

**ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES OPCIONES PARA LA ELABORACIÓN DE UN  
BIOPOLÍMERO UTILIZANDO LACTOSUERO COMO MATERIA PRIMA**

**BRIGITTE LORENA PULIDO URREGO**

**JUAN DAVID FIERRO PULIDO**

**Proyecto de grado para optar al título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Directora**

**Astrid Nausa Galeano**

**M. Eng**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ**

**2022**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

Astrid Nausa Galeano

Directora

---

MSc. Diana Milena Morales Fonseca

Jurado 1

---

MSc. cPhD. David Leonardo Sotelo Tobón

Jurado 2

Bogotá D.C. febrero del 2022

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA – PEÑA**

Consejero Estudiantil

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA – PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretario General

**Dr. JOSÉ LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ**

Decana de la Facultad de Ingenierías

**Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO**

Directora del Programa de Ingeniería Química

**Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
<b>1. GENERALIDADES DEL LACTOSUERO</b>	<b>16</b>
1.1 Composición del lactosuero	17
1.2 Tipos de lactosuero	18
1.2.1 <i>Lactosuero dulce</i>	18
1.2.2 <i>Lactosuero ácido</i>	19
1.3 Situación actual del lactosuero	20
1.4 Aplicaciones del lactosuero	22
<b>2. REVISIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL LACTOSUERO</b>	<b>24</b>
2.1 Metodología	24
2.1 Índice de acidez pH	30
2.2 Sólidos totales	32
2.3 Porcentaje de cenizas	32
2.4 Contenido de grasas	33
2.5 Densidad	35
2.6 Demanda química y biológica de oxígeno	35
2.7 Proteínas totales	36
2.7.1 <i>Lactoglobulinas</i>	37
2.7.2 <i>Lactoalbúminas</i>	37
2.8 Minerales	38
2.9 Propiedades microbiológicas	39
2.10 Elaboración de resumen de resultados	41
<b>3 BIOPOLÍMEROS</b>	<b>43</b>
3.7 Tipos de biopolímeros	43
3.8 Polímeros basados en recursos renovables con modificación parcial	44

<b>3.9 Biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de monómeros de base biológica</b>	<b>45</b>
<b>3.10 Biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de microorganismos</b>	<b>47</b>
<b>3.11 Avances tecnológicos para la producción de biopolímeros</b>	<b>49</b>
<b>3.12 Comparación PHA y PLA</b>	<b>50</b>
<b>4 BIOPOLÍMEROS OBTENIDOS A PARTIR DE LACTOSUERO</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Metodología búsqueda de la información</b>	<b>52</b>
<b>4.2 Poliésteres alifáticos</b>	<b>52</b>
<b>4.3 PHA</b>	<b>57</b>
<b>4.4 Aplicaciones de PHA</b>	<b>64</b>
<b>4.5 Biopelículas</b>	<b>65</b>
<b>4.6 Microorganismos que producen biopolímeros a partir de lactosuero como sustrato</b>	<b>66</b>
4.6.1 <i>Haloferax mediterrani</i>	68
4.6.2 <i>Pseudomonas putida</i>	70
4.6.3 <i>Bacillus megaterium</i>	71
<b>4.7 Elaboración de la matriz de decisión</b>	<b>73</b>
<b>4.8 Condiciones de operación del microorganismo</b>	<b>74</b>
4.8.1 <i>Sustrato en la producción de PHB</i>	74
4.8.2 <i>Disolución del sustrato</i>	77
4.8.3 <i>Tiempo</i>	78
4.8.4 <i>pH</i>	78
4.8.5 <i>Tamaño de inóculo</i>	79
4.8.6 <i>Relación C/N</i>	79
4.8.7 <i>Cinética de crecimiento celular</i>	79
<b>5 DISEÑO CONCEPTUAL BÁSICO</b>	<b>83</b>
<b>5.1 Descripción del proceso de producción</b>	<b>83</b>
5.1.1 <i>Tratamiento de sustrato</i>	84
5.1.2 <i>Tratamiento medio de cultivo</i>	85
5.1.3 <i>Tren de inóculo</i>	86
5.1.4 <i>Fermentación</i>	88

5.1.5	<i>Extracción de PHB</i>	93
<b>5.2</b>	<b>Diagrama de bloques del proceso</b>	<b>94</b>
<b>5.3</b>	<b>Balances de masa</b>	<b>94</b>
5.3.1	<i>Centrifuga</i>	94
5.3.2	<i>Ultrafiltración</i>	95
5.3.3	<i>Mezcladores</i>	96
5.3.4	<i>Biorreactores</i>	98
5.3.5	<i>Balance fermentador</i>	106
5.3.6	<i>Balance sedimentador</i>	107
<b>6</b>	<b>COSTOS DEL DISEÑO CONCEPTUAL BÁSICO</b>	<b>108</b>
<b>6.1</b>	<b>Costos equipos requeridos</b>	<b>108</b>
<b>6.2</b>	<b>Costos de operación</b>	<b>109</b>
<b>6.3</b>	<b>Costos de materia prima</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>111</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>124</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Composición del lactosuero	17
<b>Figura 2.</b> Composición del lactosuero (sin agua)	18
<b>Figura 3.</b> Tipos de lactosuero	20
<b>Figura 4.</b> Algunas aplicaciones del lactosuero	23
<b>Figura 5.</b> Producción de biopolímeros según su mecanismo de obtención	44
<b>Figura 6.</b> Estructura y conformación de los PHA	57
<b>Figura 7.</b> Ruta de biosíntesis de PHA	58
<b>Figura 8.</b> Ruta de biosíntesis de PHA a partir de lactosuero	60
<b>Figura 9.</b> Posibles vías para la producción de PHA a partir de lactosuero	63
<b>Figura 10.</b> Clasificación de microorganismos productores a escala industrial	67
<b>Figura 11.</b> Análisis de factores en la producción de PHB	75
<b>Figura 12.</b> Análisis de factores en la producción de PHB (continuación)	76
<b>Figura 13.</b> Cinética de crecimiento <i>Bacillus megaterium</i> proceso optimizado	81
<b>Figura 14.</b> Características de crecimiento de <i>Bacillus</i> en lactosuero	82
<b>Figura 15.</b> Dimensión biorreactores batch del tren de inóculo	87
<b>Figura 16.</b> Diagrama general del proceso	94
<b>Figura 17.</b> Balance de masa del pretratamiento del lactosuero	95
<b>Figura 18.</b> Balance de masa del tratamiento del lactosuero	96
<b>Figura 19.</b> Balance de masa solución de oligoelementos	97
<b>Figura 20.</b> Balance de masa caldo de cultivo	98
<b>Figura 21.</b> Representación balance de masa general	99
<b>Figura 22.</b> Concentración de biomasa seca respecto al tiempo	101
<b>Figura 23.</b> Balance de masa biorreactor 1	102
<b>Figura 24.</b> Balance de masa biorreactor 2	103
<b>Figura 25.</b> Balance de masa biorreactor 3	104
<b>Figura 26.</b> Balance de masa biorreactor 4	105
<b>Figura 27.</b> Centrífuga 2	106
<b>Figura 28.</b> Balance de masa bioreactor 5	106
<b>Figura 29.</b> Balance de masa sedimentador-mezclador	107



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Producción de leche por departamentos 2019	21
<b>Tabla 2.</b> Artículos base para la construcción y determinación de resultados	25
<b>Tabla 3.</b> Composición del lactosuero dulce y ácido	28
<b>Tabla 4.</b> Información porcentual de lactosuero dulce y ácido	29
<b>Tabla 5.</b> Análisis microbiológico del lactosuero de queso paipa	39
<b>Tabla 6.</b> Resumen de resultados	41
<b>Tabla 7.</b> Aplicaciones de ácido poliláctico	47
<b>Tabla 8.</b> Algunas propiedades mecánicas de los polímeros y biopolímeros	49
<b>Tabla 9.</b> Comparación de algunas características principales de los polímeros	50
<b>Tabla 10.</b> Artículos base para la construcción y determinación de biopolímero	54
<b>Tabla 11.</b> Matriz de decisión	62
<b>Tabla 12.</b> Caracterización <i>Haloferax mediterrani</i>	69
<b>Tabla 13.</b> Caracterización <i>Pseudomonas putida</i>	71
<b>Tabla 14.</b> Características morfológicas y bioquímicas del <i>Bacillus megaterium</i>	72
<b>Tabla 15.</b> Matriz de decisión microorganismo productor de PHB	73
<b>Tabla 16.</b> Porcentaje de utilización de lactosa a diferentes diluciones	77
<b>Tabla 17.</b> Cantidad de sales requeridas	85
<b>Tabla 18.</b> Cantidad de oligoelementos requeridos	86
<b>Tabla 19.</b> Constante de Henry a diferentes temperaturas para gases diatómicos	89
<b>Tabla 20.</b> Solubilidad del oxígeno en agua	90
<b>Tabla 21.</b> Moles máximas de O <sub>2</sub> solubilizadas en cada biorreactor	91
<b>Tabla 22.</b> Cantidad de aire requerida para cada biorreactor	91
<b>Tabla 23.</b> Cantidad de CO <sub>2</sub> en kg por cada mol de O <sub>2</sub> consumido	92
<b>Tabla 24.</b> Tabla de composiciones de caldo de cultivo	102
<b>Tabla 25.</b> Precio equipos requeridos en el proceso	108
<b>Tabla 26.</b> Costos de energía	109
<b>Tabla 27.</b> Costos materia prima	110

## LISTA DE ABREVIATURAS

BALs	Bacterias ácido lácticas
BPH	Buenas prácticas de higienes
BPM	Buenas prácticas de manufactura
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
MMC	Cultivos microbianos mixtos
P (3HB)	Ácido poli-3-hidroxi-butírico
PC	Policarbonato
PCL	Policaprolactonas
PET	Tereftalato de polietileno
PGA	Ácido glicólico
PHA	Polihidroxi-alcanoatos
PHB	Polihidroxi-butirato
PS	Poliestireno
UFC	Unidades formados de colonias

## RESUMEN

Este documento tiene como objetivo principal, analizar las diferentes opciones para la elaboración de un biopolímero utilizando lactosuero como sustrato, con el fin de disminuir el impacto ambiental que este genera al ser vertido en el medio ambiente y adicionalmente generar una alternativa a los plásticos comunes de origen fósil.

Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica de las diferentes propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del lactosuero, identificando que muchas de estas propiedades pueden variar según el proceso de elaboración del queso, su procedencia, alimentación del ganado, entre otros factores.

Posteriormente, se realizó una investigación detallada acerca de los biopolímeros que se pueden obtener a partir de lactosuero, siendo específicamente los biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de microorganismos (PHA, PCL, PLA), enfocando el trabajo hacia la producción de PHA. Conociendo el tipo de biopolímero a producir, se realizó una investigación acerca de los microorganismos que producen PHB a partir de lactosuero, eligiendo como microorganismo *Bacillus Megaterium*.

Finalmente, se realizó el diseño conceptual básico del proceso de producción de PHB con su respectivo balance de masa por operación y se realizó un análisis de costos teniendo en cuenta los costos de equipos, costos de materia prima y costos energéticos.

**PALABRAS CLAVE:** Lactosuero, *Bacillus megaterium*, Biopolímero, Diseño conceptual.

## INTRODUCCIÓN

El lactosuero es un subproducto líquido obtenido después de la precipitación de la caseína durante la elaboración del queso, conteniendo principalmente lactosa, proteínas, minerales, vitaminas y grasas [1]. En la producción de quesos, se destinan aproximadamente 1.278 millones de toneladas de leche al año, generando entre 1.086 y 1.150 millones de toneladas de lactosuero por año, donde alrededor de 488 y 518 millones de toneladas de este lactosuero son desechados al año [1], este es comúnmente utilizado para alimentación animal, o bien, desechado como efluente líquido, provocando un incremento de los niveles de contaminación ambiental [2].

El lactosuero es una excelente fuente de nutrientes, pero una vez vertido es un producto fuertemente contaminante del medio ambiente [3], por su cantidad de proteínas y azúcares el lactosuero eleva el DQO (demanda química de oxígeno) y DBO (demanda bioquímica de oxígeno), impactando significativamente los ecosistemas. Adicionalmente, hay empresas colombianas que usan el lactosuero de manera irregular para rendir productos lácteos, afectando a los consumidores finales debido a que altera el valor nutricional de dichos productos, cuya práctica está prohibida en todas las etapas de la cadena productiva [4].

A partir del lactosuero se pueden obtener diferentes productos en la industria como lo son levaduras, bebidas energizantes, bebidas fermentadas, biomasa, concentrados, conservantes, fertilizantes, aislados e hidrolizados de proteína, fórmulas infantiles, etanol, quesillo, entre otros [5]. Existen productos más novedosos con un enfoque sostenible, uno de ellos son los biopolímeros, que gracias al gran volumen y bajo costo del lactosuero, este residuo se puede utilizar como materia prima para la elaboración de biopolímeros.

Los biopolímeros son compuestos fabricados a partir de monómeros biológicos. Estos incluyen moléculas de masa molecular muy alta (> 10.000 kD) como proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos y otros macro polímeros de hidrocarburos. Tradicionalmente los biopolímeros son extraídos de plantas y animales, sin embargo, durante las últimas

décadas, los biotecnólogos han estado subyugando microorganismos para producir numerosos polímeros de importancia comercial [2].

Existe un gran interés de producir biopolímeros a partir de lactosuero en los últimos años, por ende, se buscan alternativas viables para la producción de estos con el fin de dar un uso a un residuo agroindustrial presentes en todas las industrias de lácteos en Colombia, y poder presentar la más adecuada para el desarrollo de un biopolímero para la industria.

El lactosuero al ser un abundante residuo en toda industria láctea, puede ser aprovechado como materia prima en la producción de biopolímeros, usándolo como sustrato, evitando así desecharlo afectando el medio ambiente, lo que justifica este proyecto a nivel ambiental debido a su carga orgánica relativamente alta, ya que este se compone principalmente de lactosa, grasas, proteínas y sales minerales.

De estos componentes, la lactosa es responsable de la mayor parte de demanda bioquímica de oxígeno del suero y este al no ser tratado correctamente, disminuye de manera drástica la concentración de oxígeno en los efluentes donde es vertido [9]. Adicionalmente, puede ser considerado como una alternativa respetuosa con el medio ambiente a los plásticos de origen fósil que aún son dominantes.

Los biopolímeros tienen un gran potencial biotecnológico, se utilizan ampliamente en una variedad de industrias y campos. Sin embargo, su aumento en la producción y su uso más amplio se ve obstaculizado por el alto costo de las materias primas y, por lo tanto, requiere un enfoque en insumos más baratos, incluidos los subproductos lácteos y los desechos como el lactosuero (CW), lo que da lugar al uso de lactosuero como materia prima de bajo costo, lo que justifica el impacto económico en los procesos de producción de biopolímeros a partir de microorganismos [6].

A partir del lactosuero se pueden obtener diferentes productos en la industria, uno de ellos son los biopolímeros, de manera específica los PHA; un foco de investigación que, si bien lleva años en desarrollo, no se ha escalado a nivel industrial debido a los

altos costos de producción, por ende, el uso de lactosuero como sustrato, es una opción a estudiar para la producción de biopolímeros. En el desarrollo del presente trabajo, se analizaron diferentes microorganismos que puedan ser opción para la producción de PHA, a partir de lactosuero previamente caracterizado en base a la literatura; específicamente enfocada en artículos, revistas y tesis de Colombia.

Posteriormente, se analizan los diferentes tipos de microorganismos productores de PHA a partir de lactosuero, seleccionando la mejor alternativa en base a la disponibilidad, aplicación en la industria, rendimiento y economía en el proceso. Por último, se establece el diseño conceptual básico, en base a conocimientos de ingeniería y datos experimentales en artículos de referencia; finalizando con la cotización de equipos necesarios estimados y los gastos relacionados al proceso.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Analizar las diferentes opciones para la elaboración de un biopolímero utilizando lactosuero como materia prima.

### **Objetivos específicos**

- Determinar conceptualmente las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del lactosuero.
- Identificar la mejor alternativa para la producción de biopolímeros utilizando como materia prima lactosuero.
- Plantear un diseño conceptual básico para la producción de un biopolímero utilizando como materia prima lactosuero en base a la mejor alternativa.
- Realizar el análisis de costos asociados al diseño conceptual básico.

## 1. GENERALIDADES DEL LACTOSUERO

El lactosuero se define como una sustancia líquida obtenida de la separación del coágulo de la leche en la elaboración de queso [3]. Por lo general, es de color verde traslucido; aunque sus características fisicoquímicas y organolépticas varían según la procedencia del lactosuero, ya que el color depende de la calidad y el tipo de leche empleada en la elaboración de quesos [4].

Este subproducto de la industria láctea, representa cerca del 85 a 90% del volumen de la leche procesada en la elaboración de queso y contiene al rededor del 50 a 55% del total de los nutrientes que contiene la leche, entre los que se encuentra la lactosa, grasas, proteínas solubles, lípidos y sales minerales [4], [5].

El lactosuero se ha considerado como un desecho y cerca del 50% es vertido en efluentes y suelos, generando graves problemas ambientales, como la contaminación de suelos, cuerpos de agua y mantos freáticos [6]. Este subproducto es altamente contaminante por el elevado contenido de materia orgánica que posee, el principal componente responsable es la lactosa, debido a su capacidad para actuar como sustrato de fermentación microbiana [7].

Sin embargo, gracias al alto contenido nutricional que brinda el lactosuero en los últimos años se han venido desarrollando tecnologías para su aprovechamiento, transformándolo en un componente de bajo costo con un gran potencial en la industria.

Una gran parte del lactosuero es transformado en diferentes productos alimenticios, ya sea mediante su uso directo en forma líquida o en polvo, concentrado de proteína, lactosa y derivados. En las que sobresalen los concentrados de proteína, debido a sus excelentes propiedades funcionales, nutricionales y biológicas, características altamente demandadas en las áreas de nutrición, salud y formulación de alimentos [6].

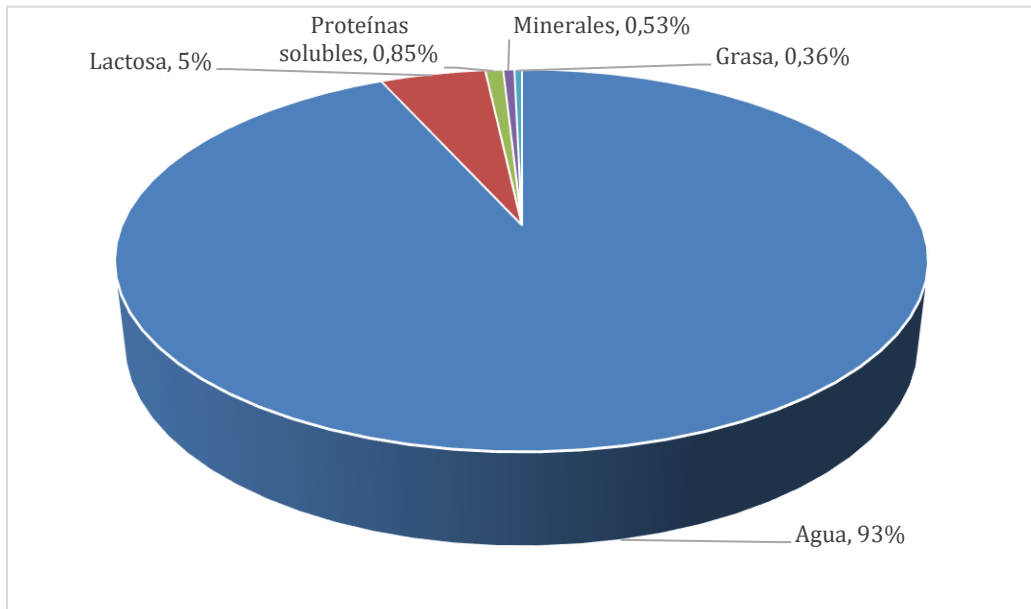


## 1.1 Composición del lactosuero

El lactosuero se compone principalmente de agua (93,3%), lactosa (5%), proteínas solubles (0,85%), minerales (0,53%) y en menor proporción grasas (0,36%) [4], [8], [9].

**Figura 1.**

*Composición del lactosuero*

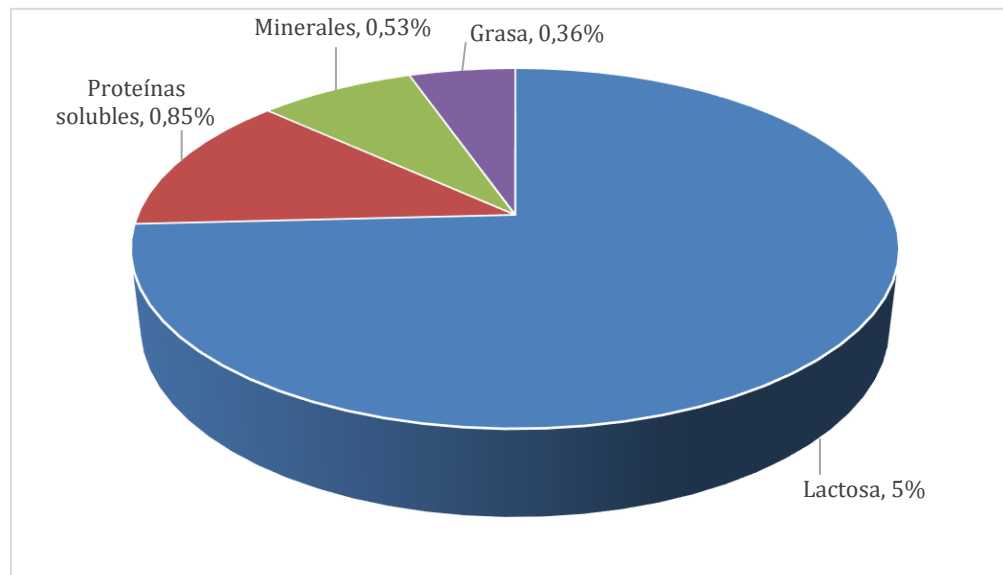


**Nota.** El gráfico muestra la composición mayoritaria en el lactosuero. Tomado de: N. Monroy, *Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración*. Bogotá D.C, Colombia: Univ. de La Salle, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_alimentos/721](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/721). [Accedido: 27-nov-2021]

La composición de lactosuero varía según: el tipo de queso de procedencia, el tipo de lactosuero, la región, entre otros factores asociados a la actividad agrícola. No obstante, las grasas y los minerales son los que más fluctúan en porcentaje, dado que son variables sensibles ante los factores mencionados. Sin embargo, características y propiedades del lactosuero como porcentaje de cenizas, lactosa y densidad, son constantes y poco sensibles a dichos factores.

**Figura 2.**

*Composición del lactosuero (sin agua)*



**Nota.** El gráfico muestra la composición mayoritaria en el lactosuero. Tomado de: N. Monroy, *Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración*. Bogotá D.C, Colombia: Univ. de La Salle, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_alimentos/721](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/721). [Accedido: 27-nov-2021]

## 1.2 Tipos de lactosuero

Existen dos grandes tipos de lactosuero; dulce o ácido, dependiendo principalmente de la eliminación de la caseína o el proceso que se haya llevado para la elaboración del queso. A continuación, se describen los diferentes tipos de lactosuero.

### 1.2.1 Lactosuero dulce

El lactosuero dulce es la fase acuosa que se separa de la cuajada en la elaboración de queso, mediante la coagulación enzimática de las caseínas al pH fisiológico de la leche (6,5 a 6,8), utilizando cuajo comercial estandarizado (quimosina u otra proteasa con actividad similar) [10] y se obtiene en la elaboración tradicional de queso fresco, panela, Chihuahua, Cheddar, Manchego, entre otros [11].

Este lactosuero presenta un alto contenido de lactosa (46 g/L a 65 g/L) y proteína (6 g/L a 12 g/L), con bajo contenido de grasa (3 g/L a 5 g/L) y acidez (máximo 2 g/L de ácido láctico) [12].

### **1.2.2 Lactosuero ácido**

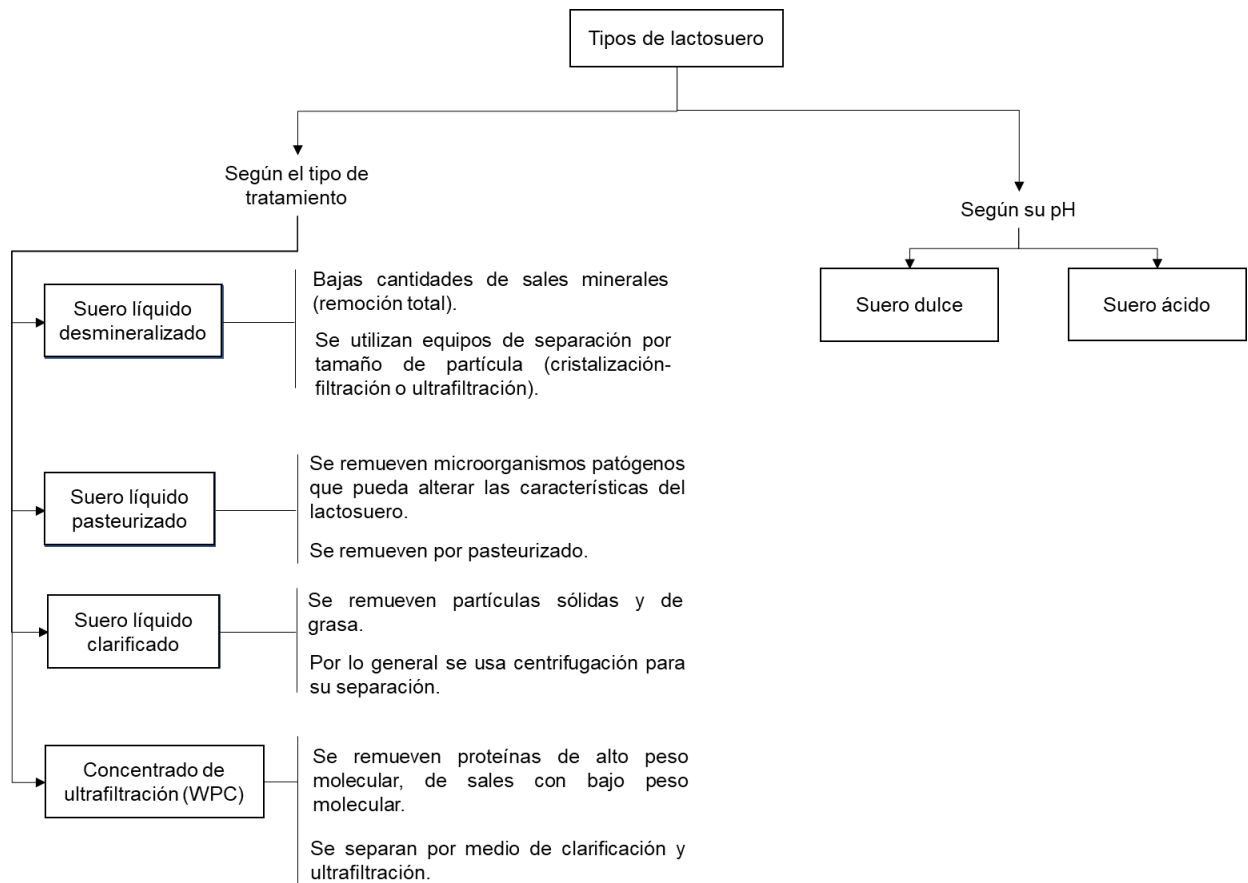
El lactosuero ácido se produce por acidificación de ácidos grasos (ácido cítrico) o fermentación de la lactosa con bacterias ácido lácticas (BALs) propias de la leche disminuyendo el valor del pH hasta 5,1, en la elaboración de quesos frescos como el Oaxaca, Cotija y cocido, para estos últimos se utiliza una coagulación mixta en su elaboración (disminución del pH de la leche y adición de cuajo). La composición fisicoquímica del suero ácido es muy parecida al suero dulce, 6 g/L a 8 g/L de proteína, 3 g/L a 4 g/L de grasa, 38 g/L a 45 g/L de lactosa [12]. Sin embargo, el suero ácido posee un mayor contenido de ácido láctico y menor pH.

