christakopoulos, P. (2014). Biotransformation of Citrus By-Products into Value Added Products. *Waste and Biomass Valorization*, 5(4), 529–549. Retrieved February 20, 2022 from <https://doi.org/10.1007/S12649-013-9250-Y>
- McAdam, B., Brennan Fournet, M., McDonald, P., & Mojicevic, M. (2020). Producción de polihidroxibutirato (PHB) y factores que afectan sus características químicas y mecánicas. *Polímeros*, 12(1), 1–20. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/polym12122908>
- Ministro de Electricidad y Energía Renovable, Ministro Coordinador de Producción, E. y C., & Instituto Nacional de Preinversión. (2014). *ATLAS Bionergético del Ecuador*. Retrieved from Ecuador:
- Misra, M., Pandey, J., & Mohanty, A. (2015). Biocomposites: design and mechanical performance. Retrieved February 20, 2022 from [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=z1SdBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Misra,+M.,+Pandey,+J.,+%26+Mohanty,+A.+\(2015\).+&ots=5XSw48LCNe&sig=1qJSt8O\\_YB-SzPKUZBiEuG3uHJA](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=z1SdBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Misra,+M.,+Pandey,+J.,+%26+Mohanty,+A.+(2015).+&ots=5XSw48LCNe&sig=1qJSt8O_YB-SzPKUZBiEuG3uHJA)
- Mistriotis, A., Briassoulis, D., Giannoulis, A., & D'Aquino, S. (2016). Diseño de envases de atmósfera modificada de equilibrio (EMAP) biodegradables de base biológica para frutas y verduras frescas mediante el uso de películas microperforadas de ácido poliláctico (PLA). *Biología y Tecnología de Poscosecha*, 111, 380–389. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.09.022>
- Murariu, M., & Dubois, P. (2016). Compuestos de PLA: de producción a las propiedades. *Reseñas de Administración Avanzada de Medicamentos*, 107, 17–46. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003>
- ONU Medio Ambiente. (2018). *Plásticos De Un Solo Uso. Tecnology for Enviroment* (Vol. 227).
- Pal, K., Banerjee, I., Sarkar, P., Kim, D., Deng, W. P., Dubey, N. K., & Majumder, K. (2020). *Formulaciones a base de biopolímeros: aplicaciones biomédicas y alimentarias*. ELSEIVER. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816897-4.00001-1>
- Panseri, S., Martino, P., Cagnardi, P., Celano, G., Tedesco, D., Castrica, M., ... Chiesa, L. (2018). Viabilidad de los envases de base biodegradable utilizados para el almacenamiento de carnes rojas durante la vida útil: un estudio piloto. *Química de Los Alimentos*, 248, 1–29. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.067>
- Plásticos Europa. (2020). *Plásticos: Hechos 2020*. Retrieved February 20, 2022 from [https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/ES\\_Plastics\\_the\\_facts-WEB-2020\\_May21\\_final\\_updatedJuly2021.pdf](https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/ES_Plastics_the_facts-WEB-2020_May21_final_updatedJuly2021.pdf)
- Rapisarda, M., Patanè, C., Pellegrino, A., Malvuccio, A., Rizzo, V., Muratore, G., & Rizzarelli, P. (2020a). Compostable Polylactide and Cellulose Based Packaging for Fresh-Cut Cherry Tomatoes: Performance Evaluation and Influence of Sterilization Treatment. *Materials*, 13(15). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma13153432>
- Rapisarda, M., Patanè, C., Pellegrino, A., Malvuccio, A., Rizzo, V., Muratore, G., &

