

## VALORIZACIÓN DEL SUERO LÁCTEO RESIDUAL PARA LA PRODUCCIÓN BIOTECNOLÓGICA DE BIOPLÁSTICOS<sup>a</sup>

### VALORIZATION OF RESIDUAL WHEY FOR THE BIOTECHNOLOGICAL PRODUCTION OF BIOPLASTICS

R. Reyes-Bautista; M. Barajas-Segoviano\*; A.G. Valdivia-Mancillas; L.A. Xoca-Orozco; J.J. Flores-Sierra

*Laboratorio de Bioprocesos, División de Ingeniería Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón. Blvd. del Valle No. 2301, Guardarrayas, C.P. 36425, Purísima del Rincón, Guanajuato, México.*

*\* E-mail: martin.bs@purisima.tecnm.mx*

Fecha de envío: 19, enero, 2026

Fecha de publicación: 20, junio, 2026

#### Resumen:

La producción y acumulación de plásticos convencionales generan impactos ambientales significativos, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. En este contexto, los bioplásticos como los polihidroxialcanoatos (PHA) destacan como por sus características biodegradables y biocompatibles, los cuales pueden ser producidos biológicamente; sin embargo, su aplicación a gran escala se ve limitada por los elevados costos de producción, principalmente asociados a la fuente de carbono, la limitación en la relación C/N y a los metabolismos implicados en la producción de la acumulación de C en forma de PHA. El aprovechamiento de subproductos industriales, como el suero lácteo, ha sido explorado como una estrategia para reducir costos y mejorar la sostenibilidad del proceso. No obstante, la valorización eficiente del suero para la producción de PHA enfrenta desafíos relacionados con su pretratamiento y la selección de cepas productoras. Esta revisión sintetiza el estado actual del conocimiento sobre el uso del suero en la producción de PHA y discute estrategias para superar las limitaciones técnicas existentes.

**Palabras clave:** Polihidroxialcanoatos, sostenibilidad, biodegradación, residuos, economía circular.

#### Abstract:

The production and accumulation of conventional plastics generate significant environmental impacts, which has driven the search for sustainable alternatives. In this context, bioplastics such as polyhydroxyalkanoates (PHA) stand out due to their biodegradable and biocompatible characteristics, which can be produced biologically. However, their large-scale application is limited by high production costs, mainly associated with the carbon source, the limitation in the C/N ratio, and the metabolisms involved in the accumulation of C as PHA. The utilization of industrial by-products, such as whey, has been explored as a strategy to reduce costs and improve the sustainability of the process. Nonetheless, the efficient valorization of whey for PHA production faces challenges related to its pretreatment and the selection of producing strains. This review

<sup>a</sup> El presente estudio fue un proyecto de investigación financiado por el Tecnológico Nacional de México.

synthesizes the current state of knowledge on the use of whey in PHA production and discusses strategies to overcome existing technical limitations.

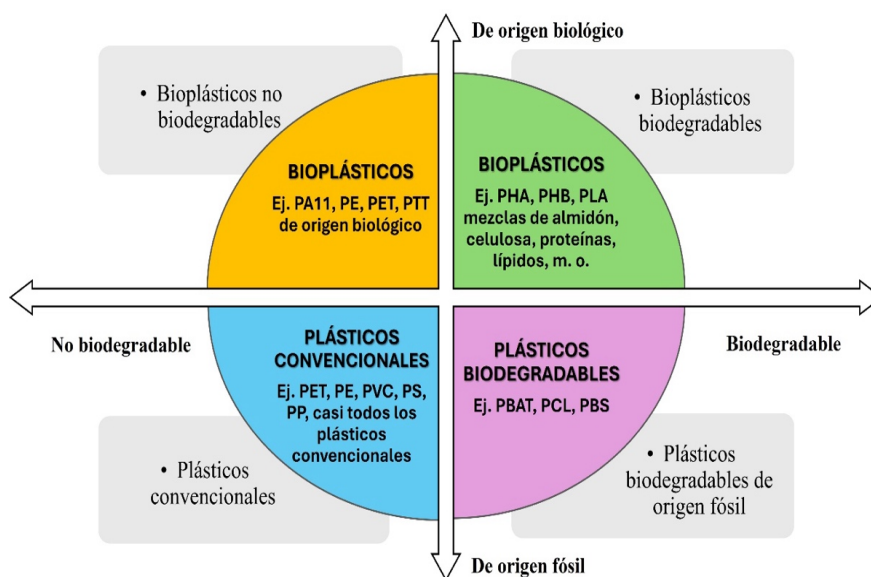
**Keywords:** Polyhydroxyalkanoates, Sustainability, Biodegradation, Waste, Circular economy.

## 1. INTRODUCCIÓN

El término "plástico" proviene de la palabra griega plastikos, que significa "capaz de ser moldeado" (Hu et al., 2018). Estos son polímeros orgánicos sintéticos o semisintéticos de cadena larga con alta masa molecular, derivados principalmente de productos petroquímicos. Los plásticos se han convertido en una piedra angular de la sociedad moderna debido a sus propiedades únicas como peso ligero, moldeo, durabilidad, etc., lo que resulta en un rendimiento superior a los materiales tradicionales como el metal y la madera (Rajput et al., 2025; Reichert et al., 2020). Aproximadamente 6.3 mil millones de toneladas de plásticos se generaron en todo el mundo entre 1950 y 2018, de las cuales solo el 9% se recicló y el 12% se quemó para su eliminación (Alabi et al., 2019). La cantidad de producción de plástico se ha expandido aproximadamente 20 veces desde 1964. Casi 311 millones de toneladas de plásticos se produjeron en 2014 en todo el mundo, se proyecta que se duplicará en las próximas dos décadas y posiblemente se cuadruplicará para 2050 (Sindhu et al., 2024). Alrededor del 93% de los plásticos terminan en vertederos o en el océano. El creciente volumen de residuos plásticos en la tierra se ha convertido en un problema importante debido a la disminución de la capacidad de los vertederos, así como la acumulación de plásticos en los océanos (Stanley et al., 2025). Además, la quema de plásticos emana gases nocivos como el dióxido de carbono y el metano. Estos gases juegan un papel importante en los cambios climáticos globales. Otro problema con los plásticos es su resiliencia, que evita que se desintegren incluso después de miles de años en el medio ambiente (Sindhu et al., 2024).

Los polímeros de base biológica (bioplásticos) se están desarrollando como un material de sustitución y una posible solución al conservar las características benéficas de los materiales plásticos (de origen fósil) al tiempo que permiten una transición hacia una economía circular, reducen la extracción de recursos fósiles y mitigan potencialmente las cargas ambientales que surgen al final de la vida útil (Bishop et al., 2021). La definición de "bioplástico" es genérica, lo que significa que el término a menudo no es claro. El término «bioplástico» abarca plásticos duraderos y no degradables (mezclas puras o

parciales) fabricados a partir de una fuente biológica o plásticos biodegradables (Rajput et al., 2025). Los «bioplásticos biodegradables» pueden incluir plásticos biodegradables de origen biológico (PHA, PHB y PLA), pero también plásticos petroquímicos biodegradables (Figura 1), como el tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT, por sus siglas en inglés: polybutylene adipate terephthalate), policaprolactona (PCL, por sus siglas en inglés: polycaprolactone) y el succinato de polibutileno (PBS, por sus siglas en inglés: polybutylene succinate) (Spierling et al., 2018).



**Figura 1.** Tipos de plásticos, su degradabilidad y ejemplos (George et al., 2021; Sindhu et al., 2024).

**Figure 1.** Types of plastics, their degradability, and examples (George et al., 2021; Sindhu et al., 2024).

Poliamida 11 (PA11, por sus siglas en inglés: Polyamide 11), Polietileno (PE, por sus siglas en inglés: Polyethylene), Tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés: Polyethylene terephthalate), Tereftalato de politrimetileno (PTT, por sus siglas en inglés: Polytrimethylene terephthalate), Polihidroxialcanoatos (PHA, por sus siglas en inglés: Polyhydroxyalkanoates), Polihidroxibutirato (PHB, por sus siglas en inglés: Polyhydroxybutyrate), Ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés: Polylactic acid), policloruro de vinilo (PVC, por sus siglas en inglés: Polyvinyl chloride), Poliestireno (PS, por sus siglas en inglés: Polystyrene), Polibutileno adipato tereftalato (PBAT, por sus siglas en inglés: Polybutylene adipate terephthalate), Policaprolactona (PCL, por sus siglas en inglés: Polycaprolactone) y Polibutileno succinato (PBS, por sus siglas en inglés: Polybutylene succinate).