Ambos sueros presentan diferencias en su composición en general, el dulce tiene un pH más elevado, mayor contenido de proteínas, lactosa, lípidos y menor cantidad de calcio y fósforo. R. Riofrío [10] menciona que, de los dos tipos de lactosuero, el dulce posee mejores aptitudes para el procesamiento y obtención de subproductos de mayor valor agregado.

Otra forma de clasificación de lactosuero es según su tratamiento; donde se busca remover algún compuesto del lactosuero sin tatar para una mayor disposición, concentración o características, y depende del enfoque y materia que se quiera obtener (ver **Figura 3**).

**Figura 3.**

*Tipos de lactosuero*



**Nota.** El tratamiento puede ser uno o una combinación de todos, depende de la disposición que se requiera. Tomado de: M. C. Álvarez, *Caracterización fisicoquímica de los diferentes tipos lactosueros producidos en la Cooperativa Colanta LTDA*. Caldas, Antioquía, Colombia. Corp. Univ. Lasallista, 2013. [En línea]. Disponible en: [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1036/1/Caracterizacion\\_fisicoquimica\\_diferentes\\_tipos\\_lactosueros\\_producidos\\_Colanta.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1036/1/Caracterizacion_fisicoquimica_diferentes_tipos_lactosueros_producidos_Colanta.pdf) [Accedido: 27-nov-2021]

### 1.3 Situación actual del lactosuero

La industria láctea en Colombia, proporciona la materia prima para la elaboración de quesos. De acuerdo al DANE en el año 2019 se produjo un total de 6829 millones L/año de leche [13], esta producción de leche se lleva a cabo en por lo menos 1104 municipios colombianos de los 1122 existentes [5]. En la **Tabla 1** se muestra la

producción diaria de leche de los principales departamentos productores del país, junto con su respectivo porcentaje de participación para el año 2019.

**Tabla 1.**

*Producción de leche por departamentos 2019*

<b>Departamento</b>	<b>Litros diarios</b>	<b>%</b>
Antioquia	3.551.183	19%
Cundinamarca	2.797.779	15%
Caquetá	1.552.958	9,0%
Córdoba	1.274.837	6,8%
Boyacá	1.121.188	6,0%
Magdalena	878.912	4,7%
Cesar	857.250	4,6%
Nariño	766.140	4,1%
Meta	755.345	4,0%
Santander	604.775	3,2%
Otros	4.549.968	23,6%
<b>TOTAL NACIONAL</b>	<b>18.710.335</b>	<b>100%</b>

**Nota.** La tabla muestra los principales departamentos productores de leche en el país, con su respectivo volumen diario y el porcentaje de participación. Tomado de: Minagricultura, “Sector lácteo”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/SICLA/Documentos/2020-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]

La industria láctea posee en la actualidad una gran importancia en los países en desarrollo, en el caso de Colombia la producción de lácteos ha generado la creación de diversas empresas dedicadas a la producción y comercialización de productos tales como yogurt, quesos de diversos tipos, mantequilla, entre otros. Lo que ha generado diferentes tipos de residuos o subproductos que no poseen una finalidad industrial, tal es el caso del lactosuero [9].

Como ya se ha mencionado la fabricación de queso da lugar a la producción de lactosuero como subproducto, y aunque la mayor parte del lactosuero es agua, este

posee componentes orgánicos importantes que deben ser eliminados para evitar contaminación (carbohidratos, grasas, proteínas).

El no aprovechamiento de este subproducto causa contaminación ambiental que afecta física y químicamente la estructura del suelo, según R. Parra [14], lo anterior resulta en una disminución del rendimiento de cultivos agrícolas, reduciendo la vida acuática al agotar el oxígeno disuelto. Lo que motiva a la industria láctea en búsqueda de nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento de este subproducto y reducir una de las mayores fuentes de contaminación de la industria alimentaria colombiana.

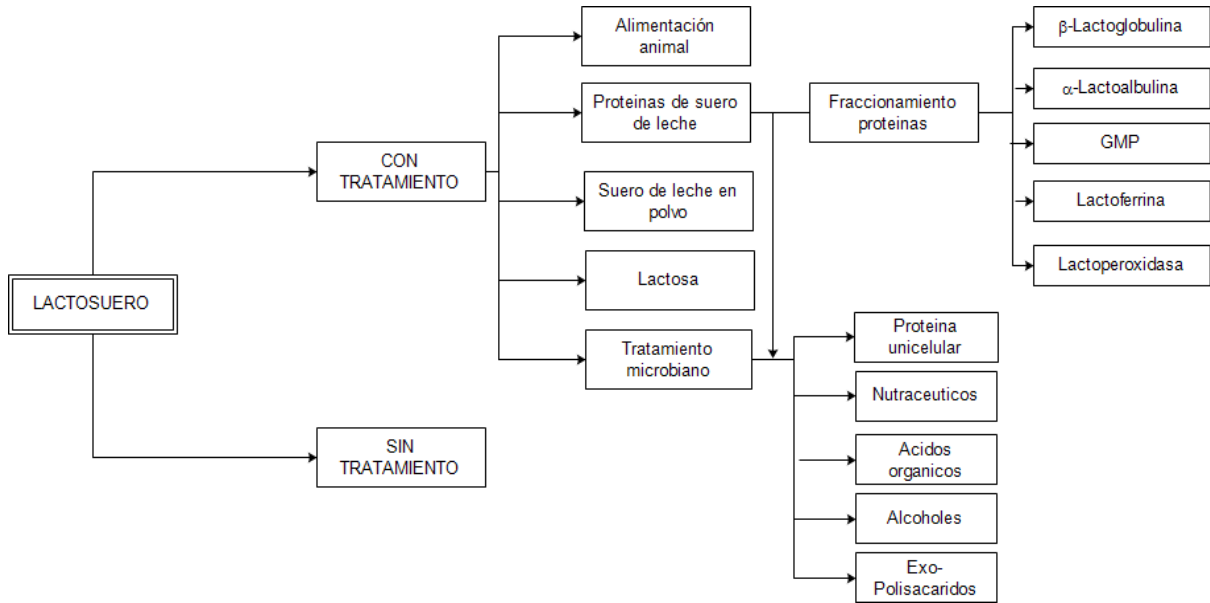
Por otro lado, en Colombia el lactosuero posee una alta demanda, dado que es empleado tanto en preparaciones alimenticias como no alimenticias. Según la resolución 2310 de 1986 del ministerio de salud [15], por la que se regula el uso de lactosuero como materia prima, permitiendo adicionarlo en productos como la mantequilla de suero, algunos tipos de queso, arequipe, postres, helados, entre otros.

#### **1.4 Aplicaciones del lactosuero**

El lactosuero tiene diversas aplicaciones en la industria alimenticia, agropecuaria, farmacéutica, debido a su calidad nutricional, alto contenido de proteína y minerales. Los usos más comunes del lactosuero son como concentrados naturales, azucarados, sueros en polvo, extracción de proteínas, obtención de ácido láctico, panadería, pastelería, manteca de suero, alimentos infantiles, jarabe de lactosa hidrolizada, píldoras farmacéuticas, acidificante para alimentos, alimento para ganado, entre otros (ver **Figura 4**).

**Figura 4.**

*Algunas aplicaciones del lactosuero*



**Nota.** La figura muestra los diferentes usos del lactosuero. Tomado de: J. M. Pais *et al*, “Valorización del suero de leche: Una visión desde la tecnología”. *Bionatura*, vol. 2., no.4, pp.468-476, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistabionatura.com/files/2017.02.04.11.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]

## 2. REVISIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL LACTOSUERO

En el siguiente apartado se muestran las diferentes propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del lactosuero tales como, pH, sólidos totales, porcentaje de cenizas, grasas, densidad, entre otras y se realiza la comparación dependiendo del tipo de lactosuero. Los datos mostrados a continuación, son tomados de fuentes bibliográficas que se basan en la experimentación o en datos de terceros.

### 2.1 Metodología

Para el desarrollo de este apartado primero se realizó una búsqueda e identificación de diferentes documentos mediante las siguientes palabras: propiedades fisicoquímicas del lactosuero, Cheese Whey, suero de leche; utilizando bases de datos tales como, Scopus, ScienceDirect y SpringerLink, teniendo en cuenta el título del artículo, resumen, palabras clave, país y año de publicación. Excluyendo aquellas publicaciones en las que su año de publicación fuese menor al año 2009, aquellas que no se desarrollaron en américa y las que no se relacionaban con los tópicos de interés. Obteniendo así un total de 19 documentos.

Posteriormente, con los documentos extraídos se organizó en Microsoft Excel una tabla (ver **Tabla 2**) que incluyó los siguientes datos: nombre de los autores firmantes, título de la publicación, tipo de publicación, año de la publicación, revista de publicación, país, Universidad/ instituto, Región/departamento y las propiedades fisicoquímicas del lactosuero: pH, sólidos totales, porcentaje de cenizas, contenido de grasas, densidad, proteínas totales, minerales, DQO, DBO y lactosa.

Esta información permitió en un primer momento identificar los países, revistas y autores que más han publicado acerca del tema. En un segundo momento, se pudo identificar y analizar cada una de las propiedades fisicoquímicas del lactosuero y finalmente realizar una comparación detallada de los datos brindados por los diferentes autores.



**Tabla 2.***Artículos base para la construcción y determinación de resultados*

<b>Autores firmantes</b>	<b>Título de publicación</b>	<b>Tipo de publicación</b>	<b>Año de publicación</b>	<b>Revista de publicación</b>	<b>País</b>	<b>Universidad/Instituto</b>	<b>Región/Dpto</b>
W. J. Guerrero Rodríguez, C. A. Gomez Aldapa, J. Castro Rosa, C. A. González Ramírez, y E. M. Santos López	Caracterización fisicoquímica del lactosuero en el valle de Tulancingo	Artículo	2010	XII CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS	México	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH)	Hidalgo
R. E. López Barreto, M. L. Becerra Jiménez, y L. M. Borrás Sandoval	Caracterización fisicoquímica y microbiológica del lactosuero del queso paipa	Artículo	2018	Ciencia y Agricultura, vol. 15, no. 2, pp. 99-106	Colombia	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)	Boyacá
J. Callejas Hernández, F. Prieto García, V. E. Reyes Cruz, Y. Marmolejo Santillán, y M. A. Méndez Marzo	Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo	Artículo (Acta universitaria)	2012		México	Universidad de Guanajuato	Guanajuato
N. Monroy Pedraza	Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración	Tesis	2020		Colombia	Universidad de La Salle	Bogotá D.C
A. C. Osorio Cisneros y L. A. Martínez Castro	Desarrollo de una propuesta de aprovechamiento de los residuos grasos lácteos provenientes de la empresa Levelma S.A.S	Tesis	2017		Colombia	Fundación Universidad de América (FUA)	Bogotá D.C
M. A. Forero Figueredo y L. C. Ordoñez Gómez	Propuesta para la elaboración de una bebida láctea energizante a partir del lactosuero en la empresa casalac	Tesis	2017		Colombia	Fundación Universidad de América (FUA)	Bogotá D.C
M. C. Álvarez Mira	Caracterización fisicoquímica de los diferentes tipos lactosueros producidos en la Cooperativa Colanta LTDA	Tesis	2013		Colombia	Corporación Universitaria Lasallista	Antioquia

**Tabla 2.** Continuación

<b>Autores firmantes</b>	<b>Título de publicación</b>	<b>Tipo de publicación</b>	<b>Año de publicación</b>	<b>Revista de publicación</b>	<b>País</b>	<b>Universidad/Instituto</b>	<b>Región/Dpto</b>
C. Alava Viteri, M. Gómez de Illera, y J. A. Maya Pantoja	Caracterización fisicoquímica del suero dulce obtenido de la producción de queso casero en el municipio de Pasto	Artículo	2014	Revista colombiana de investigaciones agroindustriales	Colombia	Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)	Nariño
Parra Huertas, Ricardo Adolfo	Lactosuero: importancia en la industria de alimentos	Artículo	2009	Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín	Colombia	Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia (UPTC)	Boyacá
J. R. Guerrero Haber, L. A. Ramírez Perú, y W. Puente Vidal	Caracterización del suero de queso blanco del combinado lácteo Santiago	Artículo	2011		Cuba	Universidad de Oriente	Santiago de Cuba
M.Mazorra-Manzano, J.Moreno-Hernández	Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal	Artículo	2019	CienciaUAT	México	Centro de Investigación y Desarrollo (CIAD)	Sonora
O. Miranda, I. Palma, P. Fonseca, M. Cutiño, R. Lara, y C. Cedeño	Características fisicoquímicas de sueros de queso dulce y ácido producidos en el combinado de quesos de bayamo	Artículo	2009	Revista Cubana Alimentación y Nutrición	Cuba	Investigaciones Agropecuarias Jorge Dimitrov	Granma
R. F. Riofrío Grijalva	Caracterización de lactosuero proveniente de cuatro producciones de diferentes tipos de queso	Tesis	2014		Ecuador	Universidad San Francisco de Quito	Quito
P.Paredes, A.Chávez, J.Rodríguez <i>et al.</i>	Propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de suero de leche de queso Chihuahua	Artículo	2014	Investigación y Ciencia	México	Universidad Autónoma de Aguascalientes	Aguascalientes

**Tabla 2.** Continuación

<b>Autores firmantes</b>	<b>Título de publicación</b>	<b>Tipo de publicación</b>	<b>Año de publicación</b>	<b>Revista de publicación</b>	<b>País</b>	<b>Universidad/Instituto</b>	<b>Región/Dpto</b>
J. Gómez Soto, Ó. Sánchez Toro	Producción de galactooligosacáridos: alternativa para el aprovechamiento del lactosuero. Una revisión	Artículo	2019	Ingeniería y Desarrollo	Colombia	Universidad de Caldas	Caldas
O. Franchi	Suero de leche, propiedades y usos: Innovación en la industria láctea	Artículo	2010		Chile	Quesos maitenes de Ocoa	Valparaíso
P. Panesar, J. Kennedy, D. Gandhi <i>et al.</i>	Bioutilisation of whey for lactic acid production	Artículo	2007	Food Chemistry	India	Institute of engineering and technology	India
C. Támara Castro	Aprovechamiento industrial del lactosuero	Tesis	2015		Colombia	Universidad de Córdoba	Córdoba
M. Castells, M. González, C. Mattos <i>et al.</i>	Valorización del lactosuero	Revista	2017			Instituto Nacional de Tecnología Industrial	

**Nota.** La tabla muestra una recopilación de los artículos claves consultados para la elaboración del presente capítulo.

Según las propiedades fisicoquímicas, el lactosuero se puede clasificar como dulce o ácido. El primero se obtiene de la coagulación enzimática de la leche a un pH de 6,5 que proviene de la fabricación de quesos de pastas prensadas y pastas cocidas. Por otro lado, el lactosuero ácido se produce por acidificación con ácidos orgánicos o inorgánicos a valores de pH de 5,1 o inferiores, en el proceso de elaboración de queso fresco [16], [17]. En la **Tabla 3** se puede observar la composición en g/L y en la **Tabla 4** la composición porcentual peso/volumen del lactosuero dulce y ácido.

**Tabla 3.**

*Composición del lactosuero dulce y ácido*

Componente	Lactosuero dulce (g/L)	Lactosuero ácido (g/L)
Materia seca	55 - 75	55 - 65
Lactosa	40 - 50	40 - 50
Proteína	9,0 - 14	7,0 - 12
Calcio	0,4 - 0,6	1,2 - 1,4
Fósforo	1,0 - 3,0	2,0 - 4,5
Grasa bruta	0,0 - 5,0	0,0 - 5,0
Cloruros	2,0 - 2,2	2,0 - 2,2
Cenizas	4,0 - 6,0	6,0 - 8,0
Potasio	1,4 - 1,6	1,4 - 1,6
Ácido láctico	0,0 - 0,3	7,0 - 8,0
pH	>6,0	<4,5
Grados Dornic*	<20°	>50°

**Nota.** La tabla muestra la composición en g/L para lactosuero dulce y ácido; \*Los Grados Dornic expresan el contenido de ácido láctico presentes en el lactosuero y equivale a 0,1 g/L. Tomado de: N. Monroy, *Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración*. Bogotá D.C, Colombia: Univ. de La Salle, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_alimentos/721](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/721). [Accedido: 27-nov-2021]

Es importante mencionar que la calidad, cantidad y composición del lactosuero es muy variable dependiendo de factores como: Procedencia de la leche, tipo de animal, desarrollo genético, calidad de la alimentación que se provee, manejo del ganado o forma de obtención de la leche, tratamiento térmico del queso que puede llegar a desnaturalizar las proteínas, tipo de coagulación por acción ácida o enzimática, y en

este último caso, también depende del tipo específico de enzima utilizada para llevar a cabo la coagulación [8].

**Tabla 4.**

*Información porcentual de lactosuero dulce y ácido*

<b>Componente</b>	<b>Lactosuero dulce (%)</b>	<b>Lactosuero ácido (%)</b>
Agua	93,6	93,5
Sólidos totales	6,4	6,5
Sodio	0,05	0,05
Potasio	0,16	0,16
Cloro	0,11	0,11
Calcio	0,043	0,12
Fósforo	0,04	0,065
Ácido láctico	0,05	0,4
Lactosa	4,6 - 5,2	4,4 - 4,9
Grasa	0,05 - 0,37	0,04 - 0,27
Proteína	0,6 - 10	0,06 - 0,08

**Nota.** La tabla muestra la composición porcentual para lactosuero dulce y ácido. Tomado de: N. Monroy, *Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración*. Bogotá D.C, Colombia: Univ. de La Salle, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_alimentos/721](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/721). [Accedido: 27-nov-2021]

Las principales diferencias entre los dos tipos de lactosuero se encuentran en el contenido de minerales, su acidez y composición de la fracción de proteína [8]. Sin embargo, independientemente del tipo de lactosuero este producto se compone principalmente de agua, lactosa y grasas.

En Colombia se puede encontrar leche de vaca de composición diferente, aunque todas de excelente calidad, este aspecto se ve relacionado con la geografía de las diferentes regiones en las que se produce. La leche colombiana presenta un alto contenido de proteína (3,56%), mayor que el contenido de leche producidas en países como Nueva Zelanda (3,52%) y Alemania (3,41%), lo que permite rendimientos más altos al emplearla para la elaboración de productos como el queso [18].

## 2.1 Índice de acidez pH

El pH es una característica propia de cada sustancia, la cual determina la basicidad o acidez dependiendo de la cantidad de iones de hidrógeno, que es elevada en el caso de ser ácido y disminuye a medida que se hace más básico [19]. En los artículos consultados se establece que el pH del lactosuero varía principalmente de acuerdo con el método empleado para la precipitación proteica. Si se trata de lactosuero ácido, el pH se encuentra por debajo de 6, si el lactosuero es dulce, el pH se encuentra por encima de 6 [10], [17], [20].

No obstante, el pH del lactosuero depende de la caseína precipitada y la cantidad de ácido láctico presente en el mismo [9]. En Callejas *et al.* [20] afirman que la variación de pH entre lactosueros, se debe a la presencia de dímeros u octámeros<sup>1</sup> de la proteína  $\beta$  - Lactoglobulina, es decir: para un lactosuero de tipo ácido, se infiere una presencia mayoritaria de dímeros de la proteína, en caso contrario para un lactosuero dulce, se asume una presencia mayoritaria de octámeros de la proteína mencionada en el lactosuero.

La medición de pH se realiza mediante un potenciómetro en las diferentes fuentes bibliográficas consultadas. En Guerrero *et al.* [17] se determinan dos tipos de lactosuero, un lactosuero dulce y un lactosuero de requesón; es un de queso donde el lactosuero es de tendencia dulce, con valores reportados entre 5,48 y 6,8. Esto se debe a que depende mucho del tipo de queso y el proceso empleado para precipitar la caseína, por ende, al tratarse de un tipo de queso de pasta blanda, tiende a ser lactosuero dulce.

En Callejas *et al.* [20], se realiza la medición de manera directa sin dilución, cuyo rango se encuentra entre 4,81 y 4,85. Los datos muestran un lactosuero de tipo ácido, aunque el autor no especifica el tipo de queso del cual se deriva el lactosuero, si hace énfasis en la ubicación de la planta, la cual se encuentra en San Francisco, en el

---

<sup>1</sup> **Octámero:** Complejo específico de 8 histonas nucleosómicas.

estado de Hidalgo en México. Sin embargo, la única planta productora en San Francisco produce queso doble crema y requesón, ambos se caracterizan por tener lactosueros de carácter ácido, debido a que: son de pasta blanda, contienen un porcentaje bajo de grasas y se usa leche ácida<sup>2</sup> para su producción [21], [22].

En Colombia, los valores de pH no varían demasiado con otros reportados en la región como se evidencia en López *et al.* [7], donde se realiza la medición a través de un potenciómetro proporcionado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) para el estudio de lactosuero proveniente de la elaboración de queso Paipa, cuyos valores se encuentran entre 5,6 y 5,8. Debido a que las muestras derivan de la elaboración de dicho queso, y al tratarse de un queso semi duro y que requiere leche cruda<sup>3</sup> para su elaboración, el lactosuero obtenido se puede considerar como ácido.

Así mismo, en Forero y Ordoñez [9] se realizan mediciones directas con dilución y posteriormente se determina el pH de las muestras, donde el valor estipulado ponderado es de 4,46, dando lugar a un lactosuero de carácter ácido, debido a que, en el proceso de elaboración de quesos, se llevó a cabo con ácido acético.

Por último, en Osorio y Martínez [23] se contrata una empresa tercera para realizar el análisis de la muestra, cuyo valor registrado es de 3,91. Dado que la empresa en la cual se desarrolla el trabajo de grado no hay una separación entre lactosueros obtenidos, y a su vez son más de tres tipos de quesos distintos, al verificar el resultado de la muestra es de tipo ácido. Esto se debe principalmente a la variabilidad de las propiedades del lactosuero de cada tipo de queso, donde se combinan y varían bastante sus propiedades fisicoquímicas. Para resaltar, si se desean obtener propiedades de valores cercanos a la bibliografía, es necesario realizar la caracterización de solo un tipo de lactosuero.

---

<sup>2</sup> **Leche ácida:** Leche expuesta al ambiente durante un periodo extendido.

<sup>3</sup> **Leche cruda:** Leche sin pasteurizar.

## **2.2 Sólidos totales**

Los sólidos totales incluyen toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos, esta se define como la materia que permanece como residuos después de la evaporación y secado a 103 °C. El contenido de sólidos totales presentes en el lactosuero se encuentra, por lo general, entre 5 g/L y 7 g/L [17], cuyo valor depende directamente de su contenido de grasa, proteína, lactosa y sales minerales.

Según el estudio realizado por Alava *et al.* [16], El contenido de sólidos totales presentes en el lactosuero dulce está entre 6,0 g/L y 7,3 g/L con un promedio de 6,5 g/L, en el que se concluye que el valor más alto de sólidos totales obtenido 7,3 g/L, proviene de una de las plantas que presenta mayor contenido de lactosa y proteína en el lactosuero.

Además, Guerrero *et al.* [17], en la caracterización fisicoquímica de un lactosuero dulce reporta valores entre 6,05 g/L y 9,21 g/L con un promedio de 6,79 g/L; por otro lado, Callejas *et al.* [20] reporta un promedio de 7,17 g/L de sólidos totales presentes en el lactosuero ácido, siendo uno de los valores más altos hallado en las fuentes de información consultadas. Esto se debe a que se trata de un lactosuero que presenta muy elevadas cargas orgánicas, debido a su alto contenido de lactosa, ácido láctico, grasas y proteínas.

## **2.3 Porcentaje de cenizas**

Las cenizas son el residuo inorgánico que se obtiene al incinerar la materia orgánica, volatilizando mayoritariamente agua, dejando como residuos minerales constituyentes en forma de óxidos como sulfatos, fosfatos, silicatos, cloruros y varía según la composición del producto analizado [24].

Dentro de los métodos de análisis del porcentaje de cenizas se encuentran tres; cenizas en seco, por lo general se usa para la mayoría de alimentos, cenizas húmedas para muestras con alto contenido en grasas y análisis simple de cenizas de plasma en



seco a baja temperatura, este último llevado a cabo para el análisis de compuestos volátiles elementales [24].

El método empleado para determinar el porcentaje de cenizas en las muestras de lactosuero no se menciona a detalle en las fuentes bibliográficas, no obstante, por la metodología empleada para la determinación de dicha propiedad, se asume el análisis en seco.

En López *et al.* [7], Forero y Ordoñez [9], se determinaron las cenizas por el método de calcinación y posteriormente separado el analito de los otros componentes por gravimetría, dando como resultado valores entre 0,40% (4,0 g/ L) y 0,42% (4,2 g/L). Los resultados obtenidos son bajos en cenizas, esto se debe a que la mayoría del lactosuero lo compone el agua (93,3 g/L) y a que, según Forero y Ordoñez, la composición de minerales en el lactosuero es función del pH y la técnica de coagulación empleada, es decir, al tipo de queso de donde proviene el lactosuero.

## **2.4 Contenido de grasas**

Las grasas se definen como un grupo de compuestos insolubles en agua, pero solubles en ciertos disolventes orgánicos como el éter, cloroformo, benceno o acetona, compuestas de carbono, hidrógeno, oxígeno y algunas pueden contener fósforo o nitrógeno en su estructura [24].