- Rizzarelli, P. (2020b). Compostable Polylactide and Cellulose Based Packaging for Fresh-Cut Cherry Tomatoes: Performance Evaluation and Influence of Sterilization Treatment. *Materials*, 13(15). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma13153432>
- Rapisarda, M., Patanè, C., Pellegrino, A., Malvuccio, A., Rizzo, V., Muratore, G., & Rizzarelli, P. (2020c). Envases compostables a base de polilactida y celulosa para tomates cherry recién cortados: evaluación del rendimiento e influencia del tratamiento de esterilización. *Materiales*, 13(15), 1–18. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma13153432>
- Raza, Z. A., Abid, S., & Banat, I. M. (2018). Polihidroxicanoatos: características, producción, desarrollos recientes y aplicaciones. *Biodeterioro y Biodegradación Internacionales*, 126, 45–56. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.001>
- Safaei, M., & Roosta Azad, R. (2020). Preparación y caracterización de películas a base de ácido poliláctico que contienen extracto etanólico de propóleo para su uso en el envasado de carne. *Revista-Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 57(4), 1242–1250. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04156-z>
- Sillanpää, M., & Ncibi, C. (2017). *Una bioeconomía sostenible. La revolución industrial verde*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55637-6>
- Sin, L. T., & Tueen, A. S. (2019). *Ácido poliláctico*. (ELSEIVER, Ed.). William Andrew.
- Singh Nee Nigam, P., Gupta, N., & Anthwal, A. (2009). Pre-treatment of agro-industrial residues. *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation: Utilisation of Agro-Residues*, 13–33. Retrieved February 20, 2022 from [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_2)
- Singhvi, M., & Gokhale, D. (2013). Biomass to biodegradable polymer (PLA), 3, 13558. Retrieved from <https://doi.org/10.1039/c3ra41592a>
- Singhvi, M. S., Zinjarde, S., & Gokhale, D. (2019). Ácido poliláctico (PLA): síntesis y aplicaciones biomédicas. *Revista de Microbiología Aplicada*, 1–15. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/jam.14290>
- Sirohi, R., Prakash Pandey, J., Kumar Gaur, V., Gnansounou, E., & Sindhu, R. (2020, September 1). Resumen crítico de las materias primas de biomasa como sustratos sostenibles para la producción de polihidroxibutirato (PHB). *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123536>
- Tang, Z., Chen, X., Pang, X., Yang, Y., Zhang, X., & Jing, X. (2004). Polimerización estereoselectiva de rac-lactida usando un complejo de base de monoetilaluminio Schiff. *Biomacromoléculas*, 5, 965–970.
- Tokiwa, Y., & Calabia, B. P. (2007). Biodegradabilidad y Biodegradación de Poliésteres. *Revista de Polímeros y Medio Ambiente*, 15(4), 259–267. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0066-3>
- Tsang, Y. F., Kumar, V., Samadar, P., Yang, Y., Lee, J., Ok, Y. S., ... Jeon, Y. J. (2019). Producción de bioplásticos mediante la valorización de residuos alimentarios. *Internacional Ambiental*, 127, 625–644. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.076>
- Urbanek, A. K., Mirończuk, A. M., García-Martín, A., Saborido, A., de la Mata, I., & Arroyo, M. (2020). Propiedades bioquímicas y aplicaciones biotecnológicas de las enzimas microbianas implicadas en la degradación de plásticos tipo poliéster. *BBA Proteínas-Proteómica*, 1868(2). Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2019.140315>
- Wang, S., Lydon, K. A., White, E. M., Grubbs, J. B., Lipp, E. K., Locklin, J., & Jambeck, J. R. (2018). Biodegradación de plástico de poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxihexanoato) en condiciones de lodo anaeróbico y agua de mar aeróbica: evolución de gas y diversidad microbiana. *Entorno. Ciencia Tecnología*, 52(10), 5700–5709. Retrieved from

<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06688>

- Wei, X. W., Guo, G., Gong, C. Y., Gou, M. L., & Qian, Z. Y. (2011). Polímeros biodegradables: investigación y aplicaciones. In Real Sociedad de Química (Ed.), *Un manual de tecnología aplicada de biopolímeros. Síntesis, degradación y aplicaciones*. (pp. 365–387). Londres: Sharma, S.K., Mudhoo, A.
- Zhang, W., Luo, J., Ding, L., & Jaffrin, M. Y. (2015). Una revisión sobre la disminución del flujo estrategias de control en procesos de membrana impulsados por presión. *Industrial y Investigación En Ingeniería Química*, 54(11), 2843–2861. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/ie504848m>