Las principales materias primas utilizadas en la producción de plásticos biodegradables son la celulosa y el almidón, derivados cultivos agrícolas. Por lo tanto, para producir estos plásticos a escala industrial, la tierra cultivable que podría haberse utilizado para cultivar

alimentos debe usarse para producir las materias primas. Estas preocupaciones pueden resolverse utilizando los residuos orgánicos como materia prima para la producción de bioplásticos. Los procesos industriales producen una enorme cantidad de biorresiduos, especialmente las unidades alimentarias y agrícolas (George et al., 2021). Por lo que el objetivo de la presente revisión fue recolectar la información científica para la valorización del suero lácteo residual como medio para la producción biotecnológica de bioplásticos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente revisión bibliográfica se realizó mediante una búsqueda sistemática de literatura científica en las bases de datos Web of Science y Scopus. La búsqueda se limitó a publicaciones realizadas entre 2016 y 2026, con el propósito de recopilar información actualizada sobre la valorización del suero lácteo residual para la producción biotecnológica de bioplásticos. Se emplearon como términos de búsqueda, de manera individual y combinada, las palabras clave: “whey”, “whey wastewater”, “bioplastics”, “polyhydroxyalkanoates”, “circular economy”, “microorganisms”, “waste valorization”, “sustainability”, “biodegradation” y “biotransformation”. Como criterio de inclusión se consideraron artículos científicos, revisiones y documentos técnicos que abordaran el aprovechamiento del suero lácteo residual como fuente de carbono para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA). Se excluyeron aquellos estudios enfocados en la utilización del suero lácteo para la síntesis de otros polímeros distintos a los PHA o para la producción de biocombustibles y otras fuentes de energía renovable. La información seleccionada fue analizada y organizada de acuerdo con su relevancia para los objetivos de la presente revisión.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Bioplásticos

Los plásticos biodegradables se definen como plásticos que se degradan de forma natural por la acción de microorganismos como algas, bacterias y hongos (Goel et al., 2021).

Existen diferentes categorías de plásticos biodegradables, los que se originan a partir de fuentes de petróleo y los plásticos de origen biológico, los cuales pueden sustituir potencialmente a los plásticos convencionales que se utilizan con frecuencia en la actualidad. Los plásticos de origen biológico y biodegradables pueden sustituir

potencialmente a los plásticos más convencionales que se utilizan con frecuencia en la actualidad, se consideran el tipo más grande de plásticos que se obtienen de la biomasa, ya que se producen de origen biológico, se metabolizan en la biomasa orgánica y su producto final es biodegradable o está acoplado a la biomasa y a la biodegradabilidad (Nizamuddin et al., 2024). Según la Organización Europea de Bioplásticos (EUBP, por sus siglas en inglés: *European Bioplastics*), el plástico de origen biológico es un material plástico que es biodegradable, de origen biológico o presenta ambas características (Goel et al., 2021). Con base en esta definición, los plásticos de origen biológico se pueden clasificar en tres categorías: (i) bioplásticos de origen biológico, (ii) bioplásticos biodegradables y (iii) bioplásticos de origen biológico y biodegradables (Goel et al., 2021).

Los plásticos de origen biológico (o biopolímeros) más comunes son los polisacáridos, incluidos los derivados de celulosa y almidón, los alginatos y el quitosano; las proteínas, incluidos el gluten, el suero y la caseína; los lípidos, incluidos los ácidos grasos libres, y las ceras de abejas y de carnauba; los polihidroxialcanoatos (PHA), los polihidroxitiratos (PHB); la policaprolactona (PCL); el ácido poliglicólico (PGA); el ácido poliláctico (PLA); el alcohol polivinílico; el succinato de polibutileno y sus mezclas (Youssef & El-Sayed, 2018).

Los polihidroxialcanoatos (PHA) son poliésteres producidos biológicamente que han sido considerados alternativas extremadamente valiosas a los plásticos derivados del petróleo comúnmente utilizados (Dietrich et al., 2017). Se ha encontrado que estas moléculas sirven como almacenamiento de carbono y equivalentes reductores, y que lo hacen agregándose en gránulos dentro de las células bacterianas. Los PHA son biocompatibles y biodegradables y tienen propiedades similares a las de los polímeros convencionales (Rana et al., 2023). A pesar de sus cualidades superiores y beneficios ambientales, los altos costos de producción de los PHAs impiden su aplicación generalizada. El uso de costosas fuentes de carbono de fermentación, que representan aproximadamente el 40% de los costos totales de producción de PHA, es un factor importante en estos altos precios (Nielsen et al., 2017). Debido a lo mencionado anteriormente, el uso de materiales de desecho como fuentes de carbono para la producción de PHA de origen microbiano con el fin de reducir simultáneamente tanto la producción de PHA como los costos de eliminación de residuos. La familia los PHA posee

características mecánicas sobresalientes que van desde cristalinas hasta elásticas, que dependen en gran medida de la configuración de las unidades monoméricas. Los PHA funcionalizados se sintetizan a partir de monómeros más grandes, por ejemplo, mcl-PHA de cadena media, unidos a unidades monoméricas C6–C14, que son estereotípicamente elastómeros y son materiales pegajosos que se pueden modificar para formar caucho. Al principio, los PHA y sus derivados se utilizaron en la industria de películas para embalajes, principalmente en el recubrimiento de papel, contenedores y formación de bolsas. Comparables a los plásticos convencionales que contienen productos desechables se incluyen pañales, envases de cosméticos y champú, maquinillas de afeitar, materiales higiénicos, utensilios, vasos y botellas (Nizamuddin et al., 2024).

El ácido poliláctico (PLA) es un biopoliéster biodegradable hecho por condensación de monómeros de ácido láctico (AL), y uno de los plásticos ecológicos más prometedores en la actualidad, ya que se asemeja mucho al poliestireno (PS) y al polipropileno (PP) en la mayoría de sus propiedades. Debido a su baja toxicidad, el PLA tiene estatus generalmente reconocido como seguro (GRAS, por sus siglas en inglés: Generally Recognized As Safe) y también puede usarse en el envasado de alimentos. Es biodegradable, por lo que puede comportarse por lo su eliminación no causará ninguna preocupación medioambiental (Narayanan et al., 2017). El PLA es un buen sustituto de los polímeros basados en hidrocarburos, pero debido al alto costo de la fermentación, su producción no es una solución competitiva. La utilización de materiales renovables, principalmente residuos agroindustriales como el suero y el permeado de suero es una alternativa prometedora para la producción de PLA a costo reducido (Zandona et al., 2021).

### 3.1.1 Polihidroxialcanoatos (PHA)

Los PHA son polímeros lineales sintetizados por bacterias (gramnegativas y grampositivas), se almacenan como gránulos y actúan como material de reserva de energía. Se acumulan como polímeros móviles amorfos rodeados por una monocapa de fosfolípidos que contiene fasinas (principales proteínas asociadas a los gránulos de PHA) (Mezzina & Pettinari, 2016; Thamarai et al., 2024). Se trata de poliésteres isotácticos de hidroxialcanoatos. Los PHA están compuestos por monómeros de ácidos grasos (3-hidroxi enantioméricamente puros) y se acumulan como gránulos en el citoplasma celular; estos gránulos de PHA se producen en condiciones limitantes de nutrientes,



como en ausencia de nitrógeno o fósforo (Giubilini et al., 2021), se encuentran rodeados por una membrana, y se forman como inserciones intracelulares de 0.2 a 0.5  $\mu\text{m}$  de diámetro (Alcântara et al., 2020). Este polímero sintético ha despertado gran interés en las últimas décadas, desde que se descubrió la presencia intracelular de poli( $\beta$ -hidroxibutirato) en la bacteria *Bacillus megaterium* (Raut et al., 2026).