Para determinar el contenido de grasas totales, se realizan métodos de extracción con disolventes orgánicos, donde los métodos *Soxhlet*, *Goldfish* y *Mojonnier* son los más empleados. Sin embargo, existen métodos que no requieren el uso de disolventes como el método Babcock y el método Gerber, e incluso métodos instrumentales que se basan en propiedades físicas o químicas de las grasas por densidad, rayos infrarrojos y absorción de rayos [24].

En Callejas *et al.* [20], el contenido promedio de grasas totales provenientes de una empresa de Hidalgo en México, es de 80,3 g/L para un lactosuero, mientras que en

Guerrero *et al.* [17] el lactosuero presenta un contenido de grasas de 60,29 g/L para un lactosuero dulce y 27 g/L para lactosuero de requesón (tendencia dulce). Se puede evidenciar que, pese a ser de la misma región, el contenido de grasas fluctúa significativamente.

El contenido de grasas presentes en el lactosuero puede presentar diferencias dependiendo del proceso de elaboración del queso y la alimentación del ganado lechero [3], lo que representa un cambio significativo de país en país en incluso, una diferencia notable entre región y región, por lo que se considera una propiedad fisicoquímica única para cada tipo de lactosuero analizado.

En Colombia, en Osorio y Martínez [23], se realiza por extracción Soxhlet, usando como solvente dietiléter, obteniendo un valor de 18,9 g de grasas totales por cada 100 g de dietiléter, mientras que en López *et al.* [7] realizan el análisis de grasas por hidrólisis ácida, mediante el protocolo de Gerber, dando como resultado un rango porcentual en peso entre 36% y 64% de grasas totales por cada 100 gramos de solvente.

Pese a que ambos lactosueros son del mismo tipo, la razón de la disminución de grasas en Osorio y Martínez, se debe a la muestra de lactosuero analizada, se toma en la trampa de grasas de la planta, lo que significa que previamente se retira parte de ella en una de las cámaras y, por lo tanto, el valor se encuentra por debajo del promedio.

Por otro lado, el porcentaje de grasas en la leche depende en su mayoría de la alimentación del ganado, es decir, de manera implícita, también afecta la cantidad de grasas presentes en el lactosuero. Adicionalmente, la mayoría de propiedades fisicoquímicas del lactosuero dependen de la procedencia de queso; y las grasas no son la excepción, por ende, es razonable que el porcentaje de las mismas fluctúe como se evidencia en los datos reportados en [23].

## 2.5 Densidad

La densidad es una propiedad física básica de cualquier material, y se define como la relación entre la masa y el volumen. La densidad del lactosuero se relaciona con los finos que pueden pasar de la masa cuajada el suero al momento del retirar el lactosuero, lo que puede darse por el trabajo mecánico fuerte que se le dé a la cuajada durante la agitación en la tina quesera, o a temperaturas bajas de coagulación de la leche por debajo de 32°C [16].

Según las fuentes consultadas reportan en la mayoría de casos, valores de densidad para el lactosuero entre 1,025 g/mL a 1,027 g/mL. Así lo sostienen investigaciones sobre el tema desarrolladas por Callejas *et al.* [20] en donde el suero ácido analizado tuvo una densidad promedio de 1,026 g/mL. También Alava *et al.* [16], en la caracterización fisicoquímica del suero dulce obtenido de la producción de queso casero en la ciudad de Pasto, donde se determinaron los valores de la densidad, los cuales se encuentran entre 1,025 g/mL y 1,027 g/mL y Álvarez *et al.* [11] en la caracterización fisicoquímica de los diferentes tipos de lactosueros, reportó valores de densidad entre 1,025 g/mL y 1,027 g/mL.

## 2.6 Demanda química y biológica de oxígeno

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un parámetro que mide el grado de contaminación del efluente (en este caso lactosuero), cuantificando el oxígeno requerido por determinados microorganismos para poder oxidar el efluente en cuestión, mientras mayor sea el oxígeno requerido por los microorganismos, mayor será el nivel de contaminación del residuo. Asimismo, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) hace referencia a la cantidad de materia orgánica susceptible a ser oxidada por medios químicos, al igual que la DBO, a mayor oxígeno utilizado en la oxidación del residuo, mayor es su nivel de contaminación. Usualmente la DQO tiende a ser el doble del valor de la DBO [25].

La carga contaminante de sueros varía según el tipo de suero que se deseche en el medio ambiente. El suero dulce ejerce 42 g/L de DBO y 65 g/L de DQO mientras que el suero ácido 35 g/L de DBO y 60 g/L de DQO; la lactosa es responsable del 90% de la contribución [7].

Según autores como C. Támara [4] y N. Monroy [8], gracias al gran contenido de nutrientes que posee el lactosuero este tiene aproximadamente 36 g/L de DBO y 69,9 g/L de DQO por cada 100 kg de lactosuero líquido, cuyo valor puede incrementar a 10 kg si se presenta un aumento en las pérdidas de los finos por defectos de coagulación siendo la lactosa la responsable de un 10% a 80% de dicho incremento.

Guerrero *et al.* [17], en la caracterización fisicoquímica del lactosuero, reporta un promedio de 83,318 g de O<sub>2</sub>/L de DQO presente en el lactosuero, debido a que las muestras analizadas presentan altas cargas de materia orgánica.

Mientras Callejas *et al.* [20], determinaron el DQO según el método estándar de flujo cerrado, obteniendo valores extremadamente elevados (> 110 g de O<sub>2</sub>/L) debido a que en la muestra quedo algo de caseína sin precipitar ya que no se alcanzó el pH de 4,67 del punto isoeléctrico (pZ=0,0), y ello se corresponde con los elevados niveles de turbidez y solidos totales, que unido a los contenidos de lactosa, grasas y ácido láctico, justifican los altos valores de DQO presentes en la muestra.

Estos datos corroboran que este subproducto al retener más del 55% de todos los nutrientes contenidos en la leche, es uno de los mayores contaminantes de la producción quesera, alcanzando valores de DQO y DBO de entre 60-80 g/L y 30-50 g/L, respectivamente [26].

## **2.7 Proteínas totales**

Las proteínas presentes en el lactosuero son de mayor interés a nivel económico y nutricional, constituyen aproximadamente el 0,6% de la composición del lactosuero

derivado de la industria quesera [17], [8], [10]. Adicionalmente, el lactosuero es rico en aminoácidos como la isoleucina, leucina y valina [10].

Entre las proteínas presentes en el lactosuero, se encuentran; inmunoglobulinas, que representan el 75% de las proteínas presentes en el lactosuero, albuminas, que se encuentran en su mayoría  $\beta$  - lactoglobulinas y en menor cantidad  $\alpha$  - lactoalbúminas, proteasas-peptonas, como las seroalbúminas que presenta la habilidad de unirse a una gran variedad de moléculas y se encuentra presente en el sistema circulatorio. Las proteínas que se encuentran en menor cantidad son: lactoferrina, que presenta diversas funciones en las defensas del cuerpo, además de ser capaces de captar hierro, cobre, zinc entre otros minerales [8], [10].

Por otra parte, la caseína es una proteína que también está presente en el lactosuero, no obstante, se encuentra en una proporción muy baja; debido a que, en su mayoría, precipita en la producción de queso. La presencia de caseínas en el lactosuero es un factor de relevancia, ya que, un porcentaje de caseínas por encima del 2% peso – volumen (sobre el porcentaje de proteínas totales en el lactosuero), eleva la DQO y la DBO; ya que incrementa la cantidad de sólidos totales, lo que significa un impacto al ambiente [8], [4], [10].

### **2.7.1 Lactoglobulinas**

Dentro de las proteínas que constituyen el lactosuero, se encuentra mayoritariamente  $\beta$  -lactoglobulina, con porcentajes entre 44% y 52% de las proteínas totales, su concentración es aproximadamente 3,30 g/L y en cuanto a su estabilidad térmica se considera como termolábil a 74°C. Adicionalmente, constituyen el 50% de las proteínas totales presentes en el lactosuero [8], [10].

### **2.7.2 Lactoalbúminas**

La alfa-lactoalbúmina, es considerada la segunda proteína más abundante en el lactosuero, constituye entre el 20% y 30% de las proteínas totales, su

concentración es de aproximadamente 1,20 g/L y es inestable al calor por encima de los 63°C. Adicionalmente, constituyen el 12% de las proteínas totales presentes en el lactosuero [8], [10].

Dentro de los datos reportados por los autores, la cantidad de proteína no varía significativamente, por ejemplo, en Guerrero *et al.* [17] el porcentaje peso/volumen reportado de proteínas en lactosuero dulce es de 1,12%, mientras que el porcentaje peso/volumen reportado para lactosuero de requesón es de 0,61%, siendo ambos lactosueros de tipo dulce. En Callejas *et al.* [20] el porcentaje promedio para un lactosuero de tipo dulce es de 0,53%, un poco más bajo que el reportado por el anterior autor.

En Colombia, autores como López *et al.* [17] y Alava *et al.* [16], reportan un intervalo de porcentaje peso/volumen de proteínas entre 0,63% y 0,85%, ambos lactosueros de tipo ácido. Sin embargo, autores como Forero y Ordoñez [9] o Nafar y Galenao [5], datan que el rango porcentual peso/volumen de lactosuero de tipo ácido analizado, se encuentra entre 0,65% y 0,72%. Los valores de proteínas pueden variar según la cantidad de precipitado de caseína en la producción de queso, la adición de sal o de ácido láctico en el proceso o del tipo de procedencia del lactosuero.

## **2.8 Minerales**

Las sales minerales que se presentan en el lactosuero son potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca), fósforo (P), magnesio (Mg) y oligoelementos como el cinc (Zn), hierro (Fe) y cobre (Cu) [10].

En Riofrío [10], se determinaron las cantidades de Ca, Na y K por espectroscopía de absorción atómica (AAS), pre tratando las muestras por medio de tamizado, utilizando ácido tricloro acético (TCA), centrifugando y diluyendo las muestras a distintas concentraciones. Por último, a través del equipo de absorción atómica se determinan las curvas de calibración y los valores de las muestras se determinaron como: 4,2 g/L Ca, 0,7 g/L de K y 2,1 g/L de P.

Por otro lado, en Miranda *et al.* [27] se determinan los porcentajes de Ca y P según los

métodos establecidos por la AOAC 985.35, cuyas cantidades de fósforo son de 3,3 g/L  $\pm$  0,30 g/L para una muestra de suero de queso dulce y 3,1 g/L  $\pm$  0,20 g/L para una muestra de suero de queso ácido. Las cantidades de calcio son de 5,3 g/L  $\pm$  0,20 g/L para una muestra de suero de queso dulce y 5,1 g/L  $\pm$  0,20 g/L para una muestra de suero de queso ácido. La variación de minerales depende, en gran parte de la procedencia del tipo de queso del lactosuero, no obstante, los valores que se encuentran en la bibliografía están dentro de los rangos presentados en la normativa de cada país y a su vez son similares entre sí [8], [10], [28].

## 2.9 Propiedades microbiológicas

Es importante realizar un análisis microbiológico con el fin de garantizar inocuidad, calidad y eficiencia en los procesos en los que se empleó el lactosuero. La presencia o ausencia de estos microorganismos depende de las buenas prácticas de higiene (BPH) y manufactura (BPM) que se lleven a cabo.

**Tabla 5.**

*Análisis microbiológico del lactosuero de queso Paipa*

Parámetro.	Plantas de queso Paipa.		
	LOS ALISOS.	LA PRADERA.	CARTAGENA.
Aerobios mesófilos (UFC/mL)	11x10 <sup>5</sup> c	13x10 <sup>5</sup> b	16x10 <sup>5</sup> a
Coliformes totales (NMP/mL)	>1100 a	>1100 a	>1100 a
Levaduras (UFC/mL)	51x10 <sup>2</sup> a	14x10 <sup>2</sup> b	49x10 <sup>2</sup> a
Mohos (UFC/mL)	20 c	80 a	40 b
Bacterias ácido lácticas (UFC/mL)	6x10 <sup>4</sup> b	10x10 <sup>4</sup> b	16x10 <sup>4</sup> a

**Nota.** La tabla presenta los diferentes parámetros microbiológicos del lactosuero obtenidos, para tres diferentes plantas productoras de queso en el municipio de Paipa y Sotáquira; \*\*NMP: Número más probable, \*\*UFC: unidades Formadoras de Colonia. Tomado de: R. E. López *et al.*, “Caracterización físico-química y microbiológica del lactosuero del queso Paipa”, *Cienc. y Agric.*, vol. 15, no 2, pp. 99–106, 2018, doi: 10.19053/01228420.v15.2.

Esto lo confirman autores como López *et al.* [7], en la caracterización físico-química y

microbiológica del lactosuero, donde se evaluaron parámetros de microorganismos aerobios mesófilos, mohos, Bacterias Ácido Lácticas (BAL) y levaduras (ver **Tabla 5**) para tres plantas de queso, evidenciando que el lactosuero cumple con los parámetros microbiológicos del Ministerio de Salud de Colombia, exceptuando coliformes totales, coliformes fecales, microorganismos aerobios mesófilos y levaduras debido a que presentaron un recuento alto de unidades formadoras de colonias (UFC).

Dado que el lactosuero evaluado muy probablemente ha sido sometido a condiciones ambientales inadecuadas, a una mala higiene de utensilios y personal, malas instalaciones o puede deberse directamente a la calidad inicial de la leche con la que se elabora el producto [29].

Para el recuento de cada uno de los microorganismos mencionados, López *et al.* [7], empleo para aerobios mesófilos (UFC/mL), AOAC 966.23.C: 2001; para coliformes totales y fecales (NMP), ICMSF NMP: 2000; para mohos y levaduras (UFC/mL), ISO 7954: 2002, y bacterias ácido lácticas (UFC/mL), NTC 5034: 2002, normativa vigente en Colombia.

En Paredes *et al.* [29], realizan un recuento total de bacterias mesófilas aerobias ( $7,72 \pm 1,76^a \text{Log}_{10} \frac{\text{UFC}}{\text{ml}}$ ), coliformes totales ( $5,50 \pm 1,4^a \text{Log}_{10} \frac{\text{UFC}}{\text{ml}}$ ), mohos y levaduras ( $3,04 \pm 0,94^a \text{Log}_{10} \frac{\text{UFC}}{\text{ml}}$ ) a dos tipos de lactosuero: pasteurizado y sin pasteurizar, encontrando que no existen diferencias significativas en estos dos tipos de suero respecto a la cantidad de microorganismos presentes, lo que pudo deberse a la calidad de la leche empleada para la elaboración del queso, así como a su forma de manipulación y almacenamiento.



## 2.10 Elaboración de resumen de resultados

A continuación, se presenta el compendio promedio ponderado de la información consultada en la bibliografía de las propiedades fisicoquímicas, con su respectiva desviación estándar. Adicionalmente, se consultaron más fuentes bibliográficas con el fin de tener un reporte de datos sólido para cada propiedad; los documentos consultados son [2], [6], [29] y [30].

**Tabla 6.**

*Resumen de resultados*

Propiedades.	Valor.		Referencias.
	Lactosuero dulce.	Lactosuero ácido.	
pH.	6,094± 0,810	4,714 ± 0,472	[4], [2], [7], [8], [9], [10], [16], [17], [20], [23], [27], [29], [30]
Sólidos totales (g/L).	6,467± 0,849	6,417 ± 0,639	[4], [2], [6], [7], [9], [20], [27], [29], [30]
Porcentaje de cenizas (g/L).	5,22± 1,322	6,85 ± 0,212	[8], [16], [17]
Contenido de grasas (g/L).	3,753± 1,361	1,056 ± 0,694	[2], [4], [6], [7], [8], [9], [10], [16], [17], [20], [23], [27], [29], [30]
Densidad (g/mL).	1,025± 0,002	1,025 ± 0,001	[4], [8], [11], [16], [20], [27], [28]
DQO (g O <sub>2</sub> /L).	70,864± 6,429	66,5 ± 4,435	[4], [8], [10], [17], [20], [30]
DBO (g O <sub>2</sub> /L).	38 ± 3,559	36,25 ± 2,50	[4], [8], [10]
Proteínas totales (g/L).	7,016± 2,647	7,733 ± 1,143	[2], [4], [7], [8], [10], [11], [12], [14], [17], [25], [27], [28], [19], [30]
Lactosa (g/L).	47,4± 3,370	49,55 ± 8,275	[2], [4], [7], [9], [10], [11], [14], [25], [27], [29], [30], [31],
Calcio (g/L).	4,076± 1,295	3,53 ± 1,023	[4], [2], [10], [12], [14], [25], [27], [29], [30], [31],
Fosfatos (g/L).	2,92± 0,898	3,105 ± 0,425	[4], [6], [14], [25], [31]

**Nota.** La tabla presenta los diferentes promedios y la desviación estándar para cada una de las propiedades fisicoquímicas del lactosuero. \* ± desviación estándar.

Después de haber recopilado la información en aquellas fuentes bibliográficas que cumplieran con los parámetros establecidos y se encontrara información de interés, se determinan los valores de referencia para la caracterización del lactosuero, los cuales se encuentran tabulados en la **Tabla 6**.

### 3. BIOPOLÍMEROS

Los biopolímeros surgen como una necesidad de reemplazar la actual producción excesiva de plástico que ha generado un problema ambiental de gran impacto. Los plásticos de origen fósil, son extremadamente persistentes en el ambiente, además, estos se fragmentan en pequeños pedazos llamados micro plásticos que, debido a su tamaño, se desplazan rápidamente en las fuentes de los recursos naturales, causando graves daños al ecosistema y al ser humano [31].

En los últimos años, los productos biológicos y biodegradables han despertado un gran interés y han sido foco intensivo de investigación, con el fin de reemplazar o reducir el uso plásticos fabricados con hidrocarburos de origen petroquímico; debido a que las políticas de desarrollo sostenible tienden a expandirse con la disminución de las reservas de combustibles fósiles y la creciente preocupación por el medio ambiente.

Los polímeros biodegradables se definen como aquellos que experimentan una escisión de cadena inducida microbianamente que conduce a la mineralización. Estos polímeros requieren condiciones específicas; en términos de pH, oxigenación y presencia de algunos metales para asegurar su biodegradación [32].

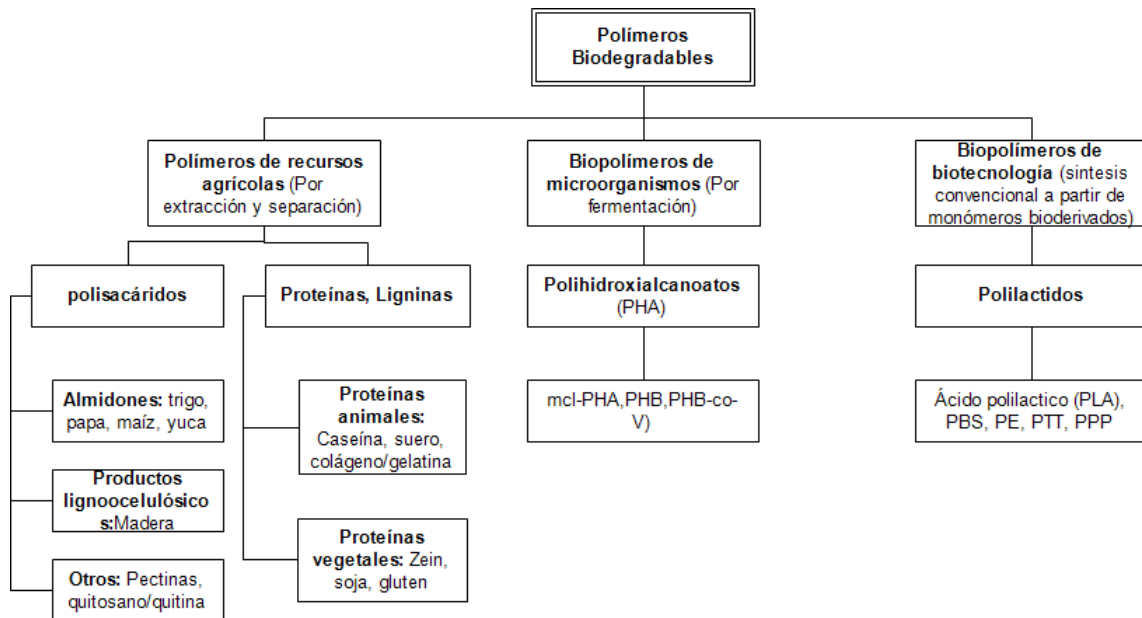
Existen distintos tipos de biopolímeros, de acuerdo tanto con la materia prima y como con el proceso de obtención. En el primer caso se fabrican a partir de fuentes biológicas como el maíz, celulosa de madera, almidón, entre otros. En cuanto a los mecanismos de obtención estos pueden ser sintetizados por bacterias, o pueden derivarse de fuentes de petróleo y de fuentes mixtas de biomasa y petróleo [33].

#### 3.1 Tipos de biopolímeros

Los biopolímeros se pueden clasificar según su proceso de síntesis (**Figura 5**) y se dividen en tres subgrupos: Biopolímeros basados en recursos renovables (almidón, celulosa y alginatos), biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de monómeros de base biológica por fermentación química convencional (seguida de polimerización), y biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de microorganismos [34].

**Figura 5.**

*Producción de biopolímeros según su mecanismo de obtención*



**Nota.** La figura muestra las diferentes rutas a través de las cuales se puede obtener un biopolímero.

Tomado de: L. Avérous and E. Pollet, Chapter 2 Biodegradable Polymers, vol. 50. 2012.

### 3.2 Polímeros basados en recursos renovables con modificación parcial

Los polisacáridos de recursos renovables con modificación parcial tienen como principal fuente el almidón y la celulosa. Los biopolímeros basados en almidón, están formados por una mezcla de dos polímeros: Amilosa y amilopectina. La amilosa se considera como una molécula lineal y la amilopectina como una molécula ramificada. Por lo general, los almidones más comunes contienen alrededor de 25% amilosa y 75% de amilopectina; se usan para la fabricación de envases y embalajes [31].

Sin embargo, casi el 50% de estos biopolímeros están constituidos por mezclas de almidón con otros polímeros basados en petroquímica, tienen baja resistencia a la humedad, baja procesabilidad e incompatibilidad con algunos polímeros hidrofóbicos [35]. Estas limitaciones se han logrado superar mediante la modificación de la estructura del almidón, mezclas con otros polímeros biodegradables, uso de

componentes compatibles para mejorar la adhesión interfacial entre el almidón y el polímero y la adición de fibras o arcillas reforzantes [35].

Por otro lado, la celulosa utilizada como fuente de formación de biopolímeros se encuentra casi de forma pura en el algodón, está formada por la unión de moléculas de  $\beta$ -glucosa mediante enlaces  $\beta$ -1,4-O-glucosídicos; tiene una estructura lineal en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos OH de las cadenas de glucosa y originan las fibras compactas que constituyen la pared celular [31].

Los biopolímeros a base de celulosa se producen mediante modificación química de la celulosa natural, entre los que se encuentra el celofán, el acetato de celulosa, el éster de celulosa, la celulosa regenerada para fibras y los biomateriales compuestos de celulosa. Se utilizan en la fabricación de membranas, en procesos de extrusión y moldeo, en la fabricación de prendas de vestir y materiales higiénicos desechables.

### **3.3 Biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de monómeros de base biológica**

En este grupo se encuentran principalmente los aceites vegetales y el ácido poli láctico (PLA). En cuanto a los aceites vegetales, estos se han convertido en una de las fuentes más importantes en la síntesis de biopolímeros, debido a que los aceites son fácilmente obtenidos de plantas y en su mayoría están compuestos por triglicéridos [35]. Los triglicéridos son moléculas altamente funcionales y son el resultado de la unión entre una molécula de glicerol y tres moléculas de ácidos grasos, a través de la formación de enlaces tipo éster.

Es por ello que se han usado en la síntesis de polímeros reticulados, mediante dos métodos: El primero, se basa en el aprovechamiento de grupos funcionales presentes en los triglicéridos, por ejemplo: alcoholes, dobles enlaces internos o epóxidos, los cuales se pueden polimerizar usando diferentes métodos.

El segundo método consiste en realizar modificaciones químicas antes de la polimerización, con el fin de mejorar la baja reactividad que presentan los triglicéridos naturales previas a la polimerización; mediante modificaciones químicas introduciendo grupos funcionales que se polimerizan fácilmente [31]. Entre los principales aceites usados para la elaboración de biopolímeros se encuentra el aceite de higuera, girasol, linaza, soja y palma.

Otro polímero de gran interés es el ácido poliláctico (PLA), este pertenece a la familia de poliésteres alifáticos, con la unidad constitucional ácido láctico. El monómero ácido láctico, es el ácido hidroxil-carboxílico y se obtiene mediante fermentación bacteriana; a partir de maíz (almidón) o azúcares obtenidos de recursos renovables. Sin embargo, se destaca el maíz como materia prima, ya que permite obtener un ácido láctico de alta pureza. Es importante mencionar que el ácido láctico se obtiene dependiendo de la cepa microbiana utilizada durante el proceso de fermentación [34].

Este biopolímero sobresale debido a que tiene excelentes características que incluyen buena transparencia, apariencia brillante, alta rigidez y la capacidad para tolerar varios tipos de condiciones de procesamiento; debido a que tiene el potencial de reemplazar polímeros tradicionales como el tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS) y policarbonato (PC). Este tiene múltiples aplicaciones (**Tabla 7**) y se ha usado principalmente en el envasado de alimentos.

**Tabla 7.***Aplicaciones de ácido poliláctico*

<b>Polímero.</b>	<b>Aplicaciones.</b>
PLGA* / PGA**	Reemplazo de válvula pulmonar ovina.
PLA / quitosano PLA / PLGA / quitosano PLA	Portador de fármaco / liberación de fármaco.
PLGA y copolímeros	Suturas degradables.
Compuestos PLA/ HA	Andamios porosos para aplicaciones celulares.
PLA-CaP y PLGA- CaP	Dispositivos de fijación ósea, placas, clavijas, tornillos y alambres, aplicaciones ortopédicas.
PDLLA^	Recubrimientos sobre implantes metálicos.
PLA / PLGA	Uso en terapia génica basada en células para enfermedades cardiovasculares, regeneración de tejidos musculares, huesos y cartílagos y otros tratamientos de afecciones cardiovasculares y neurológicas.
PLA y mezclas de PLA	Películas de embalaje, contenedores de productos básicos, electrodomésticos, carcasas de teléfonos móviles, alfombrillas, repuestos para automóviles.

**Nota.** La tabla presenta las diferentes aplicaciones del PLA y sus mezclas en varios campos.

\*Copolímero biodegradable que produce ácido glicólico y ácido láctico como productos de degradación. \*\*acid poliglicólico. ^ácido poli-L-láctico. Tomado de: R. P. Babu, K. O'Connor, & R. Seeram, "Current progress on bio-based polymers and their future trends," Prog. Biomater., vol. 2, no. 1, p. 8, 2013, doi: 10.1186/2194-0517-2-8.

### 3.4 Biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de microorganismos

En este grupo se destacan los polihidroxialcanoatos (PHA) que son una familia de poliésteres producidos por fermentación bacteriana, mediante gránulos intracitoplasmáticos (reserva carbono y energía). Este puede ser producido por variedad de bacterias, utilizando diferentes materias primas de desechos renovables como aceites vegetales, desechos orgánicos, desechos sólidos urbanos, ácidos grasos y varía según el PHA que se quiera producir. Un proceso genérico para producir PHA por fermentación bacteriana implica: fermentación, aislamiento y purificación del caldo de fermentación [36].

En la actualidad se han identificado más de 150 monómeros de PHA, lo que permite la producción de biopolímeros con una amplia gama de propiedades térmicas y mecánicas, que los hacen termoplásticos, aunque depende directamente de la materia prima empleada. Los PHA poseen propiedades físicas y químicas similares a los plásticos de origen fósil, como dureza y flexibilidad. Adicionalmente, se han identificado cerca de 200 especies microbianas capaces de sintetizar PHAs, pero pocas de ellas son usadas a nivel industrial, debido a que la mayoría de estas, producen PHAs como metabolito secundario de bajo peso en biomasa seca [37].

Además, los PHA han demostrado tener algunas ventajas que los hacen mucho mejores que los plásticos convencionales y otros tipos de biopolímeros, estos son resistentes a la degradación hidrolítica ya que son insolubles en agua, resisten la radiación UV con baja permeabilidad al oxígeno, posee un amplio rango de temperaturas de fusión ( $T_f$ ) y temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ) basadas en el peso molecular y cristalinidad del polímero (Ver **Tabla 8**) [38].

Estos biopolímeros son aptos para distintas aplicaciones: en envasado de alimentos, incluidos tapones y cierres, artículos desechables, como tenedores, cucharas, cuchillos, tinas, bandejas y tapas de tazas calientes; y productos como artículos para el hogar, cosméticos, envases médicos, entre otros [39].



**Tabla 8.***Algunas propiedades mecánicas de los polímeros y biopolímeros*

Propiedad	PP	LDPE	PS	PVC	P3HB	P3HB-3HV	P3HB-4HB
T <sub>f</sub> [°C]	168	123	-	-	177	140	150
T <sub>g</sub> [°C]	-20	-36	90	110	4	-1	-7
Cristalinidad [%]	60	30	-	-	70	60	45
Módulo de Young [GPa]	1,3	0,4	3,2	3,2	3,5	0,8	-
Fuerza de tensión [MPa]	36	20	36	46	43	20	26
Alargamiento de rotura [%]	350	530	2	60	5	50	444
Resistencia al impacto [J/m]	50	*	24	580	60	110	-

**Nota.** \*No hay fractura; – No se encuentra disponible. (PP) Polipropileno; (LDPE) Polietileno de baja densidad; (PS) Poliestireno; (P3HB) poli-3-hidroxitirato; (P3HB-3HV) poli-3-hidroxitirato-co-3-hidroxitirato; (P3HB-4HB) poli-3-hidroxitirato-co-4-hidroxitirato. Tomado de: Yu, J. "Microbial Production of Bioplastics from Renewable Resources". *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources*, 585–610. 2007, doi:10.1016/b978-044452114-9/50024-4 [Accedido: Oct. 30, 2021]

### 3.5 Avances tecnológicos para la producción de biopolímeros

Los biopolímeros han tenido mucho protagonismo en los últimos años, puesto a que las investigaciones en torno a ellos son de optimización, aplicabilidad y factibilidad en los diversos sectores en la industria; como lo es en la industria de la construcción, textil, plásticos y biomédica. La producción de biopolímeros supone una desventaja a nivel económico, ya que la materia prima y el tratamiento del inóculo representa entre el 30 y 40 % de los costos totales asociados al dicho proceso; en cuanto al aspecto ambiental, es una gran alternativa a los polímeros convencionales, ya que estos pueden degradarse en la naturaleza de manera espontánea; aunque varía el tiempo de dicha degradación [40].

Las investigaciones emergen de la necesidad de reducir los costos de producción, estos costos se encuentran muy ligados en los pretratamientos de las fuentes de

carbono, adición de nutrientes y preparación de caldos de cultivo. Por lo tanto, se han estudiado diferentes fuentes de carbono a partir de desechos de la industria, mayoritariamente en la industria agrícola.

**Tabla 9.**

*Comparación de algunas características principales de los polímeros*

<b>Biopolímeros.</b>	<b>Polímeros basados en petróleo.</b>
Producción sostenible a partir de recursos renovables.	La producción utiliza recursos naturales valiosos.
Respetuoso con el medio ambiente con naturaleza biocompatible y biodegradable.	Biocompatibilidad y potencial de biodegradabilidad limitados.
Estructura polimérica diversificada que mejora la funcionalidad y adapta la composición química para usos específicos.	Flexibilidad limitada para la derivatización para usos específicos.
Emisiones bajas de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero.	Altas emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero.
Mayor costo de producción.	Menores costos de producción.

**Nota.** La tabla presenta la comparación entre biopolímeros y polímeros convencionales. Tomado de: Sengor, S. "Review of Current Applications of Microbial Biopolymers in Soil and Future Perspectives". Southern Methodist University. 2019. Doi: 10.1021/bk-2019-1323.ch013.

### 3.6 Comparación PHA y PLA

La producción de PLA a partir de lactosuero como sustrato es una opción viable debido a sus altos rendimientos, como lo aseguran Rojas *et al.* [41], Tsapekos *et al.* [42], Cuervo [43], Cuervo y Echeverry [44] los cuales reportan el uso del 15% de lactosa, con un rendimiento de PLA del 11,71 g/L a partir de *Lactobacillus delbrueckii*. No obstante, en las fuentes consultadas, el microorganismo es anaerobio; generando así emisiones de CH<sub>4</sub> en el proceso que, si bien no representa una desventaja debido a la posibilidad del aprovechamiento de este, es un factor diferencial respecto a la producción de PHA's.

Dado que, en las investigaciones y fuentes consultadas, el PHA's presenta un consumo superior al 45%, lo que representa una reducción de DBO y DQO en el

efluente del proceso (debido a que la cantidad de lactosa es proporcional a dichos parámetros) [45].

En la producción de PLA a partir de lactosuero como sustrato, se utiliza un reactor catalítico al vacío (con  $\text{SnCl}_2$  como catalizador), lo cual es una ventaja ya que se reducen los tiempos de residencia en el reactor y el consumo energético. Sin embargo, comparado con las investigaciones realizadas para la producción de PHA's a partir de lactosuero, los tiempos de residencia son mayores que los presentados en la patente y artículos consultados; para la producción de PHA's data entre 36 - 46 horas en procesos *batch* o semicontinuos y en la producción de PLA, data entre 72 – 96 horas en proceso *batch* [41], [42], [43], [44].

Por último, en la etapa de separación de PLA el agua posee afinidad con el ácido poliláctico, lo cual hace compleja la separación de PLA del mismo. Dado que se debe usar más de un agente de separación para obtener el producto final y comparando dichas referencias con las investigaciones consultadas, el PLA presenta una desventaja en la separación, ya que requiere más unidades de proceso y el uso de solventes como acetona, n-pentano y/o éter dietílico en el *downstream* [41], [42], [43], [44].

## 4. BIOPOLÍMEROS OBTENIDOS A PARTIR DE LACTOSUERO

### 4.1 Metodología búsqueda de la información

Para la identificación de aquellos biopolímeros que se pueden obtener a partir de lactosuero se realizó una búsqueda e identificación de diferentes documentos mediante las siguientes palabras: Biopolymers, Cheese Whey, biopolímeros microbianos; utilizando bases de datos tales como, Scopus, ScienceDirect y SpringerLink, teniendo en cuenta el título del artículo, resumen, palabras clave, país y año de publicación.

Excluyendo aquellas publicaciones en las que su año de publicación fuese menor al año 2010. Obteniendo así un total de 12 documentos, los cuales, son consultados y analizados para generar matrices de decisiones que serán determinantes para la definición de las variables de operación del diseño conceptual básico planteado. Los criterios de decisión para la selección de artículos, se basa en aquellos que sean de tipo experimental o que brinden datos relacionados a rendimientos, tiempos de residencia y variables de operación que permitan reducir la incertidumbre en el diseño planteado.

Posteriormente, con los documentos extraídos se organizó en Microsoft Excel una tabla (ver **Tabla 10**) que incluyó los siguientes datos: nombre de los autores firmantes, título de la publicación, tipo de publicación, año de la publicación, revista de publicación, país, Universidad/ instituto, Región/departamento y biopolímero producido. Esta información permitió en un primer momento identificar los países, revistas y autores que más han publicado acerca del tema. En un segundo momento, se pudo identificar y analizar qué tipo de biopolímero se podía obtener a partir de lactosuero.

### 4.2 Poliésteres alifáticos

Los poliésteres alifáticos son la clase de polímeros biodegradable más estudiada debido a que contiene una gran variedad de monómeros [46]. Las reacciones de polimerización que se da en dichos poliésteres son de apertura de anillos que, en su mayoría, se prepara de dicha manera; con el objetivo de aperturas de anillos de

lactonas de seis a siete miembros que conforman los monómeros, obteniendo un peso molecular alto. Las reacciones de condensación, se da cuando se busca un peso molecular bajo [46].

Los poliésteres alifáticos, se pueden clasificar de dos maneras, según la unión de los monómeros constituyentes: los policarbonatos de alquenos y los polihidroxicanoatos. Los policarbonatos de alquenos reaccionan por condensación de dioles y ácidos carboxílicos; los polímeros que los conforman son los polisuccinatos de butileno (PBS) y los polisuccinatos de etileno (PES) [46], [47].

**Tabla 10.**

*Artículos base para la construcción y determinación de biopolímero*

Autores firmantes	Título de publicación	Tipo de publicac	Año de publicación	Revista de publicación	País	Universidad/Instituto	Región/Dpto	Biopolímero producido
R. Rico	Evaluación de un sistema mixto de enzimas para la producción de galactooligosacáridos y ácido glucónico a partir de lactosuero como fuente de lactosa	Tesis de doctorado	2018		Colombia	Universidad Nacional de Colombia	Bogotá	
C. Álvarez	Análisis de la producción de polihidroxibutirato usando lactosuero como materia prima	Tesis de maestría	2015		Colombia	Universidad Nacional de Colombia	Manizales	PHB
B.Chalermthai, A. Giwa, J.Schmidt, <i>et al.</i>	Life cycle assessment of bioplastic production from whey protein obtained from dairy residues	Artículo	2021	Bioresource Technology Reports	United Arab Emirates	Khalifa University of Science and Technology/University of Southern Denmark.	United Arab Emirates	
B. Colombo, T. Sciarra, M. Reis, <i>et al.</i>	Polyhydroxyalkanoates (PHAs) production from fermented cheese whey by using a mixed microbial culture	Artículo	2016	Bioresource Technology	Italia, Portugal	Università degli Studi di Milano/Universidade Nova de Lisboa	Milano, Caparicia	PHAs

**Tabla 10.** Continuación

Autores firmantes	Titulo de publicación	Tipo de publicación	Año de publicación	Revista de publicación	País	Universidad/Instituto	Región/Dpto	Biopolimero producido
J. Pais, J. Núñez, M. Lara, <i>et al.</i>	Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología	Artículo	2017	Bionatura	Ecuador	Universidad Técnica del Norte (UTN)/ Universidad Técnica de Machala/ Universidad Nacional Mayor de San Marcos/, Center for Nanoscience and Nanotechnology (CENCINAT).	Ibarra, Machala, San Marcos, Guayaquil	PHA, PLA, PLC, EPS
A. F. De Gioannis, G. Dessi, P. Isipato, M. Lens, <i>et al.</i>	The dairy biorefinery: Integrating treatment processes for cheese whey valorisation	Artículo	2020	Journal of Environmental Management	Italia, Irlanda	Universidad de Cagliari / Univercidad Nacional de Irlanda / Universidad de Roma "La Sapienza"	Cagliari, Roma, Galway	PLA y PHA
P.Zikmanis, S. Kolesovs, P. Semjonovs	Production of biodegradable microbial polymers from whey	Artículo	2020	Bioresources and Bioprocessing	Letonia	Universidad de Letonia	Riga	PHAs y EPS
M. J. Loayza	Polímeros biodegradables como alternativa para reducir la producción y el consumo de productos elaborados con plástico	Tesis de pregrado	2021		Perú	Universidad Científica del Sur	Lima	PHA, EPS y PLA

**Tabla 10.** Continuación

Autores firmantes	Título de publicación	Tipo de publicación	Año de publicación	Revista de publicación	País	Universidad/Instituto	Región/Dpto	Biopolímero producido
S. A. Sánchez, A. L. Mora, M. A. Marín, S. Yepes	Identification of polyhydroxyalkanoate-producing bacteria in soils contaminated with fique wastes	Artículo	2012	Revista Colombiana de Biotecnología	Colombia	Universidad Nacional de Colombia	Medellín	PHA's
A. M. Khattab, M. E. Esmael, A. A. Farrag, and M. I. A. Ibrahim	Structural assessment of the bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) produced by <i>Bacillus flexus</i> Azu-A2 through cheese whey valorization	Artículo	2021	International Journal of Biological Macromolecules	Egipto	Universidad Al-Azhar	El Cairo	P3HB
A. Martinez	Comportamiento antagónico de <i>Bacillus megaterium</i> (de Bary, 1884) contra hongos in vitro	Tesis de pregrado	2016		México	Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro	Torreón	P3HB, P3HB-co-HV
S. RamKumar Pandian, V. Deepak, K. Kalishwaralal <i>et al.</i>	Optimization and fed-batch production of PHB utilizing dairy waste and sea water as nutrient sources by <i>Bacillus megaterium</i> SRKP-3	Artículo	2010	Bioresour Technology	India/Corea del Sur	Universidad de Kalasalingam/Universidad Nacional de Pusan (PNU)	Krishnankoil/Busan	PHB

**Nota.** La tabla muestra una recopilación de los artículos claves consultados para la elaboración del presente capítulo.

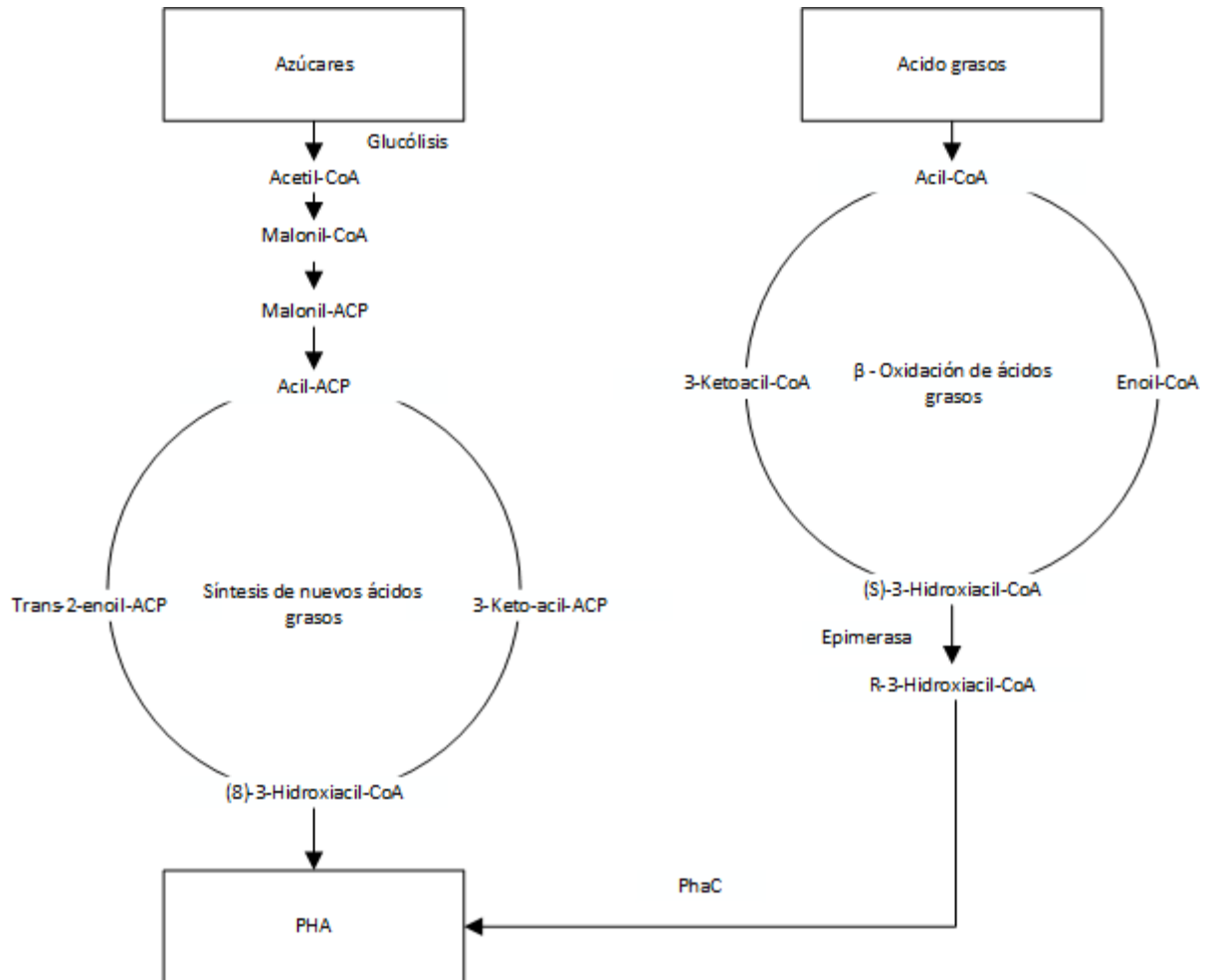




El monómero que conforman los PHA, consta de un grupo carboxilo al final de la secuencia, un éster al inicio de la secuencia polimérica y un radical en el primer carbono terciario, el cual, puede ser hidrógeno o un constituyente del grupo alquilo como se observa en la **Figura 6**.

**Figura 7.**

*Rutas de biosíntesis de PHA*



**Nota.** La figura muestra a grandes rasgos dos rutas para la biosíntesis de PHA. Tomado de: J. Możejko-Ciesielska and R. Kiewisz, "Bacterial polyhydroxyalkanoates: Still fabulous?" *Microbiol. Res.*, vol. 192, no. 2016, pp. 271–282, 2016, doi: 10.1016/j.micres.2016.07.010.

Los PHA son sintetizados por microorganismos y se almacenan como gránulos en el citoplasma en condiciones de estrés. Para su fase de crecimiento, se requiere de un exceso en carbono y nutrientes esenciales como el nitrógeno o fósforo [50].

Los PHA se pueden clasificar según el largo de la cadena polimérica; scl-PHA (PHA de cadena corta) y mcl-PHA (PHA de cadena media). Los scl-PHA constan de 3 a 5 átomos de carbono en su estructura, mientras los mcl-PHA constan de 6 a 14 átomos de carbono en su estructura (son acumulados principalmente por *Pseudomonas sp.*) [50].

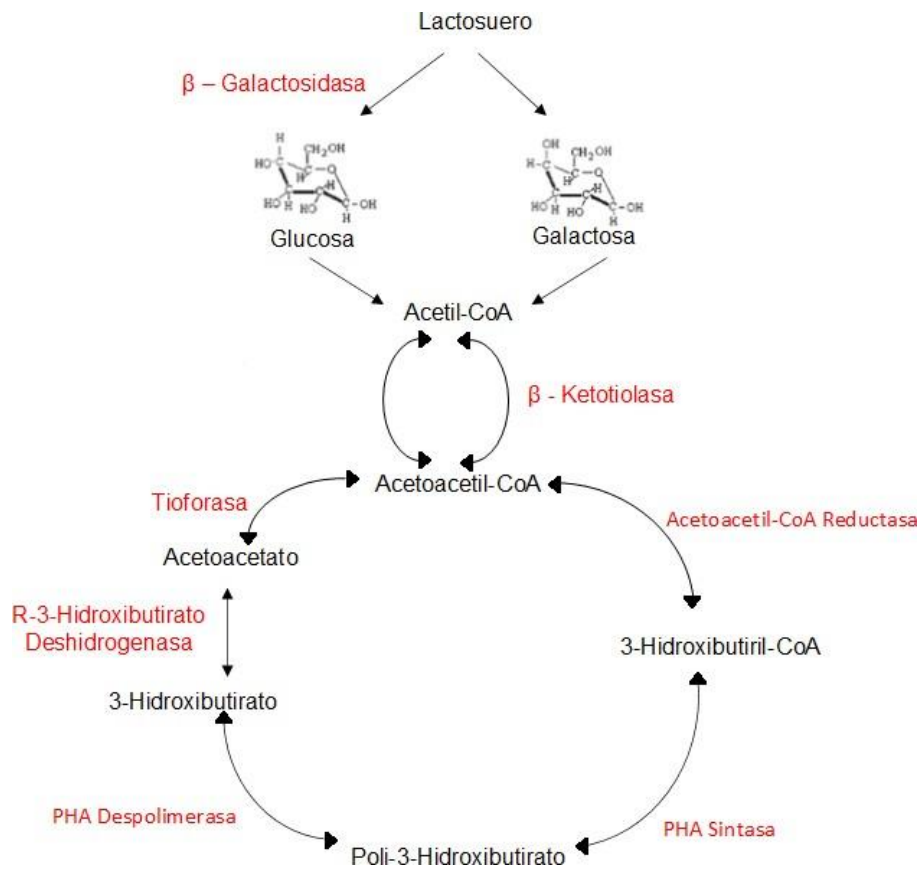
Las rutas de biosíntesis de PHA dependen de la fuente de sustrato requerido por el microorganismo; pueden ser sustratos ricos en azúcares o ácidos grasos; como se observa en la **Figura 7**.

A partir de sustratos mixtos, las bacterias son capaces de producir copolímeros de cadena corta como el P3HBV (poli 3-hidroxi-butirato-co-3-hidroxi-valerato) o el P3HB-co-4HB (poli 3-hidroxi-butirato-co-4-hidroxi-butirato); y de cadena media como el poli (3-hidroxi-hexanoato-co-3-hidroxi-octanoato) (P (3HHx-co-3HO)). Adicionalmente, existen copolímeros que constan de monómeros tanto de cadena corta como media, como el poli(3-hidroxi-butirato-co-3-hidroxi-hexanoato) P (3HB-co-3HHx) [50].

Los PHA también se pueden clasificar según el arreglo estructural de la cadena polimérica; siendo homopolímeros aquellas cadenas que solo las conforman un solo tipo de monómero (es decir, su secuencia no varía). A diferencia de los copolímeros que su estructura la conforman dos o más monómeros y su secuencia puede ser aleatoria. La conformación de homopolímeros o copolímeros del PHA dependen directamente de la disponibilidad de carbono, nitrógeno y fósforo en el sustrato; también depende de la cepa a emplear y las condiciones de estrés durante la fase de crecimiento [37].

**Figura 8.**

*Ruta de biosíntesis de PHA a partir de lactosuero*



**Nota.** La figura representa la ruta de biosíntesis a partir de lactosuero, para formar PHA de tipo slc-Poli(3-hidroxiacetil-CoA). En rojo se encuentran las enzimas involucradas en cada etapa. Adaptado: M. Koller et al., "Potential of various archae- and eubacterial strains as industrial polyhydroxyalkanoate producers from whey," *Macromol. Biosci.*, vol. 7, no. 2, pp. 218–226, 2007, doi: 10.1002/mabi.200600211.

El polihidroxiacetil-CoA (PHB), es un homopolímero (derivado de PHA), cuyas unidades monoméricas están todas en la configuración D (-) debido a la estereoespecificidad<sup>4</sup> de las enzimas involucradas en la biosíntesis [51]. Es un polímero altamente cristalino (55% - 80%), lo cual hace que sea un material excesivamente frágil. La temperatura de

<sup>4</sup> **Estereoespecificidad:** Mecanismo de formación de un único estereoisómero.

transición vítrea y de fusión son 5 y 175 °C, respectivamente [51]. Se usa en gran medida PHB como material en aplicaciones biomédicas, tales como filamentos de suturas, portadores de drogas y generación de constructos para el crecimiento celular debido a que resulta biocompatible [51].

La ruta biológica del lactosuero, comienza con el fraccionamiento de disacáridos en monómeros como la glucosa y galactosa. La enzima encargada de dicho fraccionamiento es la  $\beta$  – galactosidasa, que posteriormente pasa por un proceso de glucolisis; obteniendo como producto Acetil-CoA. La enzima  $\beta$  – cetotilasa se encarga de transformar el Acetil-CoA en Acetoacetil-CoA (proceso de condensación), y posteriormente se reduce al monómero Hidroxiburítol-CoA y finalmente polimeriza a PHB (ver **Figura 8**) [52], [53].

Los polihidroxicanoatos (PHA) son una gran alternativa para reemplazar los plásticos de origen fósil, dado que estos son biodegradables, biocompatibles y pueden producirse biológicamente, además se atribuyen características comparables a los plásticos convencionales. Independientemente de sus características y ventajas ambientales su producción se ve obstaculizada por el alto costo de producción. Como ya se ha mencionado los PHA se obtienen mediante fermentación bacteriana, y uno de los principales costos (40%) asociados con su producción se deriva de la fuente de carbono utilizada para dicha fermentación [54].

Es por ello, que se han realizado diferentes investigaciones que buscan el uso de desechos agro industriales como fuentes de carbono para producir PHA, entre los que se encuentra aguas residuales, desperdicio de alimentos, almidón, aceite de cocina usado, melaza, agua de conserva de tomates, lactosuero, cáscaras de guisantes, entre otros.

El lactosuero siendo uno de los mayores desechos de la industria láctea, se ha convertido en una fuente de carbono viable para la producción de PHA. El lactosuero tiene en su composición mayoritariamente lactosa (4,0 – 5,2%), la responsable de la mayor parte de demanda bioquímica de oxígeno del lactosuero [4]. Es por ello, que el

uso de lactosuero como sustrato podría transformar la producción de PHA en un proceso menos costoso y al mismo tiempo resolver un problema ambiental.