Generalmente, los PHA se clasifican en tres categorías según el número de átomos de carbono: PHA de cadena corta (scl-PHA, por sus siglas en inglés: short-chain length - PHA), PHA de cadena media (mcl-PHA, por sus siglas en inglés: médium-chain length - PHA) y PHA de cadena larga (lcl-PHA, por sus siglas en inglés: long-chain length - PHA). Los scl-PHA tienen entre 3 y 5 átomos de carbono en las cadenas del polímero, mientras que los mcl-PHA contienen entre 6 y 14 átomos de carbono y los lcl-PHA contienen más de 14 átomos de carbono unidos a la cadena lateral (Sabapathy et al. 2020).

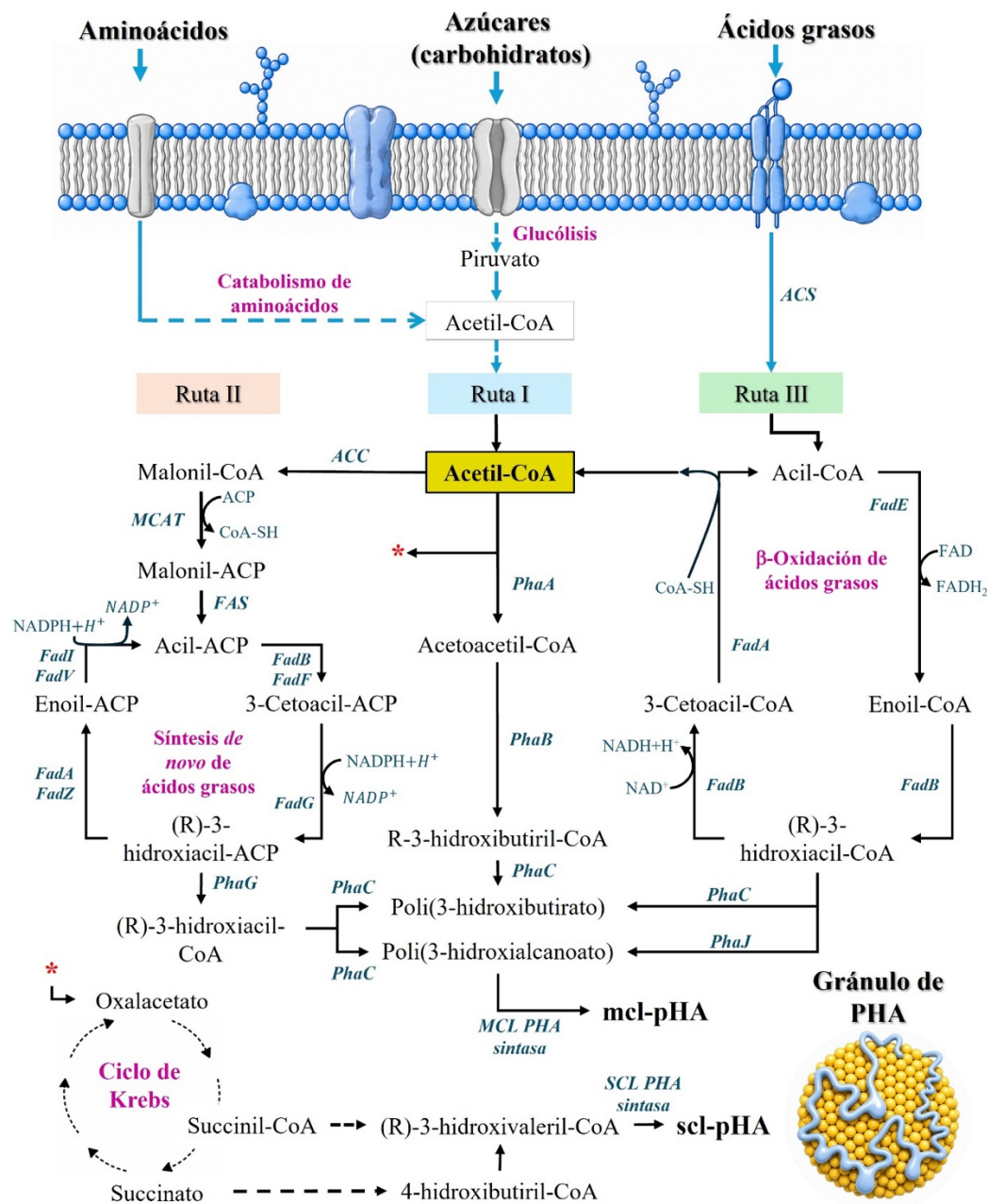
### 3.1.2. Síntesis microbiana de PHA

La biosíntesis de PHA en células microbianas ocurre a través de dos fases metabólicas secuenciales: (1) formación de monómeros y (2) ensamblaje de gránulos impulsado por polimerización (Yao et al., 2025). Primero, la fuente de carbono se convierte en el monómero (hidroxiacil-CoA) principalmente a través de cuatro vías metabólicas: la glucólisis (Ruta I) y el ciclo Krebs, la biosíntesis de ácidos grasos (Ruta II) y la  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos (Ruta III) (Fig. 2); estos procesos metabólicos se encuentran divididos en tres principales rutas. Segundo, bajo la catálisis de las sintasas de PHA, las moléculas precursoras se polimerizan en PHA (Kalia et al., 2025).

#### 3.1.2.1 Ruta I. Síntesis de PHA de cadena corta (scl-PHA)

La síntesis de PHA de cadena corta (scl-PHA) involucra la conversión de diversas fuentes de carbono, como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos, en acetil-CoA, el principal precursor de esta vía metabólica. En bacterias como *Cupriavidus necator* (anteriormente *Ralstonia eutropha*), la biosíntesis de scl-PHA está regulada por el operón *phaCAB*, que codifica la  $\beta$ -cetotiolasa (PhaA), la acetoacetil-CoA reductasa dependiente de NADPH (PhaB) y la PHA sintasa (PhaC) (Kim et al., 2022). Inicialmente, dos moléculas de acetil-CoA se condensan para formar acetoacetil-CoA mediante la acción de PhaA. Posteriormente, PhaB reduce este intermediario a (R)-3-hidroxibutiril-CoA utilizando NADPH como cofactor. Finalmente, la scl-PHA sintasa, con especificidad por

monómeros de tres a cinco átomos de carbono, polimeriza el (R)-3-hidroxiacil-CoA para formar poli(3-hidroxiacilato) [P(3HA)], uno de los biopolímeros más ampliamente estudiados dentro de esta familia (Mai et al., 2024; Ray & Kalia, 2017; Saravanan et al., 2022).



**Figura 2.** Rutas metabólicas para la biosíntesis de PHA en microorganismos. Adaptada de (Getino et al., 2024; Kalia et al., 2025; Raut et al., 2026; Saravanan et al., 2022, Siegu et al., 2026; Thamarai et al., 2024; Yao et al., 2025).



**Figure 2.** Metabolic pathways for PHA biosynthesis in microorganisms. Adapted from (Getino et al., 2024; Kalia et al., 2025; Raut et al., 2026, Saravanan et al., 2022; Siegu et al., 2026; Thamarai et al., 2024; Yao et al., 2025).

Estos polímeros son sintetizados a partir de azúcares (carbohidratos), ácidos grasos y aminoácidos; se muestran las principales rutas catabólicas (glucólisis, ciclo de Krebs,  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos) y anabólicas (síntesis *de novo* de ácidos grasos), así como las rutas correspondientes para la formación de polímeros de cadena corta (scl-PHA) y de cadena media (mcl-PHA). Biomoléculas involucradas: ACP (proteína transportadora de acilos), CoA-SH (coenzima A libre), NADP<sup>+</sup> y NADPH+H<sup>+</sup> (nicotinamida adenina dinucleótido fosfato en estados de oxidación y reducción), NAD<sup>+</sup> y NADH+H<sup>+</sup> (nicotinamida adenina dinucleótido en estados redox: oxidación y reducción), FAD y FADH<sub>2</sub> (flavín adenina dinucleótido en estados de oxidación y reducción), ACS (acil-CoA sintetasa), ACC (acetil-CoA carboxilasa), MCAT (malonil-CoA transacilasa), FAS (ácido graso sintasa) PhaA ( $\beta$ -cetotiolasa), PhaB (acetoacetil-CoA reductasa), PhaC (PHA sintasa), PhaG (3-hidroxiacil-ACP-CoA transferasa), PhaJ ((R)-enoil-CoA hidratasa), FadE (acil-CoA deshidrogenasa), FadB (complejo enoil-CoA hidratasa/3-hidroxiacil-CoA deshidrogenasa), FadA (3-cetoacil-CoA tiolasa), FadI, FadV, FadZ, FadG y FadF, enzimas accesorias involucradas en la síntesis y degradación de ácidos grasos.