**Tabla 11.**

*Matriz de decisión*

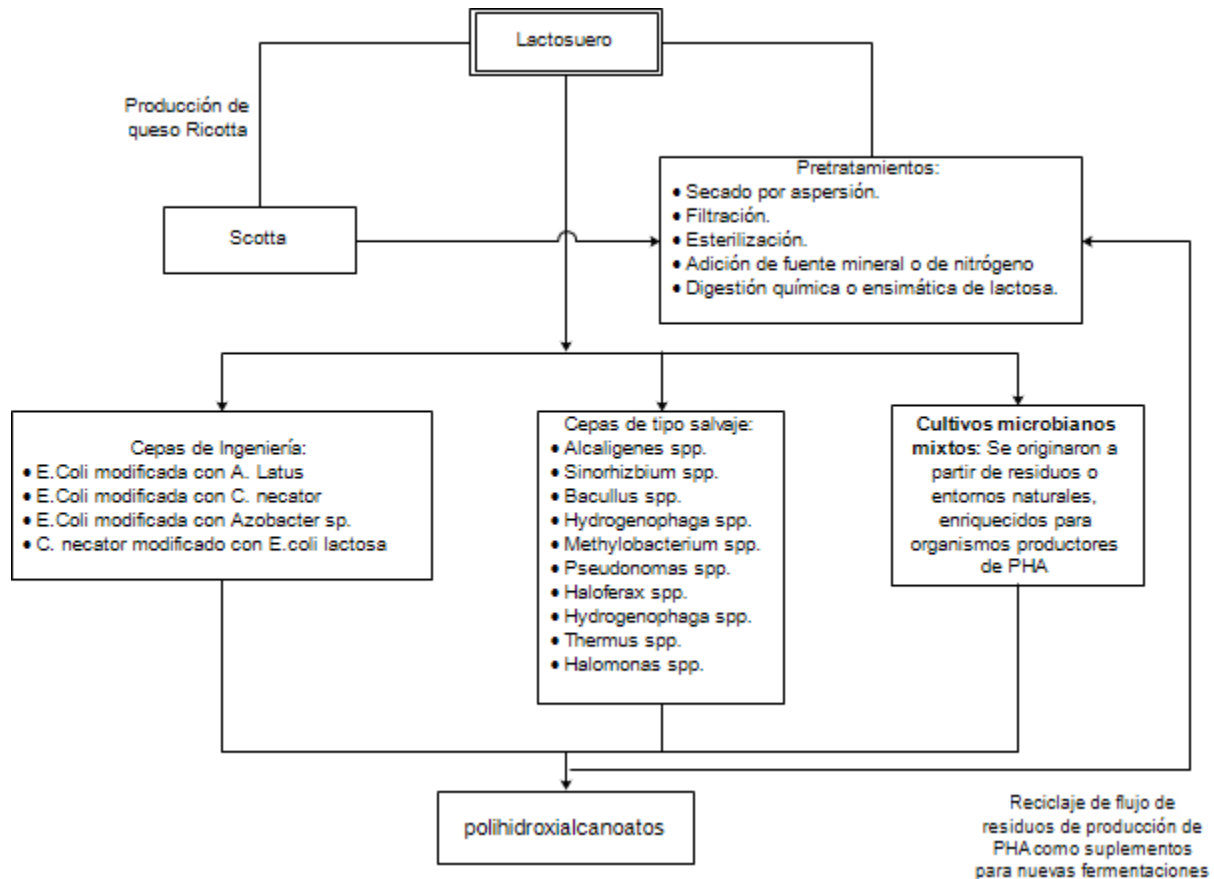
Sustrato	Tipo de cultivo	Microorganismo	Método de cultivo	Tipo de PHA	Rendimiento (g L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Referencia
Permeado de lactosuero en polvo fermentado + aditivos.	MMC.**	Indefinido.	Lote alimentado.	P-3(HB-co-HV).	0,56	[37]
Sobrenadante de lactosuero en polvo + aditivos.	MMC.	Indefinido.	Lote alimentado.	PHB/P-3(HB-co-HV).	0,45	[38]
Lactosuero fermentado en polvo.	Cultivos de ingeniería	<i>Escherichia coli</i> modificada con <i>Azotobacter sp.</i> Genes de biosíntesis de PHA.	Lote alimentado.	PHB.	0,23	[39]
Lactosuero permeado hidrolizado + Aditivos.	MMC.	Indefinido.	Lote alimentado.	P-3(HB-co-HV).	0,68	[40]
Lactosuero.	MMC.	<i>Haloferax Mediterranei.</i>	Lote alimentado.	P-3(HB-co-HV).	0,15	[48]
Lactosuero.	MMC.	<i>Alcaligenes latus.</i>	Lote.	PHB.	0,11	[55]

**Nota.** \*Los valores se refieren a los mejores rendimientos obtenidos para la producción de PHA a partir de suero en cada artículo. Para facilitar la comparación, cuando fue necesario, se realizaron cálculos para llegar a valores en g / L / h. De lo contrario, informamos los valores tal como se presentan en el trabajo citado. \*\*MMC: Cultivo microbiano mixto. Basado en: P. Neubauer *et al.* "Prospects for the Use of Whey for Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production". 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00992>.

Sin embargo, el uso eficiente del lactosuero como fuente de carbono para la producción de PHA todavía se ve obstaculizado por numerosos problemas, incluidos los tratamientos previos al lactosuero y la elección de la cepa productora de PHA [54]. La **Tabla 11** se recopilan diferentes investigaciones sobre el uso de lactosuero para producción de PHA.

**Figura 9.**

*Posibles vías para la producción de PHA a partir de lactosuero*



**Nota.** La figura muestra las posibles vías para la producción de polihidroxicanoatos a partir de lactosuero. Tomado de: T. M. Amaro, D. Rosa, G. Comi, and L. Iacumin, "Prospects for the use of whey for polyhydroxyalkanoate (PHA) production," *Front. Microbiol.*, vol. 10, no. MAY, pp. 1–12, 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.00992.

Existen diversas vías de producción de polihidroxicanoatos a partir del lactosuero como se puede observar en la **Figura 9**. El lactosuero entero se puede utilizar directamente en fermentaciones que producen PHA. Sin embargo, a este se le realiza una serie de pretratamientos con el fin de generar una producción eficiente de PHA; Por ejemplo, en la producción de queso ricotta que se obtiene a partir del lactosuero drenado de la preparación de otros quesos, se genera un subproducto llamado suero de queso ricotta o scotta, que puede utilizarse directamente o después de someterse a pretratamientos para la producción de PHA [54].

La producción de PHA a partir de lactosuero también se puede lograr mediante el uso de organismos que se encuentran en la naturaleza y son capaces de producir PHA a partir de lactosuero o sus derivados. Entre estos microorganismos se encuentran las cepas de tipo salvaje, cepas de ingeniería mejoradas para la producción de PHA o el consumo de lactosuero y cultivos microbianos mixtos (MMC).

Los cultivos MMC se pueden originar a partir de corrientes de desecho o ser extraídos directamente de la naturaleza y pueden enriquecerse en microorganismos productores de PHA, generalmente mediante ciclos de festín y hambruna. Además, durante la producción de PHA, se generan corrientes de desechos que pueden usarse como aditivos para nuevas fermentaciones.

#### 4.4 Aplicaciones de PHA

Gracias al alto peso molecular de los PHA, sus características termoplásticas, sus propiedades físicas y mecánicas, los convierten en grandes candidatos para variedad de aplicaciones en la industria agrícola, la industria biomédica, la industria de los empaques; como plástico para embalaje, bolsas biodegradables y sustituto de plásticos de un solo uso, o como materias primas para la síntesis de químicos enantioméricamente<sup>5</sup> puros y para la producción de pinturas.

En cuanto al P3HB, este es un termoplástico con propiedades similares al polipropileno y se usa principalmente para técnicas de moldeo. En cambio, los copolímeros de P (3HBco3HV), tienen aplicaciones como material de empaque, productos higiénicos, agrícolas y biomédicos [56].

Recientemente, en la industria agrícola, se utiliza un derivado de PHA (P(3-PHB)) para la elaboración de materas biodegradables, tubos de irrigación, empaques para fertilizantes, pesticidas y herbicidas. Una gran ventaja de la aplicación de biopolímeros en esta industria, es que no se requiere un alto grado de purificación del polímero,

---

<sup>5</sup> **Enantiómero:** clase de estereoisómeros tales que en la pareja de compuestos la molécula de uno es imagen especular de la molécula del otro y no son superponibles.



haciendo que los costos de separación y extracción sean menores comparados con los procesos de otras industrias [56], [57], [58].

Los PHA son de alta biocompatibilidad con el tejido humano y estos son reabsorbidos a una baja velocidad, por ende, son usados con mayor frecuencia en la industria biomédica. En cuanto a los medicamentos, los PHA son usados en encapsulamiento de medicamentos, debido a que el material se hidroliza en metabolitos biocompatibles. Últimamente, los PHA son utilizados como material óseo sintético<sup>6</sup> o de fijación para estimular el crecimiento de los huesos [59], [60].

La aplicación más conocida de estos PHA de cadena corta, es en la fabricación de botellas desechables para champú, contenedores para productos alimenticios, bolsas y otros productos desechables como pañales, servilletas, rastrillos, vasos y cubiertos. Adicionalmente, se pueden obtener biopelículas para empaques, debido a sus propiedades similares al polipropileno (PP) [60].

#### **4.5 Biopelículas**

Una biopelícula es un material de envoltura (empaque) que se emplea en los alimentos, debe ser libre de sustancias tóxicas, segura para la salud y sirve para prolongar la vida útil de los alimentos a través del control sobre el desarrollo de microorganismos [61]. Las biopelículas pueden ser producidas a partir de una gran variedad de lípidos, y proteínas; en el caso del lactosuero se debe a su valor proteico.

Las biopelículas presentan diferentes ventajas y exigencias funcionales que permiten controlar las causas de alteración del alimento a recubrir. En cuanto a las exigencias funcionales, estas deben ser libres de tóxicos y seguros para la salud, requieren de una tecnología simple para su elaboración, deben ser protectores de la acción física, química y mecánica, deben ser transparente y dado que presentan propiedades sensoriales esto no debe ser detectado durante su consumo. Por otro lado, las

---

<sup>6</sup> **Óseo sintético:** Una matriz extracelular en forma de pasta, totalmente sintética, que sirve como alternativa para los autoinjertos, aloinjertos y xenoinjertos óseos.

biopelículas prolongan la vida útil de los alimentos a través del control sobre el desarrollo de microorganismos y presentan propiedades de barrera como transparencia de distintas sustancias, adecuada permeabilidad del vapor de agua, solutos y una permeabilidad selectiva a gases y volátiles, desde el alimento hacia el exterior y viceversa.

#### **4.6 Microorganismos que producen biopolímeros a partir de lactosuero como sustrato**

El lactosuero es un medio adecuado para el crecimiento microbiano. Sin embargo, se ha demostrado que encontrar microorganismos que produzcan PHA de manera eficiente cuando se cultivan en lactosuero es un gran desafío. Según investigaciones se ha demostrado que algunas de las mejores especies microbianas productoras de PHA no pueden producir PHA directamente a partir de lactosuero. Es por ello que se han venido buscando microorganismos capaces de producir PHA a partir de lactosuero.

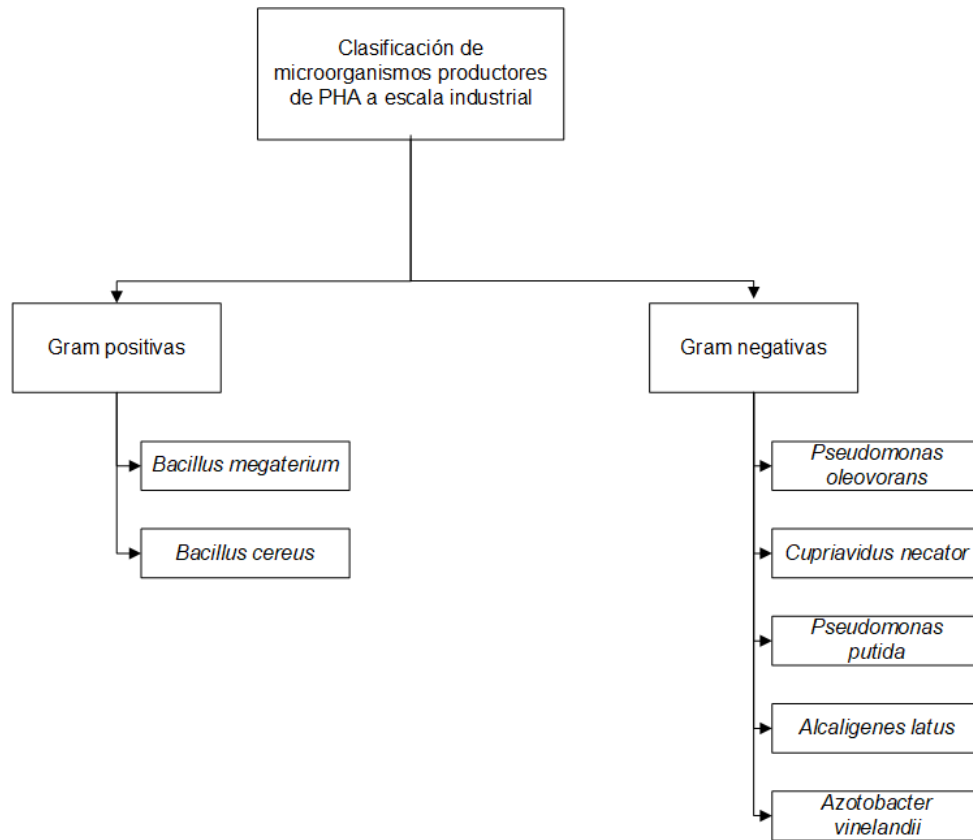
Los polihidroxialcanoatos son biopolímeros sintetizados por algunas bacterias, que los acumulan como reservas de carbono en forma de inclusiones citoplasmáticas. Según el estudio realizado por Cardona *et al.* [62] en la identificación molecular de bacterias productoras de PHA en subproductos lácteos y caña de azúcar, los lactosueros presentan una gran diversidad de morfotipos bacterianos<sup>7</sup> productores de PHAs, debido a la riqueza nutricional que este posee, siendo identificadas en este sustrato las bacterias *Lactococcus lactis*, *Klebsiella sp.*, *Enterobacter sp.* y *Pseudomonas sp.*

---

<sup>7</sup>**Morfotipos bacterianos:** Clasificación de las bacterias según su morfología.

**Figura 10.**

*Clasificación de microorganismos productores a escala industrial*



**Nota.** La figura muestra la clasificación de algunas bacterias de interés industrial. Basado en: S. A. Sánchez, A. L. Mora, M. A. Marín Montoya, and M. del S. Yepes, “Identification of polyhydroxyalkanoate-producing bacteria in soils contaminated with fique wastes,” *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 14, no. 2, pp. 89–100, 2012.

Además, autores como Koller *et. al* [63] confirman la utilidad de dichas bacterias para transformar lactosueros en PHAs, incluyendo *E. Coli*, *Hydrogenophaga psedoflava*, *Azotobacter sp.*, *Lactobacillus sp.*, *C. necator*, *Haloferax mediterranei* y *P. hydrogenovora*. El estudio realizado por Berwing *et al.* [55] demostró que, la bacteria *Alcaligenes latus*, es capaz de convertir lactosa en PHA con un rendimiento de 0,11 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>.

Otra opción extremadamente valiosa para la producción de PHAs a partir de lactosuero es mediante el uso de cultivos microbianos mixtos (MMC) en lugar de cepas

microbianas únicas [64]. Los MMC son una gran opción dado que no requieren condiciones estériles y pueden adaptarse a diferentes sustratos. Sin embargo, a pesar de esta flexibilidad, el uso de una comunidad microbiana desconocida para producir PHA plantea preguntas sobre la eficiencia de producción, la consistencia de las características del polímero y la biocompatibilidad cuando estos van a ser usados en aplicaciones médicas [54].

#### **4.6.1 *Haloferax mediterrani***

*Haloferax mediterrani*, es una cepa de tipo salvaje, extremadamente halófila que pertenece a la familia *Halobacteriaceae*, en el dominio *Archaea*. Fue aislada por primera vez de estanques de evaporación de sal cerca de Alicante, España [40]. Esta cepa se ha utilizado en diferentes estudios, dado que crece más rápido que la mayoría de los otros miembros, tiene excelente estabilidad genética, amplio espectro de sustratos, además tiene una elevada eficiencia metabólica y estabilidad del genoma a altas concentraciones de solución salina [65].

Este microorganismo es de carácter extremófilo, dado que requiere un alto aproximadamente una concentración de cloruro de sodio (NaCl) superior al 22%, p/v, para un crecimiento celular óptimo [40]. Esta característica se convierte en una gran ventaja para múltiples aplicaciones dado que permite el cultivo exclusivo de esta cepa incluso en condiciones no estériles sin poner en peligro el lote de fermentación por contaminación microbiana.

Entre las aplicaciones, *Haloferax mediterrani* ha sido investigado como productor de polihidroxicanoatos (PHA). En los primeros estudios se reportó que producía poli (3-hidroxi-butirato), P(3HB), pero estudios recientes han demostrado que acumula el copolímero poli (3-hidroxi-butirato-co-3-hidroxi-valerato), P(3HB-co-3HV) [40].

Como ya se ha venido mencionando el costo más alto en la producción de biopolímeros son los sustratos, es por ello, que para la producción de P (3HB-co-3HV) a partir de *Haloferax mediterrani* se han investigado diferentes fuentes de carbono de

bajo costo como sustratos alternativos, incluido la glucosa, el almidón, salvado de trigo, salvado de arroz, glicerol, vinazo y lactosuero.

**Tabla 12.**

*Caracterización Haloferax mediterrani*

<b>Característica.</b>	<b><i>Haloferax mediterrani.</i></b>
Tinción de Gram	+
Morfología celular	Plano pleomórfico
Tipo de microorganismo	Arquea
Esporas	+
Motilidad*	+
Tipo de microorganismo (dependiente de T)	Mesófilo
Temperatura óptima de crecimiento	47°C
Oxidasa	-
Catalasa	+
Halófilo	+
<b>Utilización de</b>	
Sales	+
Minerales	+
<b>Producción de</b>	
Amilasas	+
Hidrolasas	+
Xilosa	-
Sorbitol	-
PHB	+

**Nota.** \*Es un término de la biología para expresar la habilidad de moverse espontánea e independientemente. Basado en: A. Oren & J. E. Hallsworth "Microbial weeds in hypersaline habitats: the enigma of the weed-like *Haloferax mediterranei*" FEMS Microbiology Letters, Volume 359, Issue 2, 2014, p 134–142, <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12571>.

Debido a que este microorganismo requiere altas concentraciones de sal para su crecimiento, los costos de producción de biopolímeros disminuyen dado que no se requiere condiciones estériles estrictas y una ventaja adicional de la producción de

PHA por arqueas halófilas es la facilidad de recuperación del polímero por choque hipo osmótico de las células después de disminuir la salinidad del medio externo.

Por lo tanto, el procesamiento posterior, que generalmente implica la rotura de la membrana celular, la separación del polímero de los desechos celulares y, finalmente, la purificación del polímero, se simplifica significativamente, contribuyendo así a la reducción de los costos totales de producción.

#### **4.6.2 *Pseudomonas putida***

Las *Pseudomonas putida* son bacilos Gram negativos, pertenecientes a la clase de las gamma proteobacterias<sup>8</sup>. Es una de las especies de mayor interés industrial entre las bacterias del género *Pseudomonas*, debido a su potencial de degradación de compuestos aromáticos y xenobióticos presenta la capacidad de colonizar el sistema radicular\* de las plantas, formar biopelículas y bioplásticos y ser manejable desde el punto de vista genético. Adicionalmente, es un microorganismo no patógeno, capaz de vivir en suelos (en la rizosfera<sup>9</sup>) y en aguas dulces [66].

Las *Pseudomonas putida* poseen una gran versatilidad genómica, debido a su expresión heteróloga de actividades y/o rutas metabólicas procedentes de otros microorganismos. Además, ha sido de gran utilidad en el diseño experimental de nuevas rutas metabólicas para el catabolismo de contaminantes orgánicos, en particular de tipo aromático, con aplicaciones en el campo de la biorremediación<sup>10</sup>, herramienta biotecnológica para la producción de compuestos de alto valor añadido como los PHAs, enzimas de interés comercial, epóxidos, derivados de catecoles y compuestos heterocíclicos [66].

---

<sup>8</sup> **Proteobacterias:** Son uno de los principales filos de bacterias e incluyen una gran variedad de patógenos.

<sup>9</sup> **Rizosfera:** Interfaz entre las raíces de las plantas y el suelo.

<sup>10</sup> **Biorremediación:** Biorremediación se llama a cualquier proceso biotecnológico que utiliza microorganismos, hongos, entre otros, para recuperar un ambiente alterado por contaminantes a su condición natural.

**Tabla 13.***Caracterización Pseudomonas putida*

<b>Característica.</b>	<b><i>Pseudomonas putida.</i></b>
Tinción de Gram	-
Morfología celular	Bacilo (bastón o curvo)
Morfología colonial	Redonda, lisa y en general son translucidas e incoloras (a excepción en condiciones de estrés)
Esporas	-
Motilidad*	+
Tipo de microorganismo (dependiente de T)	Mesófilo
Temperatura óptima de crecimiento	27°C (47°C en condiciones de estrés)
Oxidasa	+
Catalasa	+
Patógeno	+

**Nota.** \*Es un término de la biología para expresar la habilidad de moverse espontanea e independientemente. Basado en: L. Molina et al., "Antibiotic resistance determinants in a *Pseudomonas putida* strain isolated from a hospital," PLoS One, vol. 9, no. 1, (2014), doi: 10.1371/journal.pone.0081604.

#### **4.6.3 *Bacillus megaterium***

La cepa *Bacillus megaterium* es uno de los microorganismos capaces de producir PHB. El *Bacillus megaterium* es una bacteria Gram positiva, inmóvil, formadora de esporas, aeróbica estricta e hidroliza la caseína; se encuentran en muchos sitios en la naturaleza, comúnmente en sitios apícolas (debido al alto contenido de miel), cascarilla de arroz, en agua de mar y sus sedimentos [53]. La cepa sintetiza ácidos por fermentación; a partir de glucosa, fructosa, trehalosa, glicerol, manitol, sorbitol y D – arabitol (ver **Tabla 14**).

**Tabla 14.***Caracterización Bacillus megaterium*

<b>Característica.</b>	<b><i>Bacillus megaterium.</i></b>
Tinción de Gram	+
Morfología celular	Bacilo
Morfología colonial	Redonda, lisa y blanca
Esporas	+
Motilidad*	+
Tipo de microorganismo (dependiente de T)	Mesófilo
Temperatura óptima de crecimiento	37°C
Oxidasa	-
Catalasa	+
<b>Utilización de</b>	
Manitol	+
Maltosa	+
Glucosa	+
Citrato	+
Butirato	+
Lactato	+
<b>Producción de ácido de</b>	
Glucosa	+
Manitol	+
Xilosa	+
Sorbitol	+
Descarboxilación de ornitina	-
Descarboxilación de lisina	-
Reducción de nitratos	+
<b>Hidrólisis de</b>	
Caseína	+
Almidón	-
Gelatina	+
Esculina	+

**Nota.** \*Es un término de la biología para expresar la habilidad de moverse espontanea e independientemente. Tomado de: A. Martínez, "Comportamiento antagónico de *Bacillus megaterium* (de Bary, 1884) contra hongos in vitro," 2016.

La cepa, ha sido utilizada a lo largo de los años en la industria, debido a su versatilidad de crecer en medios simples y económicos; es usada para la producción de enzimas, amilasas, penicilina amidasa (enzimas generadoras de penicilinas semisintéticas) y vitamina B12 [67].



Existen muchas investigaciones alrededor de la bacteria *Bacillus megaterium* en producción de PHA; Según Rodríguez [68], los microorganismos *Bacillus megaterium* uyuni S29 con genes variados, mostraron una producción de PHB entre un 30% a un 70% de biomasa seca, significa entre un 0,45 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> y 0,65 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> de concentración de PHB.

Según Sánchez *et al.* [37], se utiliza *Bacillus megaterium* como bacteria productora de PHA, usando como sustrato jugo de fique en el municipio de Guarne, Antioquía; llegando a un rendimiento entre 63,8 mg/g y 95,3 mg/g de PHB. El aislamiento se realiza a partir de diluciones seriadas del suelo del sector, posteriormente se utiliza como medio una combinación de sales minerales no especificadas y glucosa como fuente de carbono.

#### 4.7 Elaboración de la matriz de decisión

Para la elaboración de la matriz de decisión, se tienen en cuenta aspectos como; rendimiento en base al sustrato (lactosuero), economía del medio de crecimiento, disponibilidad del microorganismo, aplicaciones en la industria.

**Tabla 15.**

*Matriz de decisión microorganismo productor de PHB*

<b>Factores.</b>	<b><i>Bacillus megaterium.</i></b>	<b><i>Haloferax mediterrani.</i></b>	<b><i>Pseudomonas puteri.</i></b>
Rendimiento en base al sustrato.	5	3	4
Economía del medio de crecimiento	3	5	4
Disponibilidad del microorganismo	5	2	3
Aplicaciones en la industria.	5	3	5
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>13</b>	<b>16</b>

**Nota.** La valoración cuantitativa se toma en una escala de uno a cinco, donde el número cinco corresponde a la valoración más alta y el número uno corresponde a la valoración más baja.

## 4.8 Condiciones de operación del microorganismo

Como se puede observar en la **Tabla 15**, el mejor microorganismo para el desarrollo de PHB a partir de lactosuero es el *Bacillus megaterium*. A continuación, se hará una caracterización del microorganismo y se mencionarán las condiciones de operación óptimas reportadas en la literatura tales como pH, temperatura, concentración de sustrato, porcentaje de inóculo, el tipo y concentración de fuente de carbono, que permiten obtener los mejores rendimientos para el desarrollo de PHB usando como sustrato lactosuero.