Por otra parte, en la Ruta I se generan moléculas de acetil-CoA que pueden incorporarse al ciclo de Krebs, dando lugar a intermediarios metabólicos como succinil-CoA y succinato. Estos compuestos actúan como precursores de (R)-3-hidroxi valeril-CoA y 4-hidroxi butiril-CoA, respectivamente, los cuales son utilizados en la biosíntesis de polímeros de polihidroxialcanoatos de cadena corta (scl-PHA).

### 3.1.2.2 Ruta II. Síntesis *de novo* de ácidos grasos

En esta ruta, los azúcares y los aminoácidos son metabolizados mediante la glucólisis y catabolismo de aminoácidos, respectivamente, para generar acetil-CoA, el cual ingresa a la vía de síntesis *de novo* de ácidos grasos. Durante este proceso se forman intermediarios del tipo R-3-hidroxiacil-ACP, que actúan como precursores directos para la biosíntesis de PHA. La enzima 3-hidroxiacil-ACP transferasa (PhaG), codificada por el gen *phaG*, cataliza la conversión de R-3-hidroxiacil-ACP a R-3-hidroxiacil-CoA, proporcionando los monómeros requeridos para la polimerización y formación de PHA (Li et al., 2019). Esta vía constituye un importante enlace metabólico entre la biosíntesis de ácidos grasos y la acumulación de PHA, y se ha demostrado que, junto con la  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos, puede suministrar precursores para la producción de estos biopolímeros mediante rutas independientes (Siegu et al., 2026).

### 3.1.2.3 Ruta III. $\beta$ -oxidación de ácidos grasos

La  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos constituye una de las principales rutas para la síntesis de PHA de longitud de cadena media (mcl-PHA), utilizando ácidos grasos como fuente de carbono. Durante este proceso, los ácidos grasos son convertidos inicialmente en

enoil-CoA, que posteriormente es transformado en (R)-3-hidroxiacil-CoA por la acción de la enoil-CoA hidratasa (PhaJ), proporcionando los monómeros necesarios para la polimerización mediada por la mcl-PHA sintasa (PhaC-mcl) (Jayalath et al., 2025). Además, esta vía puede generar intermediarios como (R)-3-hidroxi butiril-CoA y (R)-3-hidroxi valeril-CoA, precursores de copolímeros como poli(3-hidroxi butirato-co-3-hidroxi valerato) (PHBV). En el caso de la síntesis de poli(3-hidroxi butirato-co-3-hidroxi hexanoato) (PHBHHx), intervienen etapas adicionales asociadas a la  $\beta$ -oxidación y a enzimas codificadas por los genes *phaJ* y *phaG*, que canalizan intermediarios hacia la biosíntesis de PHA (Saravanan et al., 2022; Wang et al., 2023).

En conjunto, existe consenso en que la biosíntesis microbiana de PHA depende de la disponibilidad de hidroxiacil-CoA generados a través de rutas centrales del metabolismo del carbono, principalmente la formación de acetil-CoA, la síntesis *de novo* de ácidos grasos y la  $\beta$ -oxidación. Sin embargo, la contribución relativa de cada ruta varía significativamente entre especies microbianas y según la fuente de carbono empleada, lo que dificulta la generalización de estrategias para maximizar la producción y composición de los polímeros. Una tendencia reciente es el uso de herramientas de ingeniería metabólica para redirigir los flujos de carbono hacia intermediarios específicos y obtener PHA con propiedades a medida. No obstante, persisten vacíos de conocimiento relacionados con la regulación coordinada de los genes *pha*, la interacción entre las rutas metabólicas competidoras y los mecanismos que determinan la acumulación selectiva de distintos monómeros, aspectos que continúan limitando la optimización racional de los procesos de producción a escala industrial.

### 3.2 SUERO

El suero es el líquido resultante de la coagulación de la caseína contenida en la leche mediante enzimas (suero dulce) o ácidos (suero ácido), proveniente de la fabricación de queso o caseína, y suele describirse como un fluido amarillento-verdoso (Choudhary et al., 2023). En general, contiene alrededor de 93 % de agua y 6–7 % de sólidos totales (Cuadro 1). Alrededor del 80-90% de la leche utilizada en la producción de queso termina como suero, mientras que retiene alrededor del 55% de los nutrientes disponibles de la leche, incluyendo proteínas, lactosa y minerales (Buchanan et al., 2023; Delgado-Macuill et al., 2025). El crecimiento sostenido del sector lácteo sugiere que, para el año 2030, la producción mundial de suero lácteo podría superar los 240 millones de toneladas

anuales, asociado principalmente a la mayor demanda de queso y otros derivados lácteos (Weerasingha et al., 2025).

Se ha proyectado el mercado de los productos derivados del suero y se estima que el valor de los ingredientes obtenidos a partir del suero lácteo supere los 81 mil millones de dólares para 2025, impulsado por su elevada calidad nutricional y sus propiedades bioactivas (Weerasingha et al., 2025). Sin embargo, a pesar de su potencial, gran parte del suero producido a nivel mundial es subutilizado o se elimina de forma inadecuada, generando problemas ambientales. A nivel mundial, se estima que aproximadamente el 58 % del suero se utiliza en aplicaciones alimentarias, mientras que el 42 % restante se convierte en piensos, fertilizantes o se desperdicia (Ganju & Gogate, 2017). Debido a malas prácticas en pequeñas y medianas queseras, cuando el suero es eliminado genera aguas residuales altamente contaminantes debido a su alta demanda química de oxígeno (DQO) entre 50 000 a 80 000 mg/L, así como de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 40 000 a 60 000 mg/L (Estikomah et al., 2023). Esto puede derivar en impactos como la degradación del suelo, la toxicidad acuática y la disminución del oxígeno en cuerpos de agua (eutrofización), lo que genera una necesidad urgente de estrategias más sostenibles para el aprovechamiento del suero (Weerasingha et al., 2025).

**Cuadro 1.** Composición química proximal y parámetros fisicoquímicos del suero.

**Table 1.** Proximal chemical composition and physicochemical parameters of whey.

| Parámetro (%)      | Suero dulce | Suero ácido |
|--------------------|-------------|-------------|
| Agua               | 92-93       | 93-95       |
| Sólidos totales    | 6.0-6.5     | 5-6         |
| Lactosa            | 4.5-5.0     | 3.8-4.3     |
| Proteína Total     | 0.8-1.0     | 0.8-0.1     |
| Proteína del suero | 0.6-0.65    | 0.6-0.65    |
| Ácido cítrico      | 0.06-0.1    | 0.07-0.1    |
| Cenizas            | 0.5-0.7     | 0.5-0.7     |
| Ácido láctico      | < 0.1       | > 0.8       |
| pH (valor)         | 6.2-6.4     | 4.6-5.0     |
| °SH (valor)*       | ~ 4         | 20-25       |
| CE (mS/cm)         | 20.1-26.7   | 12.7-16.5   |

\* °SH: Grados Soxhlet-Henkel, CE: Conductividad Eléctrica. Adaptada de (Choudhary et al., 2023; Khramtsov et al., 2017; Weerasingha et al., 2025).

### 3.2.1 Suero como sustrato para la producción de bioplásticos.

La interconexión de los procesos de biotecnológicos son una estrategia clave para maximizar el uso de residuos agroindustriales y aumentar los ingresos potenciales de toda la cadena de bioprocesamiento en la producción de bioplásticos. El uso del suero como sustrato para la producción de bioplásticos ha cobrado interés últimamente, ya que la lactosa presente en el permeado de suero puede convertirse fácilmente en polihidroxialcanoatos (PHA) y ácido poliláctico (PLA) (Ryan & Walsh, 2016). Los bioplásticos así producidos pueden usarse posteriormente en las industrias de envasado, materiales de pulverización, materiales para dispositivos, productos electrónicos, productos agrícolas, productos de automatización, medios químicos y disolventes. En esta revisión se profundiza en la producción de PHA mediante el suero residual derivado de la industria láctea, debido a que es el que presenta mayor cantidad de documentos científicos de investigación publicados hasta la fecha.

### 3.2.2 Microorganismos utilizados para producir bioplásticos

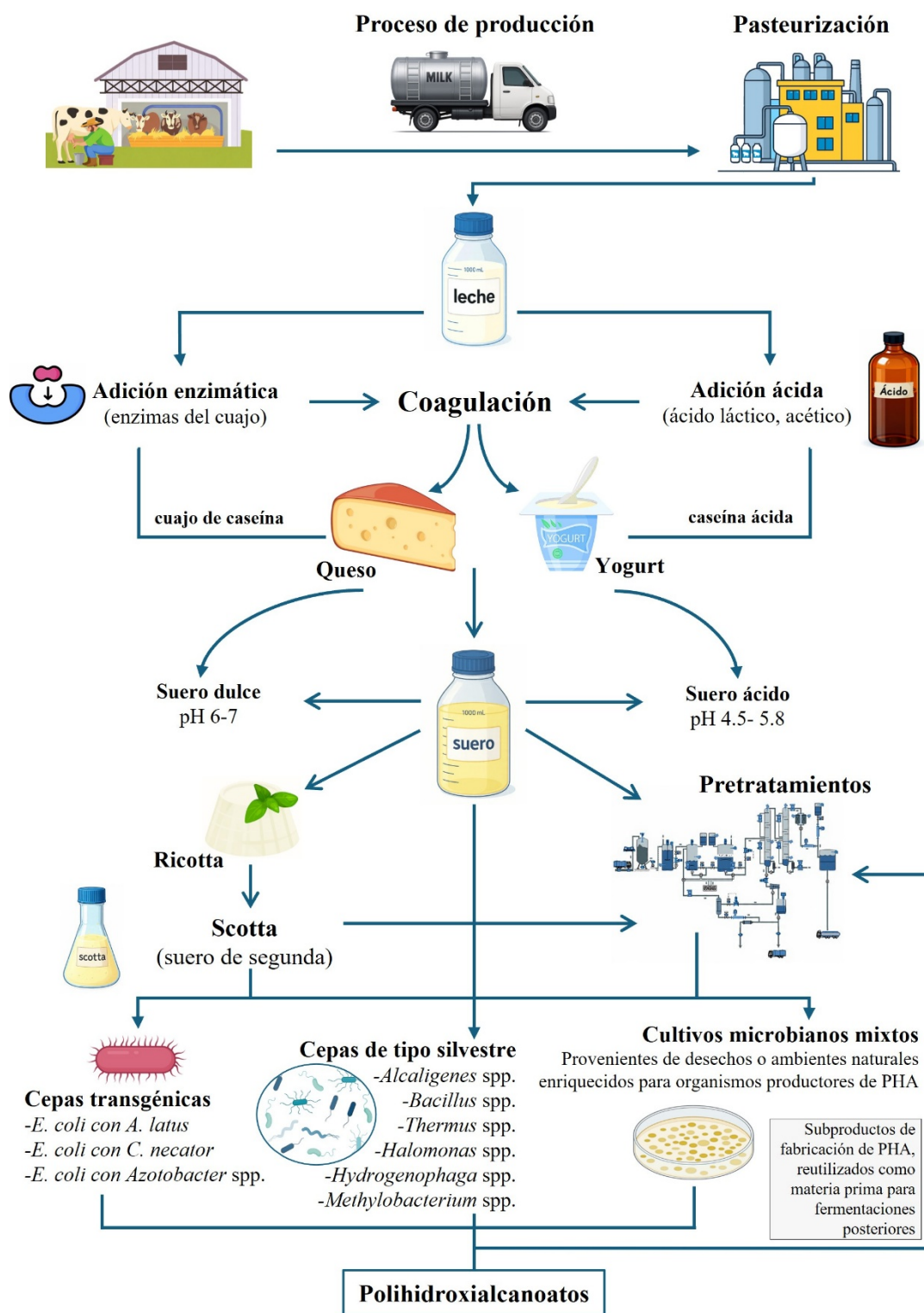
El suero es un medio rico en nutrientes idealmente adecuado para el crecimiento microbiano. Sin embargo, se ha demostrado que localizar bacterias capaces de producir PHAs de manera eficiente, mientras crecen en suero, es difícil. Lamentablemente, se ha demostrado que varias especies microbianas productoras de PHA bien explicadas son incapaces de sintetizar PHAs directamente a partir del suero (Amaro et al., 2019). *Cupriavidus necator*, anteriormente conocida como *Ralstonia eutropha*, *Wautersia eutropha* y *Alcaligenes eutrophus*, tiene la capacidad de acumular PHA, alrededor del 80% del peso seco total mientras crece en presencia de glucosa, pero es incapaz de crecer y producir PHAs de manera eficiente en presencia de lactosa, la principal fuente de carbono del suero. Otro ejemplo es la bacteria arqueal halófila *Haloferax mediterranei*, que tiene la capacidad de acumulación de PHAs de casi el 60% de su peso seco (Sharma et al., 2016). A pesar de que *H. mediterranei* puede consumir lactosa, no la utiliza como una fuente eficiente para el crecimiento y la producción de PHA. *Alcaligenes latus* se destaca como una excepción porque sintetiza PHA y puede concentrar PHA hasta en un 70% de su peso seco a partir de una amplia gama de fuentes de azúcar. *A. latus* puede producir PHA a partir de lactosa de suero ( $0.11 \text{ g L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) (Amaro et al., 2019). En ciertos casos, la pre-fermentación de la lactosa del suero en glucosa y galactosa ayudó a bacterias altamente productoras de PHA a producirlos (Surendran et al., 2020).

Utilizando esta lactosa de suero hidrolizada, se demostró que microorganismos productores de PHA, como *C. necator* y *H. mediterranei*, pueden fabricar PHAs. Sin embargo, desde un punto de vista industrial, es preferible minimizar el costo adicional de los PHAs que resultan de transformar la lactosa del suero en glucosa y galactosa antes de la fermentación. Mediante el uso de técnicas de ingeniería genética, estos pasos de conversión ya se han omitido. Por ejemplo, se diseñaron células de *Escherichia coli* consumidoras de lactosa para expresar genes involucrados en la vía de biosíntesis de PHA de bacterias con una alta tasa de producción de PHA (Rana et al., 2023).

En la Figura 3 se ejemplifica el proceso de producción de PHA a partir del suero residual derivado de la industria láctea, el cual puede ser del tipo dulce o ácido dependiendo del método de coagulación de la caseína, además se observa que existen procesos de fermentación directa del suero, el cual se puede realizar por microorganismos genéticamente modificados a partir de la introducción de genes con dos propósitos; para la producción de  $\beta$ -galactosidasa (lactasa), así como los destinados en la producción de PHA.

Por otro lado, se observan los pretratamientos que se pueden llevar el suero y el suero de segunda (derivado de la producción de ricotta) tales como secado por aspersion, filtración (nano o micro), esterilización, incremento de minerales y nitrógeno además de digestión química o enzimática de lactosa. Estos pretratamientos mejoran la producción de PHA a nivel industrial, por lo que se han utilizado cultivos mixtos o microbiota nativa (cepas del tipo silvestre). Por último, durante la producción de los PHA se generan corrientes de desecho que pueden utilizarse como aditivos para nuevas fermentaciones a partir de suero de segunda o *scotta*.

En el Cuadro 2 se presenta un resumen de los principales microorganismos utilizados para la producción de PHA, en donde se puede apreciar el sustrato, sistemas de cultivo microbiano, la productividad y tipo de polihidroxialcanoato generado. Es importante resaltar que la productividad radica el tipo del medio de cultivo, siendo una excelente opción la productividad por lotes en distintos sistemas como los son monocultivo y cultivos mixtos pudiéndose producir PHB en gran escala.



**Figura 3.** Proceso de producción de bioplásticos (PHA) a partir de suero residual (Amaro et al., 2019, El-Aidie & Khalifa, 2024).