### 4.8.1 Sustrato en la producción de PHB

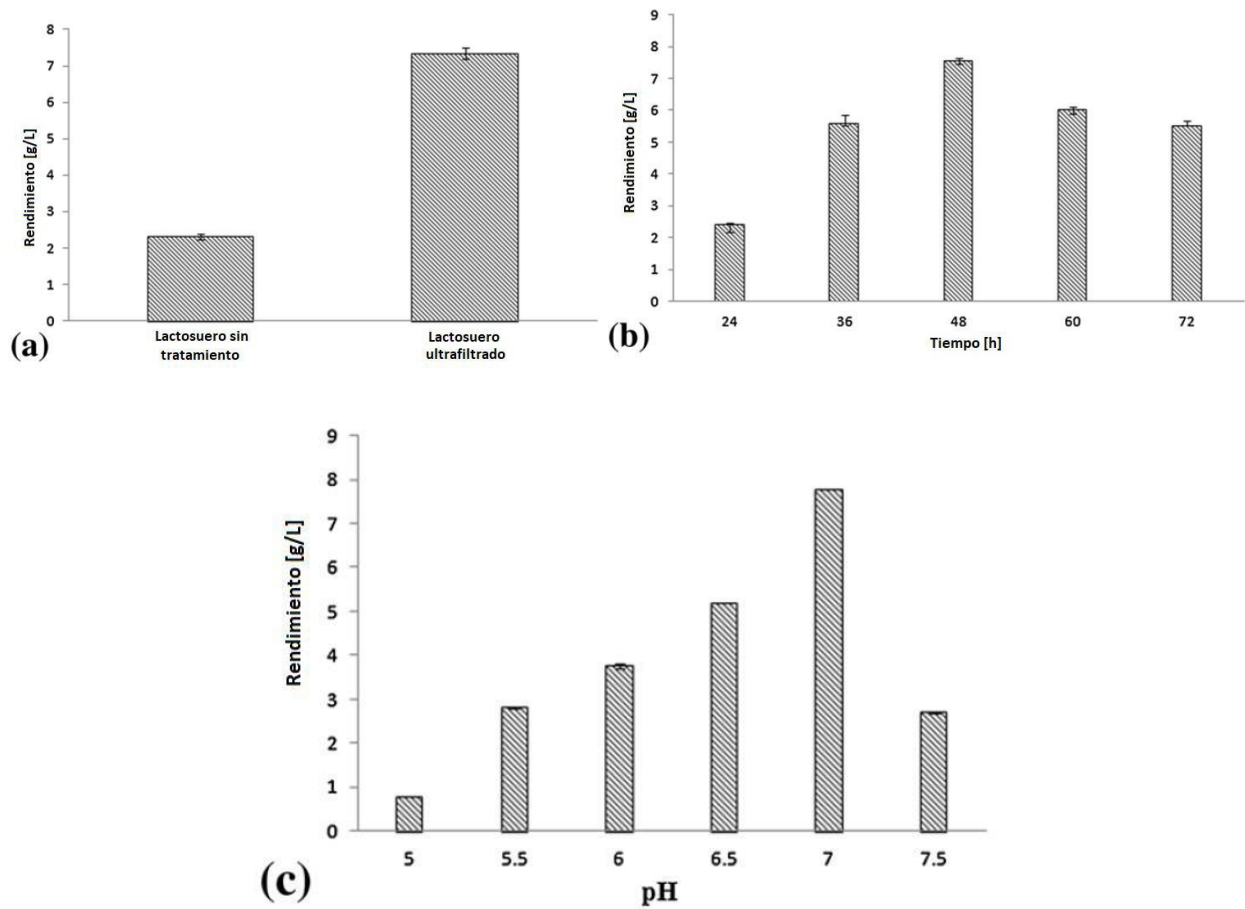
Varios estudios se han centrado en la utilización de lactosuero como sustrato, sin embargo, se plantea su uso como lactosuero entero, lactosuero filtrado o con algún tratamiento previo. Según el estudio realizado por S. Das *et al.* [45] El lactosuero ultra filtrado genero un rendimiento de PHB de 7,34 g/L, superior al suero crudo, que genero un rendimiento de PHB de 2,31 g/L.

Otros autores como C. Álvarez [69] confirman que para producir PHB a partir de lactosuero este debe pasar por un pre tratamiento para lo cual proponen dos tipos: uno básico que incluye procesos físicos y químicos para lograr la precipitación de proteínas en el que obtienen una acumulación de PHB del 1%. EL segundo pre tratamiento es un proceso de ultrafiltración que permite remover la mayor cantidad de proteínas posibles obteniendo un porcentaje de acumulación de PHB de 3%.

Como se puede observar en la (**Figura 11-a**) y como lo confirman autores como S. Das *et al.* y C. Álvarez, el aumento en la concentración de PHB, después del pre tratamiento del lactosuero se debe a la eliminación de algunas proteínas que redujeron la concentración de nitrógeno propio del medio y facilito la acumulación de PHB. Teóricamente, la producción de PHB se vuelve alta cuando el carbono es un exceso en comparación con el nitrógeno. Por lo tanto, se recomienda el uso de lactosuero filtrado o ultrafiltrado.

**Figura 11.**

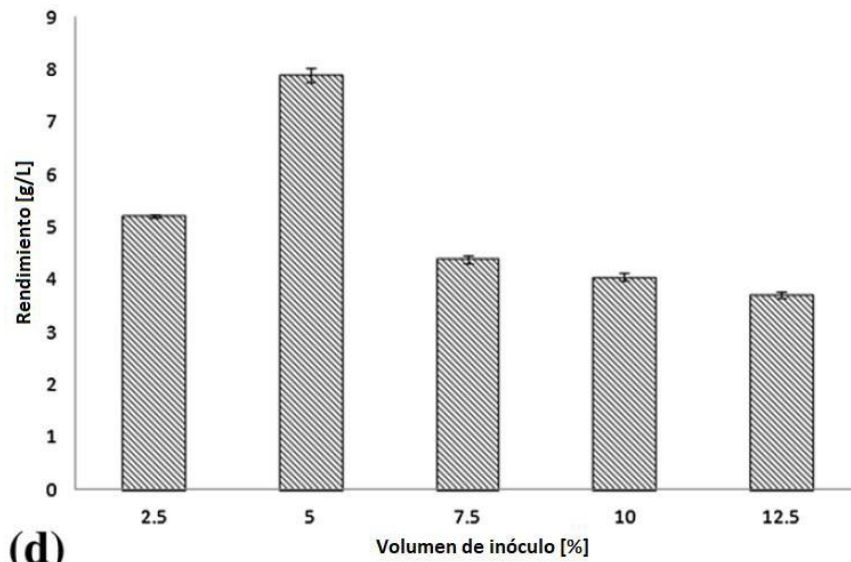
*Análisis de factores en la producción de PHB*



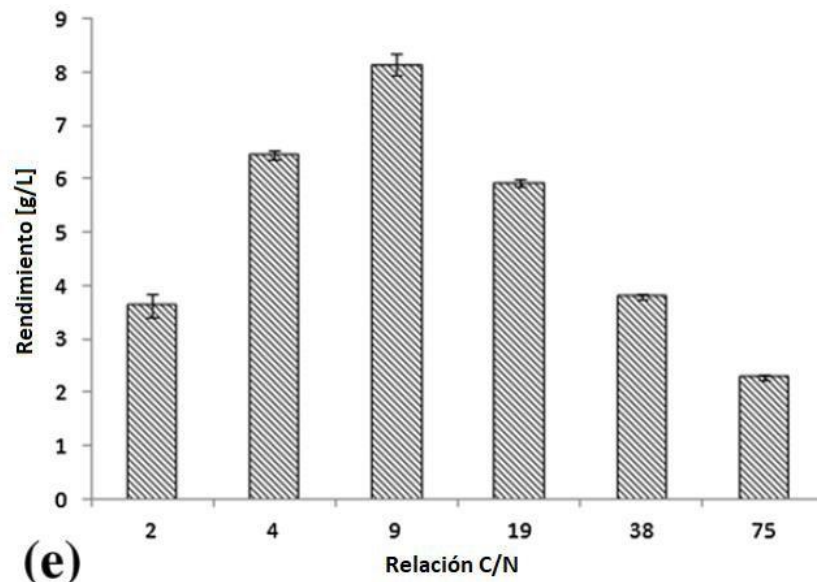
**Nota.** La figura muestra el análisis de los diferentes parámetros involucrados en la producción de PHB con respecto a **(a)** Sustrato, **(b)** tiempo (h); **(c)** pH. Tomado de: S. Das, A. Majumder, V. Shukla, P. Suhazsini, and P. Radha, "Biosynthesis of Poly(3-hydroxybutyrate) from Cheese Whey by *Bacillus megaterium* NCIM 5472," J. Polym. Environ., vol. 26, no. 11, pp. 4176–4187, 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1288-2.

**Figura 12.**

*Análisis de factores en la producción de PHB (continuación)*



**(d)**



**(e)**

**Nota.** La figura muestra el análisis de los diferentes parámetros involucrados en la producción de PHB con respecto a **d)** tamaño de inóculo; **(e)** Relación C/N. Tomado de: S. Das, A. Majumder, V. Shukla, P. Suhazsini, and P. Radha, "Biosynthesis of Poly(3-hydroxybutyrate) from Cheese Whey by *Bacillus megaterium* NCIM 5472," J. Polym. Environ., vol. 26, no. 11, pp. 4176–4187, 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1288-2.

#### 4.8.2 Disolución del sustrato

En el estudio realizado por S. Das *et al.* [45] se variaron las diluciones desde 10:90 (suero: agua) hasta una concentración total de sustrato del 100%, para lo cual se obtuvo que a una concentración de 100% sustrato se presentó un rendimiento de (8,10 g/L) de PHB, sin embargo, el PHB extraído a una concentración de 90% sustrato fue muy parecido al de 100% siendo (7,75%).

Para definir que disolución era la mejor para el proceso, midieron la concentración de lactosa antes de la inoculación y la lactosa residual. Como se puede observar en la **Tabla 16**, la utilización de lactosa aumenta progresivamente, pero a una concentración del 100% sustrato, esta disminuye.

**Tabla 16.**

*Porcentaje de utilización de lactosa a diferentes diluciones*

Dilución (Lactosuero: agua)	Concentración de lactosa [g/L]	Lactosa residual [g/L]	Porcentaje de lactosa usada [%]
10:90	0,55	0,3	45,45
20:80	1,05	0,46	56,19
30:70	1,98	0,83	58,08
40:60	3,08	1,23	60,06
50:50	3,98	1,55	62,31
60:40	4,64	1,69	63,54
70:30	5,89	2,06	64,02
80:20	7,61	2,58	66,09
90:10	9,15	2,92	68,08
100	10,96	4,93	55,01

**Nota.** La tabla muestra los diferentes porcentajes consumidos de lactosa a diferentes diluciones (suero:agua). Tomado de: S. Das, A. Majumder, V. Shukla, P. Suhazsini, and P. Radha, "Biosynthesis of Poly(3-hydroxybutyrate) from Cheese Whey by *Bacillus megaterium* NCIM 5472," J. Polym. Environ., vol. 26, no. 11, pp. 4176–4187, 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1288-2.

Esto lo confirma el estudio realizado por S. Obruca *et al.* [70] en el que optimizan la dilución del lactosuero para lograr la máxima producción, confirmando que es un parámetro crucial tanto para la biomasa como para la producción de PHB. Se pudo evidenciar que a una concentración del 100% lactosuero este posee una alta

concentración de sales y lactosa que causan una alta presión osmótica y por ende, inhibe el crecimiento bacteriano y la biosíntesis de PHB. Por lo tanto, la concentración más óptima de la disolución de sustrato es 90% lactosuero y 10% agua.

#### **4.8.3 Tiempo**

La acumulación de PHB mediante *Bacillus megaterium* comienza después de las 12 horas de incubación hasta las 48 horas como se puede observar en la **Figura 11-b**, dado que después de este tiempo se presenta una disminución en la producción de PHB, lo que puede deberse a la falta de macronutrientes o a la disminución de la fuente de carbono disponible en el medio, causando un efecto adverso en la producción de PHB [45].

Se observa un perfil similar en el estudio realizado por S. Obruca *et al.* [70] donde la acumulación de PHB comienza a partir de las 10 horas y los rendimientos más altos de producción se observaron entre las 40 y 50 horas de cultivo, como se puede observar en la **Figura 14**. Por otro lado, autores como G. Sathiyana *et al.* [71] se pudo observar que el microorganismo *Bacillus megaterium* comenzó a producir PHB a partir de las 12 horas y alcanzó una productividad máxima a las 48 horas. Por tanto, se define el tiempo óptimo para la producción de PHB de 48 horas [45] basados en el estudio de optimización.

#### **4.8.4 pH**

Según el estudio realizado por S. Das *et al.* [45], se observó que la producción de PHB aumenta gradualmente hasta un pH de 7.0 y luego se deduce drásticamente cuando el pH se incrementa, como se puede observar en la **Figura 11-c**. Además, autores como S. Ramkumar *et al.* [53] en la optimización y producción de PHB utilizando lactosuero, salvado de arroz y agua de mar como fuentes de nutrientes mediante *Bacillus megaterium*, evaluaron el efecto del pH en el rendimiento de PHB, concluyendo que a un pH de 7 y 8 se obtienen los mejores rendimientos de producción.

La disminución en la producción de PHB a pH más elevados, puede deberse al efecto de enzimas degradantes sobre el biopolímero, esto lo confirman otros autores en los que el pH vario de 7,0 a 8 [38], [45]. Lo que permite concluir que la producción máxima de PHB se obtiene a un pH de 7.0.

#### **4.8.5 Tamaño de inóculo**

El tamaño de inóculo óptimo reportado por S. Ramkumar *et al.* [53], corresponde al 5% de volumen del medio, dato que confirman autores como S. Das *et al.* [45], donde variaron el tamaño del inóculo de 2,5 a 12,5% (v/v) y como se puede observar en la **Figura 12-d** la producción más alta de PHB se obtiene con un inóculo del 5% más allá de este porcentaje la producción disminuye. Esta disminución puede deberse al aumento de la competencia entre los organismos. Por lo cual, el tamaño óptimo del inóculo es 5% (v/v).

#### **4.8.6 Relación C/N**

Como ya se ha mencionado anteriormente, la producción de PHB se vuelve alta cuando el carbono es un exceso en comparación con el nitrógeno. S. Das *et al.* [45] Reporta que la relación optima de C/N es de 9, esto se debe a que a una relación de más allá de 9 ocurre una rápida absorción de carbono en presencia de una concentración excesiva de nitrógeno cambiando así el estado fisiológico de la célula que imita la fase logarítmica en lugar de la fase estacionaria, lo que desfavorece la producción de PHB.

#### **4.8.7 Cinética de crecimiento celular**

En la **Figura 13** se puede observar la curva de crecimiento celular, en la que se evidencia que la fase logarítmica o exponencial comenzó a la quinta hora y finalizó a la hora 24 y ya para la hora 25 las células alcanzaron la fase estacionaria. En esta fase el crecimiento se ralentiza debido al agotamiento de los nutrientes esenciales y al efecto de inhibición debido a los metabolitos. El número de nuevas células generadas es limitado y la tasa de crecimiento celular coincide con la de la muerte celular [45].

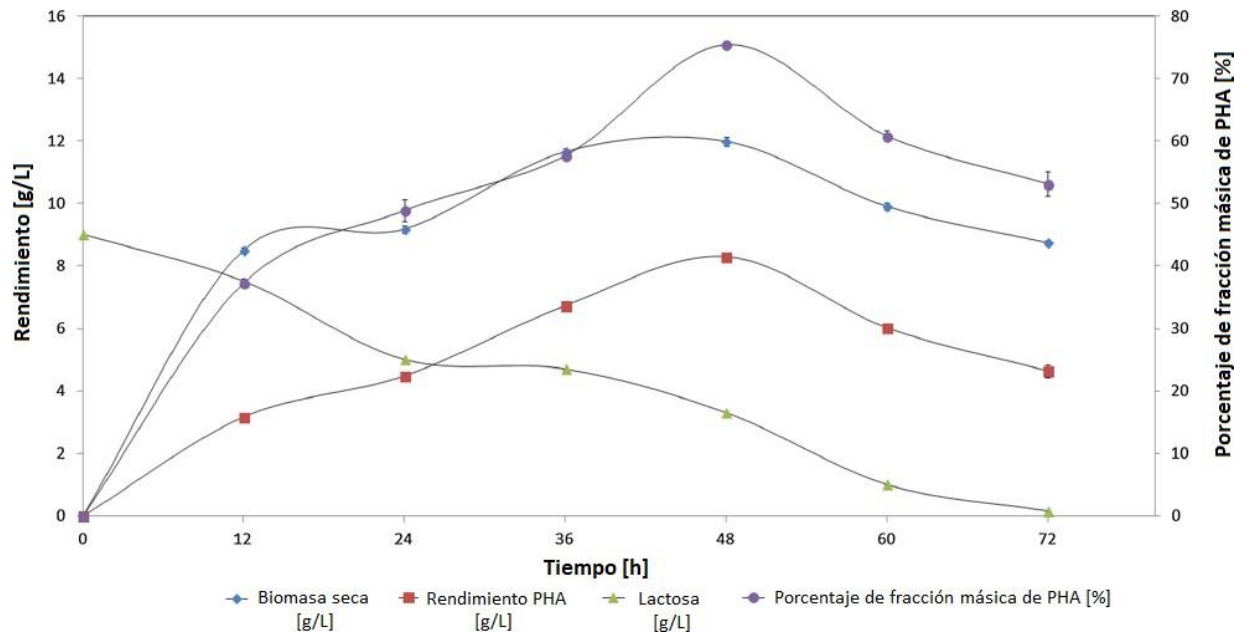
Además, se puede observar que la absorción de lactosa ocurrió durante la fase exponencial del crecimiento de las células microbianas, después disminuye gradualmente. La producción y acumulación de PHB aumenta lentamente hasta la hora 36, después de esta hora ocurre un fuerte aumento. Luego a las 48 horas se logra la mayor concentración de PHB junto con el mayor porcentaje de acumulación. Después de la hora 48 la producción y acumulación disminuye, probablemente porque se agotan las fuentes de carbono disponibles pasando así a la fase de muerte.

Por otro lado, en la **Figura 14** se muestra la cinética de crecimiento celular encontrada en el artículo “Producción de polihidroxicanoatos a partir de suero de queso empleando *Bacillus megaterium* CCM 2037” realizado por los autores S. Obruca *et al.* [70], en la que se puede evidenciar que el crecimiento celular estuvo acompañado por la utilización de lactosa durante todo el cultivo, la formación de biomasa alcanzó un máximo a la hora 28 y a partir de esta hora se produjo la fase estacionaria. La fase estacionaria duró hasta la hora 50, a partir de este momento se puede evidenciar que la concentración de biomasa comenzó a disminuir y por ende la producción de PHB.



**Figura 13.**

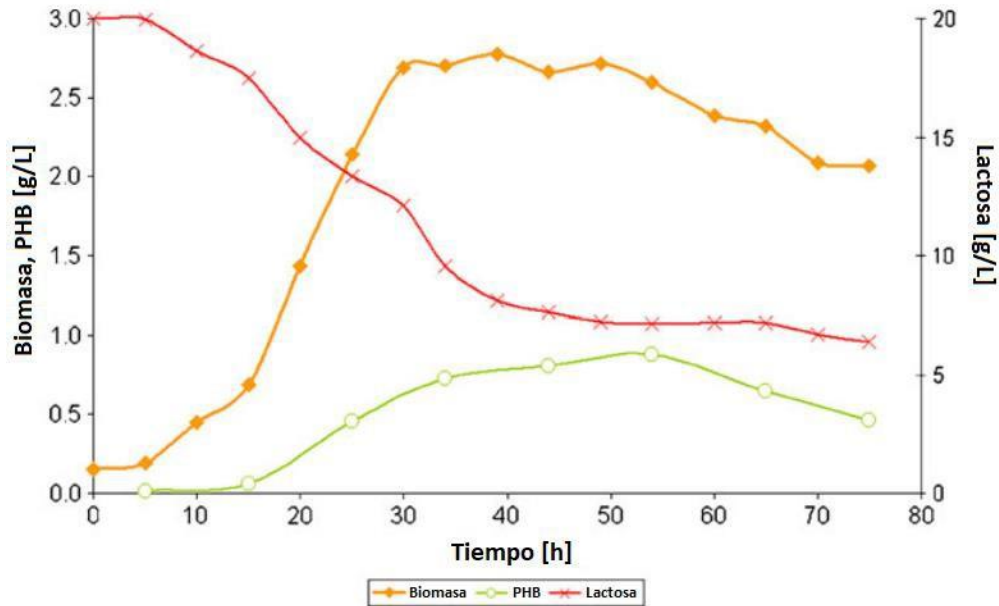
*Cinética de crecimiento Bacillus megaterium proceso optimizado*



**Nota.** En la figura se puede observar el perfil de concentración para el crecimiento celular, la utilización de sustrato, la producción de PHB y la fracción de masa de PHB en biomasa a condiciones optimizadas. Tomado de: S. Das et al, "Biosynthesis of Poly(3-hydroxybutyrate) from cheese Whey by *Bacillus megaterium* NCIM 5472," J. Polym Environ., vol.26, no 11, doi: 1007/s10924-018-1288-2.

**Figura 14.**

*Características de crecimiento y producción de Bacillus en lactosuero*



**Nota.** En la figura se puede observar la concentración de biomasa, la producción de PHB y la utilización de lactosa. Tomado de: S. Obruca, I. Marova, S. Melusova, and L. Mravcova, "Production of polyhydroxyalkanoates from cheese whey employing *Bacillus megaterium* CCM 2037," *Ann. Microbiol.*, vol. 61, no. 4, pp. 947–953, 2011, doi: 10.1007/s13213-011-0218-5. [Accedido: Nov 27, 2021]

Es importante mencionar que entre la **Figura 13** y la **Figura 14** existen diferencias en el tiempo que empieza y finaliza el crecimiento celular muy pequeño, esto puede deberse a que en el estudio realizado por S. Das *et al*, se plantea el uso de únicamente lactosuero como sustrato, a diferencia del estudio realizado por S. Obruca *et al.*, en el que el lactosuero fue optimizado agregando pequeñas cantidades de sales.

## 5. DISEÑO CONCEPTUAL BÁSICO

En general, un modelo de diseño es la forma de representación del proceso que desarrolla el diseñador en su labor. Estos se clasifican en dos grupos: Descriptivos y prescriptivos. Los modelos descriptivos muestran la secuencia de actividades que ocurren en diseño, dentro de los cuales se encuentra el modelo básico y el modelo French. Por otro lado, los modelos prescriptivos, son aquellos que prescriben un patrón de actividades de diseño [72].

Entre los modelos descriptivos de diseño, se encuentra el modelo lineal, mediante el cual se identifican las fases de diseño que son comúnmente aceptadas por la mayoría de investigadores, entre las que se encuentra la fase 1 (diseño conceptual), fase 2 (diseño preliminar) y fase 3 (diseño detallado) [72].

Para el desarrollo del proceso, nos centraremos en la fase 1 del modelo presentado, siendo esta el diseño conceptual, para lo cual, se hará una descripción detallada del proceso; dando a conocer las principales condiciones del mismo. Posteriormente, se plantea un diagrama general y de bloques del proceso, que permiten dar a conocer los principales equipos y corrientes con sus respectivos flujos de materia. Finalmente, se presentarán los equipos seleccionados para el proceso.

### 5.1 Descripción del proceso de producción

El proceso de producción de PHB a partir de *Bacillus megaterium* usando como sustrato lactosuero, se divide en diferentes etapas: Tratamiento de sustrato, tratamiento medio de cultivo, tren de inóculo, fermentación y extracción de PHB.

Para un correcto desarrollo del proceso, se toma una base de cálculo teniendo en cuenta la siguiente información: En el municipio de Villa de San Diego de Ubaté, se producen al día 503.000 litros de leche, de los cuales el 18% son destinados a la producción de quesos (90.648 litros/día). El lactosuero generado en la producción de

quesos, representa cerca del 85% al 90% del volumen de la leche destinada para tal fin (76.959 litros/día y 81.486 litros/día respectivamente).

Para el desarrollo del proceso, se toma la media aritmética de la cantidad que se produce al día (79.222,5 litros/día). Se toma como base de cálculo el 1% de la producción diaria de lactosuero en las zonas antes nombradas (792,23 litros/día), para el diseño conceptual básico del proceso de producción de PHA, a partir de *Bacillus megaterium*.

### **5.1.1 Tratamiento de sustrato**

Para la utilización de lactosuero en los procesos de producción de PHB, este debe haber pasado por un pretratamiento: que consta de una centrifugación y un tratamiento mediante un proceso de ultrafiltración.

**Centrifugación:** Este proceso se realiza para eliminar las posibles trazas de queso, caseína coagulada y grasas procedentes de la precipitación en la elaboración de queso. El objetivo de esta operación es evitar posibles colmataciones<sup>11</sup> en la ultrafiltración del lactosuero y permitir el crecimiento bacteriano.

**Ultrafiltración:** En esta operación ingresa el lactosuero previamente centrifugado de forma tangencial en un módulo tubular de ultrafiltración, y es filtrado por unas membranas de 1000 - 200000 D<sup>2</sup>a<sup>12</sup>, donde se obtienen dos salidas de fluido: El filtrado o mejor conocido como permeado y el concentrado que contiene el mayor contenido de proteínas [73]. En este proceso se usa el permeado que es rico en lactosa, dado que el aumento en la concentración de lactosa facilita la utilización y el almacenamiento de los gránulos de PHB en el cuerpo [45], [73].

---

<sup>11</sup> **Colmatación:** Es el fenómeno por el cual un sistema poroso o filtrante se encuentra obstruido o atascando impidiendo el paso del fluido que podría traspasarlo.

<sup>12</sup> **a:** Unidad de masa utilizada para expresar la masa atómica y molecular.

### 5.1.2 Tratamiento medio de cultivo

El medio de cultivo contiene una mezcla de sales, oligoelementos y lactosuero permeado. El medio de sales mínimas consta de:  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (6,8 g/L),  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (3,0 g/L),  $\text{NaCl}$  (0,5 g/L),  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (1,05 g/L), ácido cítrico (1,66 g/L),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (1,20 g/L),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (1,5 g/L),  $\text{NH}_4\text{Fe}$  (III) (0,05 g/L) y extracto de levadura (0,1 g/L), por cada litro de lactosuero clarificado [45]. La solución de oligoelementos está conformada por  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (27 g/L);  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (2 g/L);  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (2 g/L);  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2 g/L);  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (1 g/L);  $\text{CuCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (1,3 g/L),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (0,5 g/L);  $\text{HCl}$  concentrado - 100 mL, completado hasta 1 L con agua destilada [53]. De esta solución, se agregan 2 mL por cada L de lactosuero. A continuación, en la **Tabla 17** y **Tabla 18**, se reporta la cantidad de sales y oligoelementos requeridas para los biorreactores uno, dos, tres y cuatro.

**Tabla 17.**

*Cantidad de sales requeridas*

	Volumen efectivo L					
	1	0,15	1,5	15	150	1500
Sales	Cantidad [g]					
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	6,80	1,02	10,2	102	1020	10200
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	3,00	0,45	4,5	45	450	4500
$\text{NaCl}$	0,50	0,075	0,75	7,5	75	750
$\text{NH}_4\text{Cl}$	1,05	0,1575	1,575	15,75	157,5	1575
Ácido cítrico	1,66	0,249	2,49	24,9	249	2490
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1,20	0,18	1,8	18	180	1800
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	1,50	0,225	2,25	22,5	225	2250
Citrato de $\text{NH}_4\text{Fe}$	0,05	0,0075	0,075	0,75	7,5	75
Extracto de levadura	0,1	0,015	0,15	1,5	15	150
<b>Total sales [g]</b>	15,86	0,002379	0,02379	0,2379	2,379	23,79

**Nota.** La tabla muestra las diferentes sales utilizadas y su respectiva cantidad en g/L para cada uno de los volúmenes de lactosuero que ingresan a cada reactor.