**Figure 3.** Bioplastic (PHA) production process from residual whey (Amaro et al., 2019, El-Aidie & Khalifa, 2024).



### 3.2.3. Pretratamientos del suero para la obtención de bioplásticos

Una de las principales desventajas del suero es su baja concentración relación C/N, lo que dificulta la biosíntesis de los PHA, por lo que el enriquecimiento con fuentes inorgánicas de nitrógeno y otras sales tales como:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $5 \text{ g L}^{-1}$ ;  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $2.5 \text{ g L}^{-1}$ ;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $2.5 \text{ g L}^{-1}$ ;  $\text{MgSO}_4$ ,  $0.2 \text{ g L}^{-1}$ ; y  $\text{MnSO}_4$ ,  $0.01 \text{ g L}^{-1}$  al sobrenadante de suero duplicó aproximadamente la biomasa de *Pseudomonas hydrogenovora* y la producción de PHA en diez veces. *Thermus thermophilus* HB8, utilizando suero entero y sobrenadante de suero filtrado mediante membrana, demostró ser eficiente para la producción de biomasa, así como para la biosíntesis de PHA un medio mineral complejo (Pantazaki et al., 2009). Por otro lado, La ultrafiltración elimina la mayoría de las proteínas y otras partículas del suero, dejando un permeado rico en lactosa (Amaro et al., 2019). Para eliminar proteína, el suero se ultra filtra, acidifica a un pH cercano a 4, trata térmicamente, centrifuga y filtra para producir un sobrenadante. Los permeados o sobrenadantes de suero simplifican la producción, sin embargo, elevan su costo.

En conjunto, la literatura demuestra un consenso creciente respecto al potencial del suero lácteo como materia prima de bajo costo para la producción de PHA, debido a su elevada disponibilidad, contenido de lactosa y contribución a la valorización de residuos agroindustriales. Sin embargo, la conversión eficiente del suero en bioplásticos continúa enfrentando desafíos técnicos y económicos asociados a la limitada capacidad de muchos microorganismos productores de PHA para metabolizar directamente la lactosa, así como a la necesidad de pretratamientos que incrementan los costos operativos. En los últimos años, la ingeniería metabólica y el empleo de cultivos mixtos han emergido como estrategias prometedoras para superar estas limitaciones. No obstante, persisten aspectos que requieren mayor investigación, relacionados con la estandarización de los pretratamientos, la composición variable del suero entre regiones e industrias, y la evaluación tecnoeconómica de los procesos a escala industrial. Por ello, futuras investigaciones deben enfocarse en desarrollar plataformas microbianas más robustas y procesos integrados que permitan maximizar simultáneamente la productividad de PHA, la rentabilidad económica y los beneficios ambientales de la valorización del suero.



## Cuadro 2. Condiciones microbianas para la producción de PHA.

**Table 2.** Microbial conditions for PHA production.

| Sustrato                                    | Tipo de cultivo    | Microorganismo                                                                                                                                                              | Método de cultivo                                | Productividad                                              | Tipo de PHA                                                                             |
|---------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Sobrenadante de suero en polvo más aditivos | Cultivos puros     | <i>Alcaligenes latus</i>                                                                                                                                                    | Cultivo por lotes                                | 0.11 g/L/h                                                 | PHB                                                                                     |
|                                             | Cultivos diseñados | <i>Escherichia coli</i> modificada genéticamente con genes de biosíntesis de PHA de <i>Alcaligenes latus</i>                                                                | Cultivo por lotes alimentados                    | 2.57 g/L/h; 4.6 g/L/h; 1.35 g/L/h; 5.2 g/L/h; 1.408 g/L/h; | PHB                                                                                     |
|                                             |                    | <i>Escherichia coli</i> diseñada con genes de biosíntesis de PHA de <i>Cupriavidus necator</i>                                                                              | Cultivo por lotes; Cultivo por lotes alimentados | 0.90 g/L/h; 0.57 g/L/h; 0.33 g/L/h                         | PHB                                                                                     |
|                                             |                    | <i>Escherichia coli</i> modificada genéticamente con genes de biosíntesis de PHA de <i>Azotobacter</i> spp.                                                                 | Cultivo por lotes alimentados                    | 2.13 g/L/h                                                 | PHB                                                                                     |
|                                             |                    | MMC                                                                                                                                                                         | Indefinido                                       | 0.0035 g/L/h; 0.0226 g/L/h                                 | No especificado, PHB                                                                    |
|                                             |                    | Indefinido                                                                                                                                                                  | Cultivo por lotes                                | 0.005 g/L/h                                                | PHB                                                                                     |
| Permeado de suero más aditivos              | Cultivos puros     | <i>Sinorhizobium meliloti</i> <i>Bacillus megaterium</i> <i>Bacillus</i> spp. <i>Sinorhizobium</i> spp. <i>Hydrogenophaga pseudoflava</i> <i>Methylobacterium</i> spp. ZP24 | Cultivo por lotes                                | 0.0039 g/L/h; 0.05 g/L/h                                   | PHB; P-3 (HB-co-HV)                                                                     |
|                                             | Cultivos diseñados | <i>Cupriavidus necator</i> diseñado con genes de degradación de lactosa de <i>Escherichia coli</i>                                                                          | Cultivo por lotes                                | 0.02 g/L/h                                                 | PHB                                                                                     |
|                                             |                    | Indefinido                                                                                                                                                                  | Cultivo por lotes                                | 0.018 g/L/h                                                | PHB                                                                                     |
|                                             | MMC                | <i>Pseudomonas hydrogenovora</i>                                                                                                                                            | Cultivo por lotes alimentados                    | NS; 0.03 g/L/h; 0.04 g/L/h                                 | PHB; PHB; P-3 (HB-co-HV);                                                               |
|                                             |                    | <i>Haloferax mediterranei</i>                                                                                                                                               | Cultivo por lotes alimentados                    | NS; 0.14 g/L/h; 0.05 g/L/h; 0.148 g/L/h                    | P(3HB-co-3HV-co-4HB); P-(3HB-co-3HV)/P(3HB-co-3HVco-4HB); P-3(HB-co-HV); P-(3HB-co-3HV) |
| Permeado de Suero hidrolizado más aditivos  | Cultivos puros     | <i>Cupriavidus necator</i> <i>Hydrogenophaga pseudoflava</i>                                                                                                                | Cultivo por lotes alimentados                    | 0.17 g/L/h                                                 | P-3 (HB-co-HV)                                                                          |
|                                             | Cultivos diseñados | <i>Cupriavidus necator</i> modificado genéticamente con genes de degradación de lactosa de <i>Escherichia coli</i>                                                          | Cultivo por lotes                                | 0.012 g/L/h                                                | P-3 (HB-co-HV)                                                                          |
|                                             |                    | <i>Bacillus cereus</i> PS-10                                                                                                                                                | Cultivo por lotes                                | 0.7 g/L/h                                                  | PHB                                                                                     |
|                                             | Cultivos puros     | <i>Pseudomonas aeruginosa</i>                                                                                                                                               | Cultivo por lotes                                | NS                                                         | PHB                                                                                     |
| Suero más aditivos                          | Cultivos puros     | <i>Pseudomonas aeruginosa</i>                                                                                                                                               | Cultivo por lotes                                | 0.005 g/L/h                                                | Diverso                                                                                 |

|                                                        |                    |                                                                                                                |                                |                                                             |                                                                              |
|--------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Permeado de suero en polvo fermentado                  | MMC                | Indefinido                                                                                                     | Cultivo por lotes alimentados  | 0.56 g/L/h; 0.25 g/L/h;<br>0.80 C mol/C mol;<br>0.204 g/L/h | P-3 (HB-co-HV)                                                               |
| Sobrenadante de suero más aditivos                     | Cultivos puros     | <i>Bacillus megaterium</i><br><i>Thermus thermophilus</i> HB8<br><i>Methylobacterium</i> spp. ZP24             | Cultivo por lotes              | 0.06 g/L/h                                                  | PHB                                                                          |
|                                                        |                    |                                                                                                                | Cultivo por lotes              | 0.023 g/L/h                                                 | Diverso                                                                      |
|                                                        |                    |                                                                                                                | Cultivo por lotes              | 0.12 g/L/h                                                  | PHB                                                                          |
| Sobrenadante de suero fermentado                       | MMC                | Indefinido                                                                                                     | Cultivo por lotes alimentados  | 0.42 mg CODPHA<br>mg/CODSS                                  | PHB/ P-3(HB-co-HV)                                                           |
| Suero en polvo fermentado                              | MMC                | Indefinido                                                                                                     | Cultivo por lotes alimentados  | 0.68 g COD/g<br>COD; 0.6<br>C mol PHA/C mol<br>sustrato     | P-3 (HB-co-HV)                                                               |
| Permeado de suero fermentado más aditivos              | MMC                | Indefinido                                                                                                     | Cultivo por lotes alimentados  | 0.59<br>G COD PHA/g<br>COD sustrato                         | P-3 (HB-co-HV)                                                               |
| Suero hidrolizado más aditivos                         | Cultivos puros     | <i>Halomonas halophila</i>                                                                                     | Cultivo por lotes              | 0.05 g/L/h                                                  | PHB                                                                          |
| Suero/ sobrenadante de suero                           | Cultivos puros     | <i>Methylobacterium</i> spp. ZP24                                                                              | Cultivo por lotes alimentados  | 0.08 g/L/h                                                  | PHB                                                                          |
| Sobrenadante de suero hidrolizado en polvo             | Cultivos puros     | <i>Haloferax mediterranei</i>                                                                                  | Cultivo por lotes              | 0.16 g/L/h                                                  | P (3HB-co-3HV)                                                               |
| Sobrenadante de suero en polvo fermentado más aditivos | MMC                | Indefinido                                                                                                     | Cultivo por lotes              | 0.46<br>COD PHA/g COD<br>sustrato                           | P (3HB-co-3HV)                                                               |
| Suero en polvo más aditivos                            | Cultivos diseñados | <i>Escherichia coli</i> modificada genéticamente con genes de biosíntesis de PHA de <i>Cupriavidus necator</i> | Cultivo por lotes alimentados  | 1.4 g/L/h                                                   | PHB                                                                          |
| Suero de queso                                         | Cultivos puros     | <i>Rhodovulum sulfidophilum</i> DSM-1374                                                                       | Cultivo secuencial por lotes   | 1,685 g/L                                                   | Poli(3-hidroxibutirato) (51)                                                 |
| Suero agotado de queso ricotta                         | Cultivos puros     | Tratamiento con $\beta$ -galactosidasa y <i>Haloferax mediterranei</i> DSM1411                                 | Cultivo por lotes              | 1,18 g/L                                                    | Poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV) con hidroxivalerato (HV) |
| Suero de queso fermentado                              | Cultivos mixtos    | Consorcio fotosintético mixto de bacterias y algas                                                             | Cultivo secuencial discontinuo | 2.21 (0.07) C mol<br>PHB/ C mol X d                         | PHA con hidroxivalerato (HV)                                                 |
| Suero dulce en polvo                                   | Cultivos mixtos    | Cultivo microbiano mixto (principalmente <i>Thauera</i> y <i>Lamproedia</i> )                                  | Cultivo secuencial discontinuo | 0,25 g/L/h                                                  | PHA                                                                          |

MMC: Cultivo Microbiano Mixto (MMC, por sus siglas en inglés: mixed microbial culture) Adaptada de (Amaro et al., 2019; Rana et al., 2023; Zandona et al., 2021)

#### 4. CONCLUSIÓN

Para mitigar los problemas ambientales asociados con la producción y acumulación de plásticos convencionales, es indispensable el desarrollo de bioplásticos mediante procesos sostenibles y económicamente viables. Los polihidroxialcanoatos (PHAs) presentan propiedades altamente atractivas para el mercado debido ya que se pueden obtener por biosíntesis a partir de sustratos residuales de bajo costo, como el suero, por lo que representa de manera un papel potencia en las estrategias de sustitución de plásticos. No obstante, aunque la obtención eficiente de PHA a partir de suero resulta prometedora, persisten diversos desafíos técnicos que deben superarse. En este trabajo de revisión se presenta una revisión de la literatura centrada en el suero, los bioplásticos comúnmente obtenidos, así como la selección de microorganismos productores para la síntesis de PHAs. La evidencia disponible indica que los PHA pueden recuperarse del suero mediante distintos enfoques metodológicos; sin embargo, la limitada investigación orientada a su producción a escala industrial, considerando aspectos económicos y ambientales, los cuales constituyen un foco de atención. En este contexto, el presente estudio busca orientar futuros esfuerzos hacia el desarrollo de procesos comercialmente viables para la producción de PHA a partir de suero.

#### Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Tecnológico Nacional de México mediante la convocatoria Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico Innovación 2025 (22499.25-PD “Utilización sostenible del suero residual de la industria láctea: Producción de bioplásticos mediante un enfoque de economía circular”).

#### LITERATURA CITADA

- Alabi, O. A., Ologbonjaye, K. I., Awosolu, O., & Alalade, O. E. (2019). Public and environmental health effects of plastic wastes disposal: A review. *Journal of Toxicology and Risk Assessment*, 5(1), 021. <https://doi.org/10.23937/2572-4061.1510021>
- Alcántara, J. M. G., Distante, F., Storti, G., Moscatelli, D., Morbidelli, M., & Sponchioni, M. (2020). Current trends in the production of biodegradable bioplastics: The case of polyhydroxyalkanoates. *Biotechnology Advances*, 42, 107582. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107582>

- Amaro, T. M. M. M., Rosa, D., Comi, G., & Iacumin, L. (2019). Prospects for the use of whey for polyhydroxyalkanoate (PHA) production. *Frontiers in Microbiology*, 10, 992. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00992>
- Bishop, G., Styles, D., & Lens, P. N. L. (2021). Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: A review of life cycle assessment (LCA) methodological decisions. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105451. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105451>
- Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E., & Hebishy, E. (2023). Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. *International Journal of Dairy Technology*, 76(2), 291–312. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>
- Choudhary, U., Poonia, A., & Iñiguez-Moreno, M. (2023). Whey: Chemistry and its biotechnological potential. In A. Poonia & A. Trajkovska Petkoska (Eds.), *Whey valorization* (pp. 29–45). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9_2)
- Delgado-Macuil, R. J., Perez-Armendariz, B., Cardoso-Ugarte, G. A., Tolibia, S. E. M., & Benítez-Rojas, A. C. (2025). Recent biotechnological applications of whey: Review and Perspectives. *Fermentation*, 11(4), 217. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040217>
- Dietrich, K., Dumont, M.-J., Del Rio, L. F., & Orsat, V. (2017). Producing PHAs in the bioeconomy — Towards a sustainable bioplastic. *Sustainable Production and Consumption*, 9, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.09.001>
- El-Aidie, S. A. M., & Khalifa, G. S. A. (2024). Innovative applications of whey protein for sustainable dairy industry: Environmental and technological perspectives—A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(2). <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13319>
- Estikomah, S. A., Suranto, Susilowati, A., & Masykuri, M. (2023). Cheese whey wastewater: Characterization and value. *KnE Social Sciences*, 8(14), 465–474. <https://doi.org/10.18502/kss.v8i14.13858>
- Ganju, S., & Gogate, P. R. (2017). A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. *Journal of Food Engineering*, 215, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.021>
- George, N., Debroy, A., Bhat, S., Singh, S., & Bindal, S. (2021). Biowaste to bioplastics: An ecofriendly approach for a sustainable future. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 8(3), 221–233. <https://doi.org/10.30491/jabr.2021.259403.1318>