**Tabla 18.**

*Cantidad de oligoelementos requeridos*

	Volumen efectivo L					
	1	0,15	1,5	15	150	1500
OLIGOELEMENTOS	Cantidad [g]					
<b>FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O</b>	27	4,05	40,5	405	4050	40500
<b>ZnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O</b>	2	0,3	3	30	300	3000
<b>CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</b>	2	0,3	3	30	300	3000
<b>Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O</b>	2	0,3	3	30	300	3000
<b>CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</b>	1	0,15	1,5	15	150	1500
<b>CuCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</b>	1,3	0,195	1,95	19,5	195	1950
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	0,5	0,075	0,75	7,5	75	750
<b>TOTAL</b>	35,8	5,37	53,7	537	5370	53700

**Nota.** La tabla muestra los diferentes oligoelementos utilizados y su respectiva cantidad en g/L para cada uno de los volúmenes de lactosuero que ingresan a cada reactor.

### 5.1.3 Tren de inóculo

El inóculo es la cantidad de microorganismos o células capaces de garantizar, las condiciones económicas y de fermentación en un volumen dado de mosto (**Ecuación 1**). Este valor depende directamente del tipo de microorganismo, del tipo de medio y del proceso y se define experimentalmente.

**Ecuación 1.** *Volumen de inóculo*

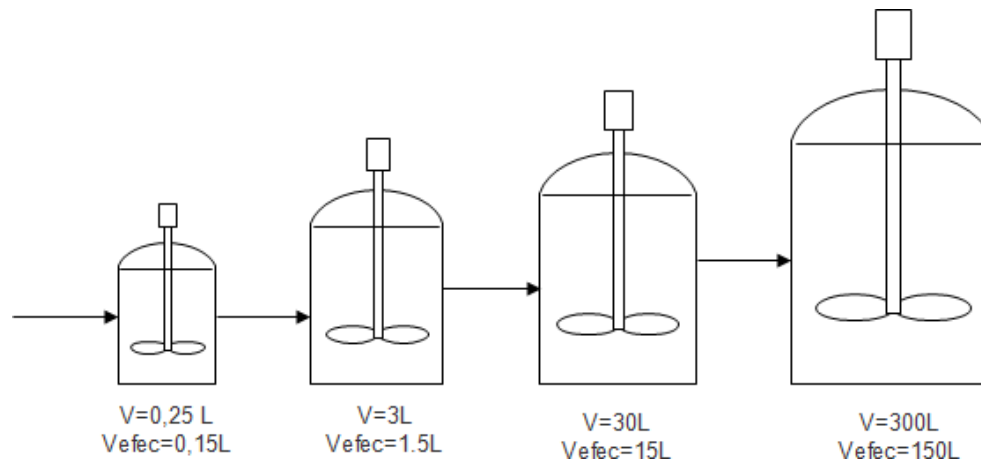
$$\text{Volumen útil del fermentador} = V$$

$$\text{Volumen de inóculo} = 0,005V \text{ a } 0,5$$

El inóculo para el procesamiento de PHB a partir de *Bacillus megaterium*, se desarrolló mediante un tren de inóculo, que consiste en ir incrementando el volumen de los biorreactores, para alcanzar los resultados óptimos como se puede observar en la **Figura 15**.

**Figura 15.**

*Dimensión biorreactores batch del tren de inóculo*



**Nota.** La figura muestra el tren de inóculo con su respectivo volumen

A cada uno de los biorreactores se inóculo el 5% (v/v) en el medio de cultivo ya previamente mencionado, que posteriormente se cultivó aeróbicamente a 37°C, que es la temperatura óptima de crecimiento del *Bacillus megaterium* durante 18 horas. Como ya se sabe la fase exponencial se caracteriza por la duplicación celular, entonces la fase media logarítmica fue escogida para hacer la transferencia de inóculo, lo que ocurre a las 18 horas [45].

En cuanto al modo de operación de los biorreactores, existen tres modos principales de operación de un biorreactor: discontinuo o *batch*, semicontinuo o *fed-batch* y continuo [74]. Sin embargo, los más usados para el crecimiento de microorganismos en medio líquido son el modo continuo y el modo *batch* [75].

El modo elegido para el desarrollo del proceso es *batch*, debido a que los tiempos de fermentación son cortos; este proceso ofrece varias ventajas como lo es su fácil manejo y se utiliza extensamente tanto en el laboratorio como a escala industrial [74]. En este modo todos los nutrientes y la biomasa inicial son agregados al inicio de la preparación del lote, excepto el oxígeno y los reguladores de pH como lo son el NaOH al 0,1 N y HCl al 0,1 N. Una vez agregados al sistema, no se vuelven adicionar

sustancias y se espera el tiempo de reacción establecido [76]. Finalmente, las células deben ser recolectadas por centrifugación y lavadas con tampón fosfato, con el fin de reducir el pH en la mezcla remanente de la centrifuga.

#### **5.1.4 Fermentación**

La producción de PHA se lleva a cabo en un fermentador de 3 m<sup>3</sup> que opera en modo *batch*, con un volumen de trabajo de 1,5 m<sup>3</sup>, a una temperatura de 37°C, pH de 9,0 por 48 horas. El tiempo de operación se escogió en base a la cinética de crecimiento del microorganismo, como se puede observar en la **Figura 13**, a la hora 48 es cuando se obtiene la mayor concentración de biomasa seca y se logra la mayor concentración de PHB junto con el mayor porcentaje de acumulación.

Dado que el *Bacillus megaterium* es un microorganismo aerobio, el reactor debe mantenerse aireado, por lo que se asume que el O<sub>2</sub> es un reactivo limitante en el crecimiento exponencial del microorganismo. Por lo tanto, la fermentación debe contar con una columna de burbujeo, la cual, le permitirá al microorganismo consumir el oxígeno requerido. En el diseño conceptual, se tiene en cuenta la solubilidad del oxígeno disuelto en el medio; adicionalmente, el porcentaje de agua en el lactosuero se encuentra alrededor del 93 % en volumen.

Para determinar la cantidad de oxígeno disuelto en el lactosuero, se considera la ley de Henry para calcular la concentración máxima de oxígeno en el medio de cultivo; considerando el volumen efectivo como base de cálculo para determinar la cantidad de aire requerida en el fermentador.

La ley de Henry fue formulada por el científico William Henry en 1803, la cual establece que, a temperatura constante y en equilibrio, la concentración de un gas es directamente proporcional a la presión parcial del mismo en un líquido; un ejemplo de ello es la solubilidad de O<sub>2</sub> en los cuerpos de agua, el cual, les permite respirar a los peces respirar bajo el agua [77], [78].



**Ecuación 2. Ley de Henry**

$$M = K_H * P$$

Donde:

M = Concentración máxima de oxígeno en agua. [mol/L].

$K_H$  = Constante de Henry [mol atm<sup>-1</sup> L<sup>-1</sup>].

P = Presión total del sistema [atm].

Debido a que los datos tomados como base de cálculo son de referencia en el municipio de Ubaté, se toma como presión parcial, la presión atmosférica de dicho municipio; la cual es de 530 mmHg (0,697 atm) [79]. Para determinar la constante de Henry ( $K_H$ ), se realiza la búsqueda en tablas que proporcionen la solubilidad de oxígeno en agua, para determinar la máxima solubilidad posible, y en base a ello, determinar la cantidad de aire requerido en cada biorreactor.

**Tabla 19.**

*Constante de Henry a diferentes temperaturas para gases diatómicos*

Gas	Temperatura [°C]			
	0	20	40	60
H <sub>2</sub>	9,60x10 <sup>-04</sup>	8,10x10 <sup>-04</sup>	7,30x10 <sup>-04</sup>	6,70x10 <sup>-04</sup>
N <sub>2</sub>	1,03x10 <sup>-03</sup>	7,30x10 <sup>-04</sup>	5,60x10 <sup>-04</sup>	4,86x10 <sup>-04</sup>
O <sub>2</sub>	2,20x10 <sup>-03</sup>	1,43x10 <sup>-03</sup>	1,02x10 <sup>-03</sup>	8,70x10 <sup>-04</sup>

**Nota.** La tabla muestra el valor de la constante de Henry a 0°C, 20°C, 40°C y 60°C para gases diatómicos. Tomado de: Rodríguez, J. E. "Unidad III. Balance de materia sistemas multifásicos". Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Departamento de Ingeniería Química. 2016. [Accedido: 8-nov-2021].

Los biorreactores, operan a una temperatura de 37°C ya que es la temperatura óptima de crecimiento para la cepa *Bacillus megaterium*, por ende, se interpola dicha

temperatura de la tabla anterior y se obtiene la solubilidad máxima de O<sub>2</sub> por litro de agua.

**Tabla 20.**

*Solubilidad del oxígeno en agua*

T [°C]	Solubilidad O <sub>2</sub>
20	1,43x10 <sup>-03</sup>
37	1,22x10 <sup>-03</sup>
40	1,02x10 <sup>-03</sup>

**Nota.** Interpolación de oxígeno disuelto en agua.

Al interpolar, la solubilidad máxima de O<sub>2</sub> en agua es de 1,22x10<sup>-3</sup> moles por cada litro de agua. Despejando la **Ecuación 2**, se determina la concentración máxima de O<sub>2</sub> en agua, bajo las condiciones de operación de los biorreactores.

$$M = K_H * P$$

$$M = 1,22 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l} * \text{atm}} * 0,697 \text{ atm}$$

$$M = 8,51 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

Adicionalmente, se sabe que el lactosuero se compone aproximadamente de un 93% de agua; a partir de ello, se determina la cantidad de moles máximas de O<sub>2</sub> requeridas para cada uno de los biorreactores.

**Tabla 21.***Moles máximas de O<sub>2</sub> solubilizadas en cada biorreactor*

Equipo	Litros de lactosuero	Litros de agua	Moles máximas en cada biorreactor
Biorreactor 1	0,143	0,133	1,13x10 <sup>-04</sup>
Biorreactor 2	1,433	1,332	1,13x10 <sup>-03</sup>
Biorreactor 3	14,325	13,322	1,13x10 <sup>-02</sup>
Biorreactor 4	143,25	133,22	0,113
Biorreactor 5	1432,50	1398,47	1,190

**Nota.** La tabla muestra el contenido de agua por cada litro de lactosuero y las moles máximas solubles en cada bioreactor.

Para determinar la cantidad de aire requerido, se toma la cantidad de moles máximas presentes de O<sub>2</sub> en los litros de agua previamente determinados, y se calcula el peso en kg de O<sub>2</sub>, siendo este valor el 21% de la cantidad de aire total requerido.

### Ecuación 3. Cálculo de oxígeno

$$\text{Masa de O}_2[\text{kg}] = \frac{PM \left[ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] * \text{Cantidad de moles} [\text{mol}]}{1000 \text{ g/kg}}$$

Para cada biorreactor, se tiene la cantidad de aire requerida en kg a partir de la anterior expresión.

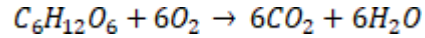
**Tabla 22.***Cantidad de aire requerido para cada biorreactor*

Equipo	Masa de O <sub>2</sub> [kg]	Cantidad de aire [kg]
Biorreactor 1	1,81x10 <sup>-06</sup>	8,64x10 <sup>-06</sup>
Biorreactor 2	1,81x10 <sup>-05</sup>	8,64x10 <sup>-05</sup>
Biorreactor 3	1,81x10 <sup>-04</sup>	8,64x10 <sup>-04</sup>
Biorreactor 4	1,81x10 <sup>-03</sup>	8,64x10 <sup>-03</sup>
Biorreactor 5	1,90x10 <sup>-02</sup>	9,07x10 <sup>-02</sup>

**Nota.** Cantidad de aire requerida para cada biorreactor.

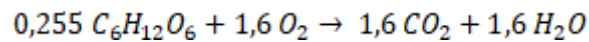
Para determinar la cantidad de dióxido de carbono producido en cada biorreactor, se tiene la reacción descrita en la ecuación 4.

**Ecuación 4.** *Reacción de respiración a partir de glucosa*



Como se sabe la cantidad de moles presentes en la solución, se tiene la ecuación 5 para el biorreactor 5.

**Ecuación 5.** *Reacción de respiración a partir de glucosa con las moles de O<sub>2</sub> máximas solubles en agua para el biorreactor 5*



Se repite el cálculo para cada uno de los biorreactores, con el fin de conocer la cantidad de CO<sub>2</sub> producidos a partir de glucosa. Por lo tanto, para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> producidos en cada biorreactor en kg, se multiplica el número de moles por el peso molecular del mismo.

**Tabla 23.**

*Cantidad de CO<sub>2</sub> en kg por cada mol de O<sub>2</sub> consumido*

<b>Equipo</b>	<b>Moles de O<sub>2</sub> en cada reactor [mol]</b>	<b>Cantidad de CO<sub>2</sub> producido [kg]</b>
Biorreactor 1	1,13E-04	4,99E-06
Biorreactor 2	1,13E-03	4,99E-05
Biorreactor 3	1,13E-02	4,99E-04
Biorreactor 4	0,113	4,99E-03
Biorreactor 5	1,190	5,24E-02

**Nota.** La tabla corresponde a la relación de moles O<sub>2</sub> por cada kg CO<sub>2</sub> generado.

Basados en el resultado obtenido con dicho microorganismo de [45], el cual determina la cantidad de lactosa usada por el microorganismo; por ende, debido a que las condiciones de operación son iguales y la cantidad de sustrato se encuentra escalado, se estima la cantidad de lactosa consumida en base a la cantidad de lactosa presente en el lactosuero; cantidad determinada en la determinación de las propiedades físico químicas previamente mencionado.

Cabe resaltar, que el porcentaje de consumo en lactosa tomado para una relación 90:10 de lactosuero y agua respectivamente, es del 68,08%. Por lo tanto, no consume el 31,92% y este debe ser parte de la composición de salida del efluente del reactor.

En cuanto a la cantidad de biomasa seca, se toma la gráfica propuesta en [45] (Ver **Figura 21**), donde se reporta la concentración en biomasa seca después de 48h en crecimiento, la cual es de 12 g/L. La cantidad de glucosa se obtiene a partir de la cantidad de moles consumidas; a partir de la concentración de lactosa descrita en la sección de propiedades físico químicas (47,4 g/L), después de la reacción de consumo de oxígeno (**Ecuación 5**).

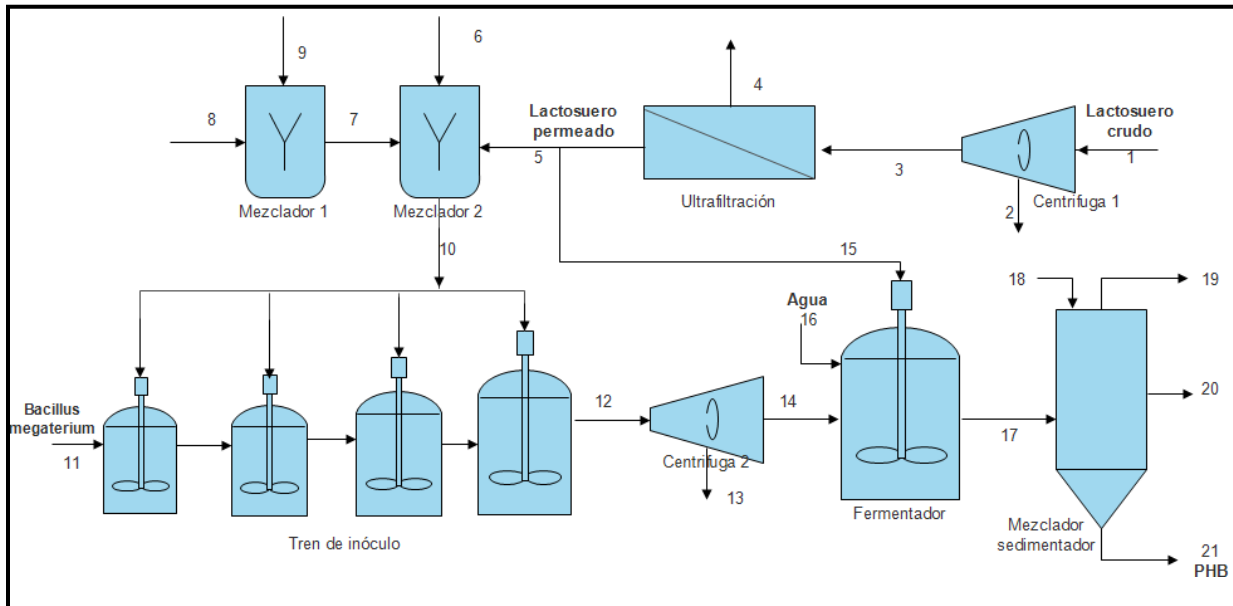
Una vez determinada la cantidad de oxígeno soluble en el sustrato (agua mayoritariamente), la concentración final en masa seca de PHB y la cantidad de lactosa que no se consumió en la fermentación, se realiza el balance de masa respectivo.

### **5.1.5 Extracción de PHB**

La biomasa obtenida después de la fermentación ingresa a un mezclador-sedimentador y es tratada con hipoclorito de sodio al 6% enfriado y cloroformo para extraer los gránulos de PHB durante una hora. Al realizar la extracción de PHB mediante el método de hipoclorito de sodio, se forman tres fases distintas: fase superior (solución acuosa de hipoclorito de sodio), fase intermedia (restos celulares) y fase inferior (fase clorofórmica rica en PHB). En la **Figura 16**, se observa el diagrama general propuesto en el diseño conceptual básico del presente trabajo.

**Figura 16.**

*Diagrama general del proceso*



**Nota.** El diagrama representa el diseño conceptual planteado.

## 5.2 Diagrama de bloques del proceso

En el **Anexo 2**, se presenta el diagrama de bloques (BFD), correspondiente al diseño conceptual básico planteado en el presente trabajo.

## 5.3 Balances de masa

### 5.3.1 Centrifuga

Al proceso ingresan 1616 kg de lactosuero crudo que contiene restos de caseína y grasa provenientes de la elaboración del queso, por tal motivo se centrifuga y se separa del líquido. Para la composición del lactosuero se tuvo en cuenta la caracterización presentada en la **Tabla 6** y se asumió que se iba a retirar el 50% de grasas en la centrifuga. Se propone el uso de una centrifuga con productividad de 2500 L/h y una frecuencia de rotación de 2400 r.p.m [73].

**Ecuación 3.** Balance general centrifuga

$$F_1 = F_2 + F_3$$

Donde:

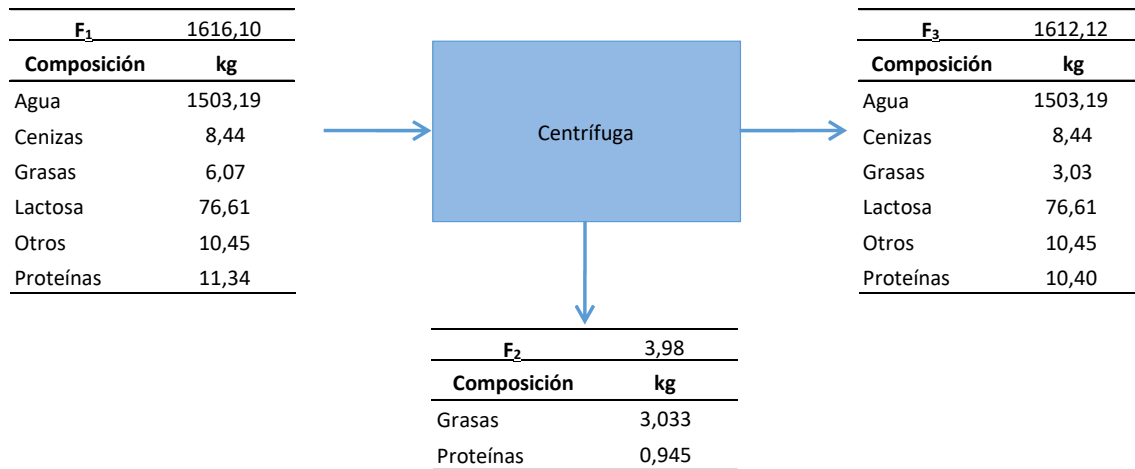
F1= Masa de lactosuero (kg).

F2= Masa residuos de sólidos (kg).

F3= Masa lactosuero acondicionado (kg).

**Figura 17.**

*Balance de masa del pretratamiento del lactosuero*



**Nota.** Balance de masa correspondiente a la centrifuga 1.

### 5.3.2 Ultrafiltración

Al proceso de ultrafiltración ingresa el lactosuero pretratado (1612,12 kg), con el fin de eliminar casi en su totalidad los sólidos suspendidos. Para lo cual, se usa una membrana porosa, que presenta una estructura asimétrica de cerámica en forma tubular, resistente a productos químicos, fácil limpieza y resistente a elevadas temperaturas. Para el correcto desarrollo del balance de masa se tuvo en cuenta rendimientos reales de un equipo de ultrafiltración para la concentración de lactosuero, asumiendo que el permeado contenía 0% de grasas.

**Ecuación 4.** Balance general ultrafiltración

$$F_3 = F_4 + F_5$$

Donde:

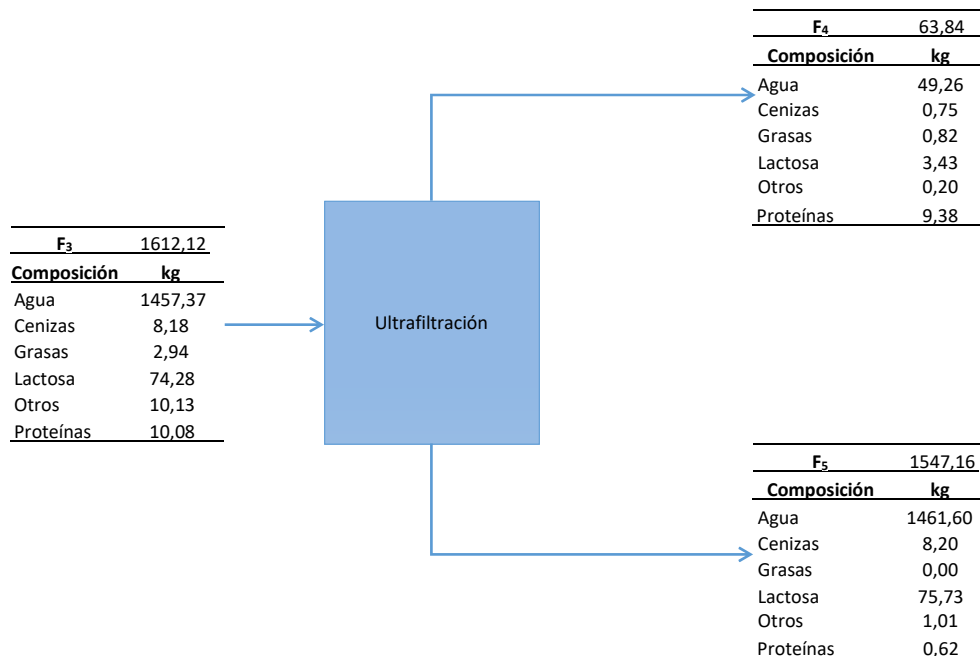
F3= Masa lactosuero acondicionado (kg).

F4= Masa de lactosuero concentrado (kg).

F5= Masa de lactosuero permeado (kg).

**Figura 18.**

*Balance de masa del tratamiento del lactosuero*



**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente a la unidad de ultrafiltración.

### 5.3.3 Mezcladores

Para la preparación del medio de cultivo que consta de una solución de oligoelementos y una mezcla de sales, se propone usar dos mezcladores. Al mezclador 1 ingresa una corriente de agua destilada (165,82 kg) y la mezcla de oligoelementos (5,97 kg) presentada en la **Tabla 18** que se requiere para alimentar el tren de inóculo.



**Ecuación 5. Balance general mezclador 1**

$$F_8 + F_9 = F_7$$

Donde:

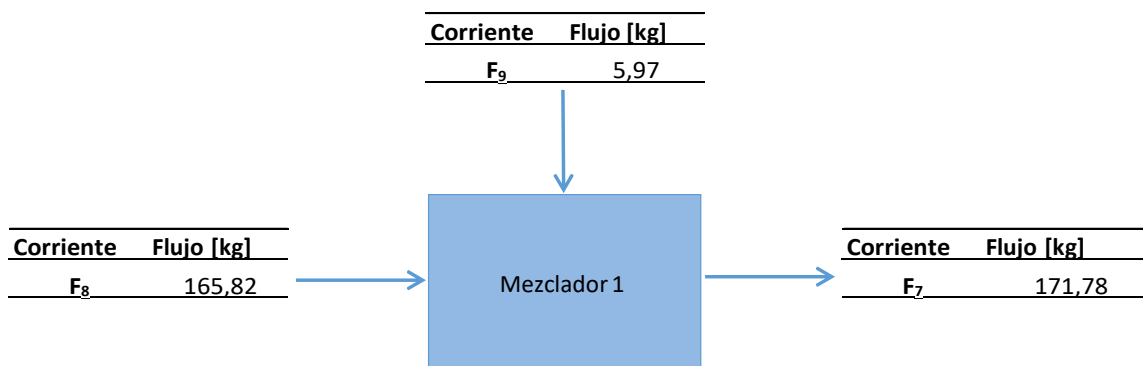
F8: Masa agua destilada (kg).

F9: Masa de oligoelementos (kg).

F7: Masa solución de oligoelementos (kg).

**Figura 19.**

*Balance de masa solución de oligoelementos*



**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente a la unidad de mezclado 1.

Por otro lado, al mezclador 2 ingresa la mezcla de sales (0,024 kg) (datos presentados en la **Tabla 17** y **Tabla 18**) donde el 0,2% de la disolución, es preparada en el mezclador 1 (0,344 kg) y debe salir 169,96 kg de caldo de cultivo (ver **Ecuación 6**).

**Ecuación 6. Volumen caldo de cultivo que requiere el tren de inóculo**

$$V_{\text{Caldo de cultivo}} = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) * 99,5\%$$

$$(0,15 + 1,5 + 15 + 150)L * 99,5\% = 165,82 L = 169,96 Kg \text{ caldo de cultivo}$$

**Ecuación 7. Balance general mezclador 2**

$$F_5 + F_6 + F_7 = F_{10}$$

Donde:

F5= Masa de lactosuero permeado (kg).