- Getino, L., Martín, J. L., & Chamizo-Ampudia, A. (2024). A review of polyhydroxyalkanoates: Characterization, production, and application from waste. *Microorganisms*, 12(10), 2028. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12102028>.
- Giubilini, A., Bondioli, F., Messori, M., Nyström, G., & Siqueira, G. (2021). Advantages of Additive Manufacturing for Biomedical Applications of Polyhydroxyalkanoates. *Bioengineering*, 8(2), 29. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8020029>
- Goel, V., Luthra, P., Kapur, G. S., & Ramakumar, S. S. V. (2021). Biodegradable/ Bioplastics: Myths and Realities. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(10), 3079–3104. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02099-1>
- Hu, X., Su, T., Li, P., & Wang, Z. (2018). Blending modification of PBS/PLA and its enzymatic degradation. *Polymer Bulletin*, 75(2), 533–546. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2054-7>
- Jayalath, S. U., & Alwis, A. P. de. (2025). PHA, the Greenest Plastic So Far: Advancing Microbial Synthesis, Recovery, and Sustainable Applications for Circularity. *ACS Omega*, 10(30), 32564–32586. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00684>
- Kalia, V. C., Patel, S. K. S., Krishnamurthi, P., Singh, R. V., & Lee, J.-K. (2025). Exploiting latent microbial potentials for producing polyhydroxyalkanoates: A holistic approach. *Environmental Research*, 269, 120895. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120895>
- Khramtsov, A. G., Blinov, A. V., Blinova, A. A., & Serov, A. V. (2017). Influence of the whey type on composition and properties of its mineralizates. *Foods and Raw Materials*, 5(1), 30–40. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-30-40>
- Kim, S., Jang, Y. J., Gong, G., Lee, S.-M., Um, Y., Kim, K. H., & Ko, J. K. (2022). Engineering *Cupriavidus necator* H16 for enhanced lithoautotrophic poly(3-hydroxybutyrate) production from CO<sub>2</sub>. *Microbial Cell Factories*, 21(1), 231. <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01962-7>
- Li, M., Chen, X., Che, X., Zhang, H., Wu, L.-P., Du, H., & Chen, G.-Q. (2019). Engineering *Pseudomonas entomophila* for synthesis of copolymers with defined fractions of 3-hydroxybutyrate and medium-chain-length 3-hydroxyalkanoates. *Metabolic Engineering*, 52, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2018.12.007>
- Mai, J., Kockler, K., Parisi, E., Chan, C. M., Pratt, S., & Laycock, B. (2024). Synthesis and physical properties of polyhydroxyalkanoate (PHA)-based block copolymers: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130204. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130204>
- Mezzina, M. P., & Pettinari, M. J. (2016). Phasins, Multifaceted Polyhydroxyalkanoate Granule-Associated Proteins. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(17), 5060–5067. <https://doi.org/10.1128/AEM.01161-16>



- Narayanan, C. M., Das, S., & Pandey, A. (2017). Food waste utilization: Green technologies for manufacture of valuable products from food wastes and agricultural wastes. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), *Handbook of Food Bioengineering: Food Bioconversion* (pp. 1–54). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811413-1.00001-2>
- Nielsen, C., Rahman, A., Rehman, A. U., Walsh, M. K., & Miller, C. D. (2017). Food waste conversion to microbial polyhydroxyalkanoates. *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1338–1352. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12776>
- Nizamuddin, S., Baloch, A. J., Chen, C., Arif, M., & Mubarak, N. M. (2024). Bio-based plastics, biodegradable plastics, and compostable plastics: biodegradation mechanism, biodegradability standards and environmental stratagem. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 195, 105887. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105887>
- Pantazaki, A. A., Papaneophytou, C. P., Pritsa, A. G., Liakopoulou-Kyriakides, M., & Kyriakidis, D. A. (2009). Production of polyhydroxyalkanoates from whey by *Thermus thermophilus* HB8. *Process Biochemistry*, 44(8), 847–853. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.04.002>
- Rajput, P., Warrish, A., & Chauhan, J. S. (2025). Bioplastics and the environment: Solution or Green Illusion? *Journal of Hazardous Materials: Plastics*, 1, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.hazmp.2025.100012>
- Rana, A., Kumar, V., Dhewa, T. & Taneja, N.K. (2023). Bioplastic production using whey (Polyhydroxyalkanoates and Polyhydroxybutyrates). In: Poonia, A., Trajkovska Petkoska, A. (Eds.) *Whey Valorization*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9_6)
- Raut, S. S., Sharma, A., & Mishra, A. (2026). A decade of bibliometric and biotechnological advances in microbial polyhydroxyalkanoate (PHA) for biomedical applications: Developments in economical production, biosynthetic pathways, physicochemical properties, and therapeutic potential: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 337, 149477. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.149477>
- Ray, S., & Kalia, V. C. (2017). Microbial Cometabolism and Polyhydroxyalkanoate Copolymers. *Indian Journal of Microbiology*, 57(1), 39–47. <https://doi.org/10.1007/s12088-016-0622-4>
- Reichert, C. L., Bugnicourt, E., Coltelli, M.-B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Canesi, I., Braca, F., Martínez, B. M., Alonso, R., Agostinis, L., Verstichel, S., Six, L., Mets, S. De, Gómez, E. C., Ißbrücker, C., Geerinck, R., Nettleton, D. F., Campos, I., Sauter, E., Schmid, M. (2020). Bio-Based Packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability. *Polymers*, 12(7), 1558. <https://doi.org/10.3390/polym12071558>

- Ryan, M. P., & Walsh, G. (2016). The biotechnological potential of whey. *Reviews in environmental science and bio/technology*, 15(3), 479–498. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9402-1>
- Sabapathy, P. C., Devaraj, S., Meixner, K., Anburajan, P., Kathirvel, P., Ravikumar, Y., Zayed, H. M., & Qi, X. (2020). Recent developments in Polyhydroxyalkanoates (PHAs) production – A review. *Bioresource Technology*, 306, 123132. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123132>
- Saravanan, K., Umesh, M., & Kathirvel, P. (2022). Microbial Polyhydroxyalkanoates (PHAs): A Review on Biosynthesis, Properties, Fermentation Strategies and Its Prospective Applications for Sustainable Future. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(12), 4903–4935. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02562-7>
- Sharma, P. K., Fu, J., Spicer, V., Krokhin, O. V., Cicek, N., Sparling, R., & Levin, D. B. (2016). Global changes in the proteome of *Cupriavidus necator* H16 during poly-(3-hydroxybutyrate) synthesis from various biodiesel by-product substrates. *AMB Express*, 6(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0206-z>
- Siegu, W. M., Drożdżyński, P., Kumaravel, V., & Marchut-Mikołajczyk, O. (2026). Advances in microbial strain selection and carbon source valorization for Polyhydroxyalkanoates (PHA) production. *New Biotechnology*, 93, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2026.01.016>
- Sindhu, S., Sheokand, A., Devi, R., Bulla, M., Mishra, A. K., & Kumar, V. (2024). Sustainable bioplastics based on food waste. In *Bioplastics for Sustainability* (pp. 3–20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95199-9.00012-3>
- Spierling, S., Knüpffer, E., Behnsen, H., Mudersbach, M., Krieg, H., Springer, S., Albrecht, S., Herrmann, C., & Endres, H. J. (2018). Bio-based plastics - A review of environmental, social and economic impact assessments. *Journal of Cleaner Production*, 185, 476–491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.014>
- Stanley, J., Culliton, D., Jovani-Sancho, A.-J., & Neves, A. C. (2025). The journey of plastics: historical development, environmental challenges, and the emergence of bioplastics for single-use products. *Eng*, 6(1), 17. <https://doi.org/10.3390/eng6010017>
- Surendran, A., Lakshmanan, M., Chee, J. Y., Sulaiman, A. M., Thuoc, D. Van, & Sudesh, K. (2020). Can Polyhydroxyalkanoates be produced efficiently from waste plant and animal oils? *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 169. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00169>
- Thamarai, P., Vickram, A. S., Saravanan, A., Deivayanai, V. C., & Evangeline, S. (2024). Recent advancements in biosynthesis, industrial production, and environmental

applications of polyhydroxyalkanoates (PHAs): A review. *Bioresource Technology Reports*, 27, 101957. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101957>

Wang, H., Ye, J.-W., Chen, X., Yuan, Y., Shi, J., Liu, X., Yang, F., Ma, Y., Chen, J., Wu, F., Lan, Y., Wu, Q., Tong, Y., & Chen, G.-Q. (2023). Production of PHA copolymers consisting of 3-hydroxybutyrate and 3-hydroxyhexanoate (PHBHHx) by recombinant *Halomonas bluephagenesis*. *Chemical Engineering Journal*, 466, 143261. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143261>

Weerasingha, V., Kelly, A. L., Sheehan, J. J., & Alehosseini, A. (2025). Sustainable utilisation of salty whey generated during cheese manufacture: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 78(2). E70033. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70033>

Yao, J., Xiao, X.-Y., Wang, M., Zhang, Q., Chen, Y., Gou, M., Xia, Z.-Y., & Tang, Y.-Q. (2025). A review of low-cost production of polyhydroxyalkanoates: Strategies, challenges, and perspectives. *Bioresource Technology*, 433, 132745. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132745>

Youssef, A. M., & El-Sayed, Samah. M. (2018). Bionanocomposites materials for food packaging applications: Concepts and future outlook. *Carbohydrate Polymers*, 193 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.088>

Zandona, E., Blažić, M., & Režek Jambrak, A. (2021). Whey utilisation: sustainable uses and environmental approach. *Food Technology and Biotechnology*, 59(2), 147–161. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.02.21.6968>