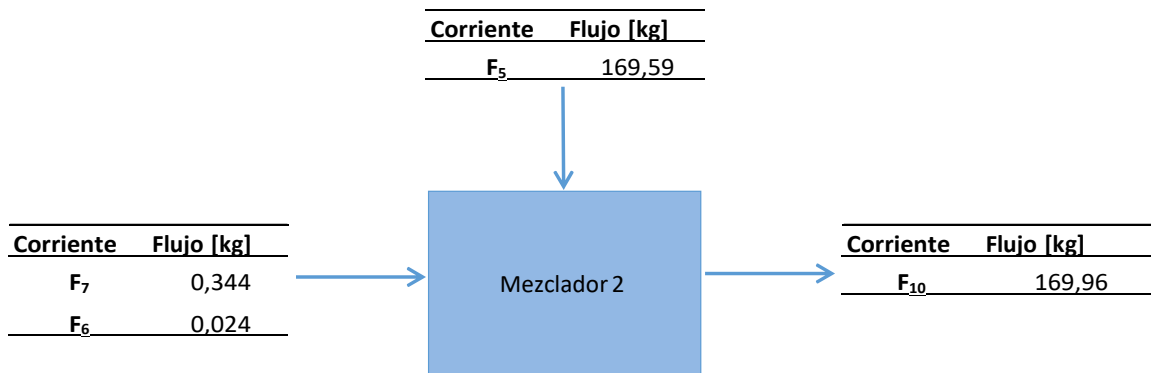
F6= Masa de sales (kg).

F7= Masa solución de oligoelementos (kg).

F10= Masa caldo de cultivo (kg).

**Figura 20.**

*Balace de masa caldo de cultivo*



**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente a la unidad de mezclado 1.

### 5.3.4 Biorreactores

Como ya se mencionó anteriormente al ser el modo de operación tipo *batch*, la biomasa no es agregada ni retirada en el transcurso de la reacción, en la **Ecuación 8** y la **Figura 21**, se describe la ecuación general para el balance de materia.

### Ecuación 8.

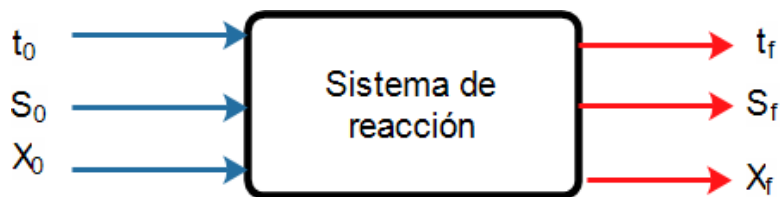
*Balance de masa general*

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Masa que} \\ \text{entra a} \\ \text{través de} \\ \text{los límites} \\ \text{del sistema} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa que} \\ \text{sale a} \\ \text{través de} \\ \text{los límites} \\ \text{del sistema} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa} \\ \text{generada} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa} \\ \text{consumida} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa} \\ \text{acumulada} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \\ \hline \end{array}$$

**Tomado de:** Doran, P. "Principios de ingeniería de los bioprocesos". Acribia, España. 1995. ISBN: 8420008532. 54p.

**Figura 21.**

*Representación balance de masa general*



**Nota.** Tomado de: D.S. Morales *et al*, "Diseño conceptual de un biorreactor para la producción de biomasa de *Azobacter chroococcum* a escala banco," vol.21,no.1,pp.1-9,2020.

Donde:

$t_0$ : Tiempo inicial.

$S_0$ : Sustrato inicial.

$X_0$ : Biomasa inicial.

$t_f$ : Tiempo final.

$S_f$ : Sustrato final.

$X_f$ ; Biomasa final.

Para conocer la concentración de biomasa inicial de cada biorreactor, se tuvo en cuenta que el volumen de inóculo debe ser siempre 5 mL inóculo por cada litro de medio. Mediante la **Ecuación 9**, se calculó la cantidad en litros de inóculo que ingresan al biorreactor. Luego, conociendo la concentración final de biomasa que hay en cada

uno de los birreactores y la **Ecuación 10** se obtienen los gramos de biomasa seca que ingresan y finalmente la concentración se calcula por medio de la **Ecuación 11**.

**Ecuación 9.** *Volumen de inóculo que ingresa al biorreactor*

$$V. \text{ inóculo} = (V. \text{ efectivo [L]} * (\frac{5 \text{ mL inóculo}}{1 \text{ L medio}}) / 1000)$$

**Ecuación 10.** *Biomasa seca que ingresa al biorreactor*

$$V. \text{ inóculo} * [\text{Biomasa final}] = \text{Biomasa seca [g]}$$

**Ecuación 11.** *Concentración biomasa inicial*

$$\text{Biomasa inicial} = [\frac{\text{Biomasa seca}}{V. \text{ efectivo}}]$$

Donde:

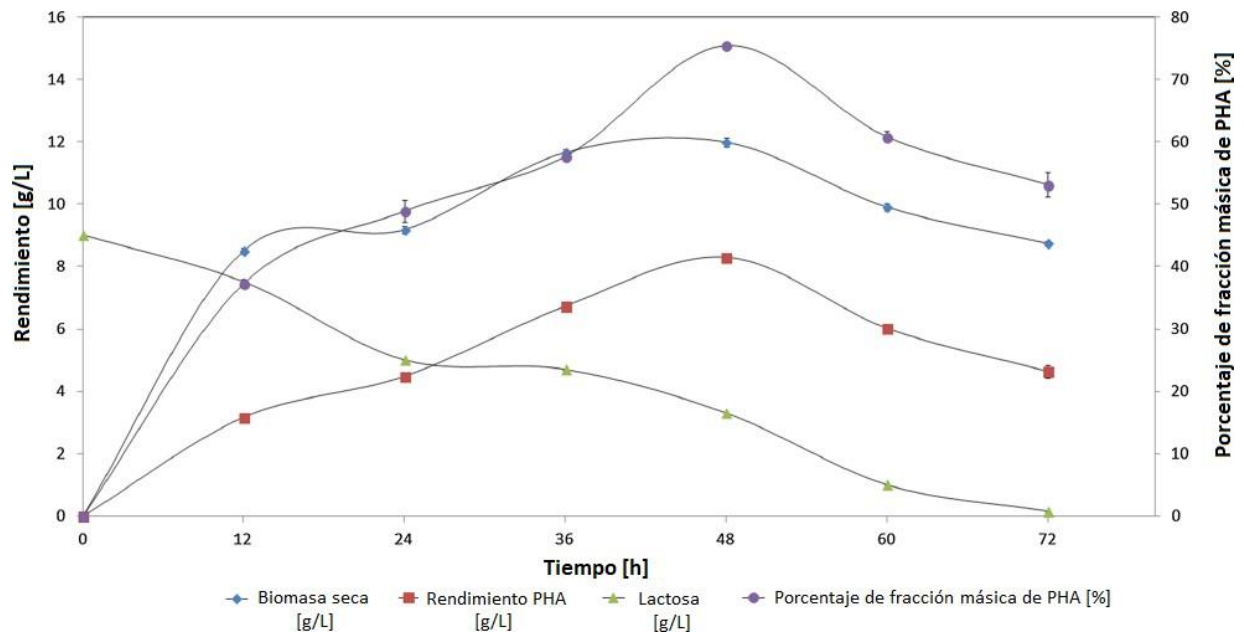
*V. efectivo:* Volumen efectivo.

*V. inóculo:* Volumen de inóculo.

La concentración final del inóculo se obtuvo mediante la **Figura 22**, en la que se evidencia la concentración de biomasa seca respecto al tiempo. Para los biorreactores 1, 2, 3 y 4 se sabe que la fermentación finaliza a la hora 18, hora a la que se realiza la transferencia de inóculo. La concentración de biomasa seca a las 18 h es de 9,3 g/L (la estimación se realiza mediante el uso del software de licencia abierta Im2graph). Por otro lado, para el reactor 5, este tiene un tiempo final de 48 horas, la concentración de biomasa seca a las 48 h es de 12 g/L.

**Figura 22.**

Concentración de biomasa seca respecto al tiempo



**Nota.** La figura muestra la interpolación realizada para el cálculo de la concentración de biomasa seca a la hora 18 y 48. Tomado de: S. Das *et al*, "Biosynthesis of Poly(3-hydroxybutyrate) rom cheese Whet by *Bacillus megaterium* NCIM 5472," J. Polym Environ., vol.26, no 11, doi: 1007/s10924-018-1288-2.

Para el respectivo balance del tren de inóculo, se tuvo en cuenta que a cada biorreactor va ingresar una concentración inicial de biomasa seca de 0,047 g/L (calculada mediante la **Ecuación 11**), el porcentaje de utilización de lactosa (68,08%) y los siguientes porcentajes en la composición del caldo de cultivo.

**Tabla 24.**

*Composiciones de caldo de cultivo*

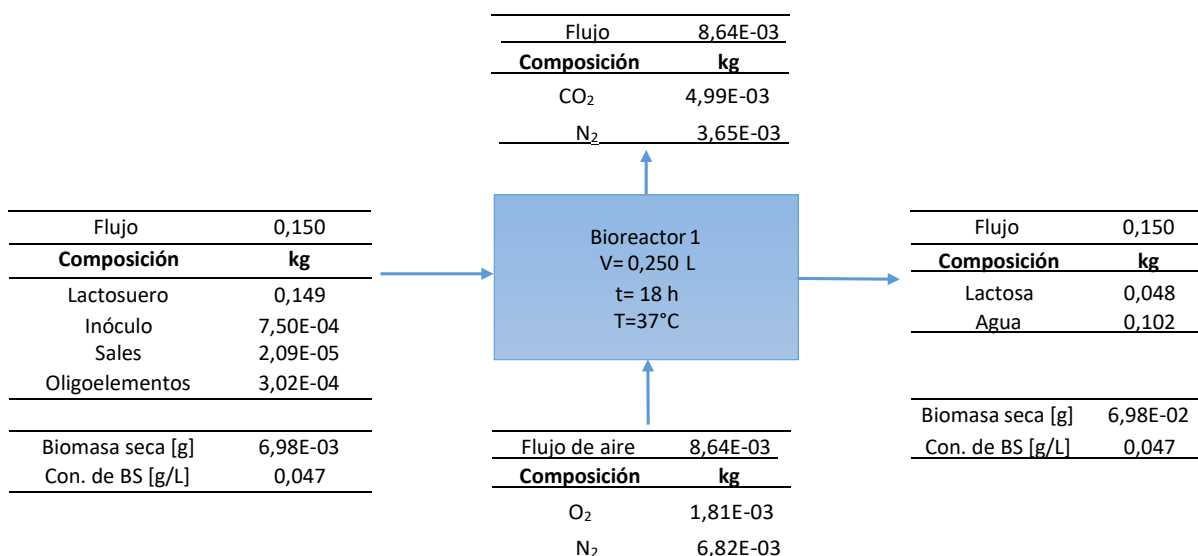
Compuesto	Porcentaje por kg
Lactosuero	99,30%
Inóculo	0,5%
Oligoelementos	0,202%
Sales	0,014%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

**Nota.** La tabla corresponde a los porcentajes que componen el caldo de cultivo.

El primer biorreactor del tren de inóculo opera a una temperatura de 37°C y 530 mmHg de presión (0,697 atm), con un flujo de 0,150 L. Adicionalmente, se tiene una corriente de burbujeo para suministrar oxígeno dentro del equipo; dicha corriente es de 7,88 L de aire seco (8,64x10<sup>-4</sup> kg). La corriente de aire se define por la solubilidad máxima en la que el oxígeno puede disolverse en agua, solubilidad descrita previamente por la ley de Henry; el tiempo de residencia del biorreactor es de 18h.

**Figura 23.**

*Balance de masa biorreactor 1*

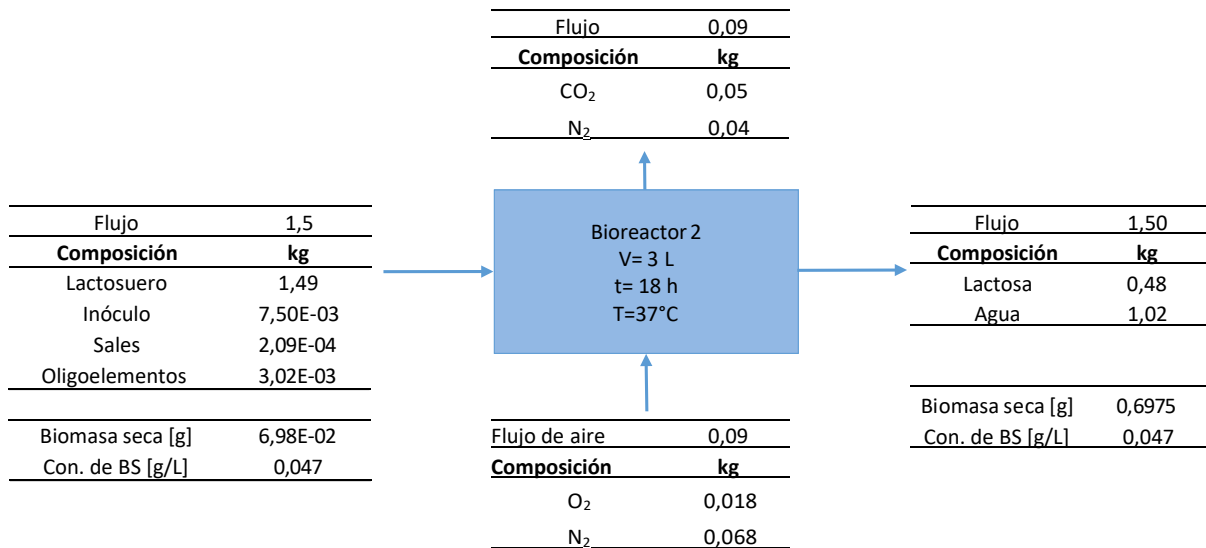


**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente al bioreactor 1. \*Con. de BS significa concentración de biomasa seca.

Al segundo biorreactor, entra un flujo de 1,5 L que contiene caldo de cultivo y biomasa seca con una corriente de aire de 0,09 kg. El tiempo de residencia del biorreactor 2 es de 18h, con una temperatura de operación de 37°C y una presión de 530 mmHg (0,697 atm).

**Figura 24.**

*Balance de masa biorreactor 2*

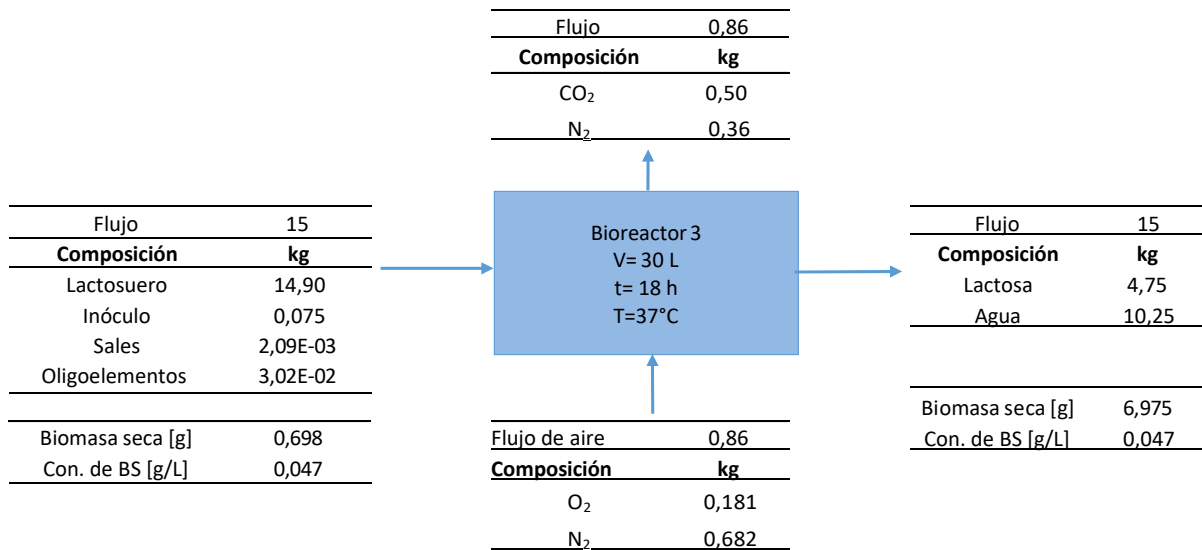


**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente al bioreactor 2. \*Con. de BS significa concentración de biomasa seca.

En el tercer biorreactor, entra un flujo de 15 L, con una corriente de aire de 0,86 kg. El tiempo de residencia del biorreactor 3 es de 18h, con una temperatura de operación de 37°C y una presión de 530 mmHg (0,697 atm).

**Figura 25.**

*Balance de masa biorreactor 3*



**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente al bioreactor 3. \*Con. de BS significa concentración de biomasa seca.

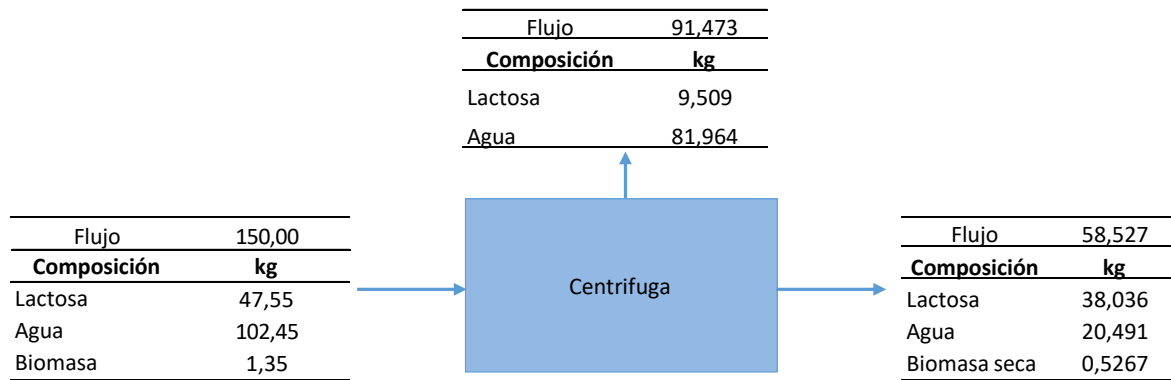
Por último, Al cuarto biorreactor, entra un flujo de 150 L junto con una corriente de aire de 8,64 kg. El tiempo de residencia del biorreactor 4 es de 18h, con una temperatura de operación de 37°C y una presión de 530 mmHg (0,697 atm).





**Figura 27.**

*Balance de masa centrifuga 2*



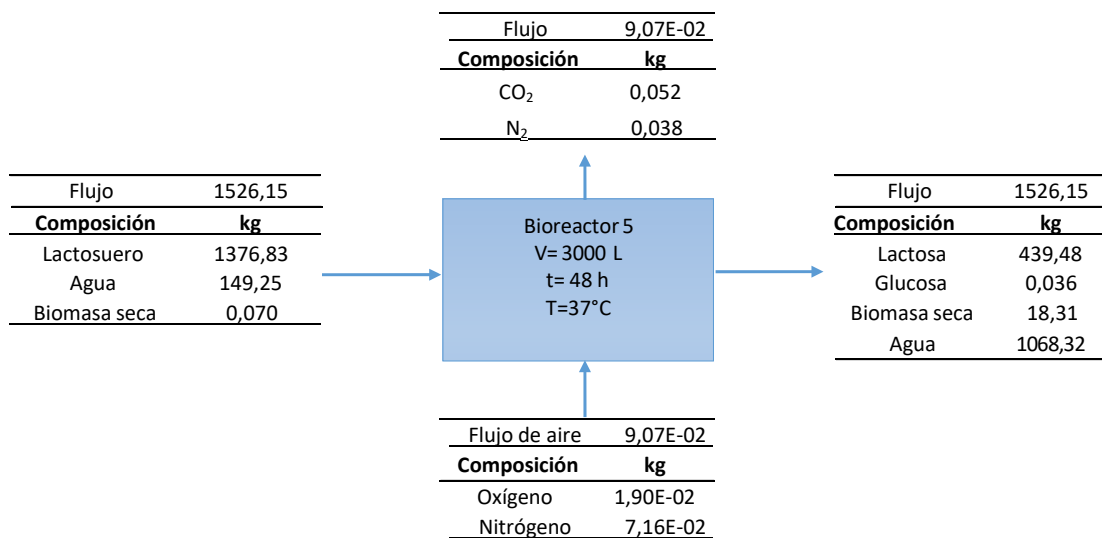
**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente a la centrifuga 2.

### 5.3.5 Balance fermentador

Al fermentador ingresa una concentración inicial de biosama de (0,047 g/L), adicionalmente ingresa lactosuero y agua en una proporción (90:10), para el respectivo balance se tuvo en cuenta una utilización de lactosa del 68,08%.

**Figura 28.**

*Balance de masa biorreactor 5*



**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente al biorreactor 5.

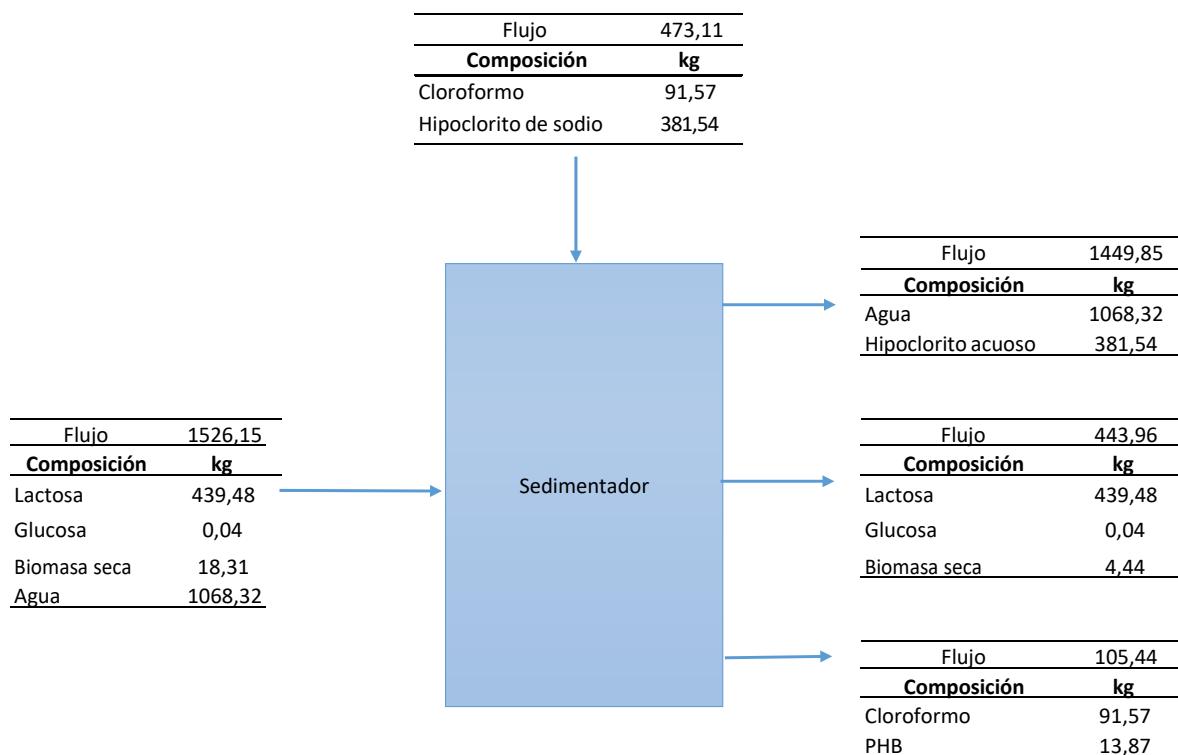
### 5.3.6 Balance sedimentador

Finalmente, para obtener los gránulos de PHB, el efluente junto con la biomasa seca proveniente del biorreactor 5, es tratada con cloroformo e hipoclorito de sodio. El cloroformo tiende a sedimentar en los fondos a los gránulos de PHB mientras que el hipoclorito de sodio, funciona como un agente de separación, formando así tres fases; la fase acuosa, compuesta por hipoclorito y agua; la fase orgánica, compuesta por material biológico residual; y la fase sedimentada, compuesta por cloroformo y PHB.

El cloroformo es separado posteriormente en una campana de humos (puede ser sustituida por un secador al vacío), cuyo tiempo de residencia oscila entre las 48 horas aproximadamente.

**Figura 29.**

*Balance de masa sedimentador-mezclador*



**Nota.** La figura muestra el balance de masa correspondiente a la unidad de sedimentación.

## 6. COSTOS DEL DISEÑO CONCEPTUAL BÁSICO

En el presente apartado se analizarán los costos de capital del diseño conceptual básico presentado en el apartado interior; los cuales se encuentran divididos en: costos de equipos requeridos, costo de energía asociados al consumo energético de equipo y costos de materia prima.

### 6.1 Costos equipos requeridos

Los costos de capital representan la inversión inicial del diseño, entre estos los costos por compra de los equipos para el proceso de producción de PHB. Los costos reportados a continuación en la tabla son cotizaciones que se realizaron directamente en páginas de fabricantes o distribuidores correspondientes a cada equipo.

**Tabla 25.**

*Precio equipos requeridos en el proceso*

Equipo	Marca-Referencia	Capacidad	Consumo [kW]	Precio [COP]
Centrifuga 1	Gea Westfalia MSE 25-01-177	2500 L/h	7,5	\$68.748.250
Ultrafiltración	Reyes TGUF-2	2000 L/h	1,3	\$34.416.211
Mezclador 1	Qiangzhong FRK	3000 L	2,2	\$7.733.980
Mezclador 2	Qiangzhong FRK	3000 L	2,2	\$7.733.980
Biorreactor 1	-	0,2 L	0,5	\$39.000
Biorreactor 2	XHSG-5L-1000L	3 L	1	\$3.866.990
Biorreactor 3	XHSG-5L-1000L	30 L	5	\$6.223.263
Biorreactor 4	XHSG-5L-1000L	300 L	18	\$29.786.650
Biorreactor 5	Qiangzhong FRK	3000 L	22	\$30.935.920
Centrifuga 2	Gea Westfalia MSE 25-01-177	2500 L/h	7,5	\$68.748.250
Sedimentador	ECOPRO	2000 L	-	\$36.999.360
<b>TOTAL</b>				<b>\$295.231.854</b>

**Nota.** Los datos de la tabla muestran los precios de los equipos requeridos presentes en el mercado.

Teniendo en cuenta los valores presentados en la **Tabla 25** el valor de inversión total para los equipos es de \$295.231.854 pesos colombianos. Adicionalmente, se sabe que los precios no incluyen costos de flete.

## 6.2 Costos de operación

Dado que se trata de un proceso *batch* los costos de operación se calcularán según el consumo de energía de cada equipo por el tiempo que opera (ver **Tabla 26**). Para el desarrollo de los cálculos se tuvo en cuenta que el valor de la energía eléctrica (\$/kWh) cobrados por la empresa Enel-Codensa para zona industrial diurna y nocturna en el municipio de Ubaté es alrededor de \$649,5674 por kWh [80].

**Tabla 26.**

*Costos de energía*

Equipo	Tiempo de operación [h]	Consumo [kW]	Costo energía [COP]
Centrifuga 1	1	7,5	\$ 4.872
Ultrafiltración	1	1,3	\$ 844
Mezclador 1	1	2,2	\$ 1.429
Mezclador 2	1	2,2	\$ 1.429
Biorreactor 1	18	0,05	\$ 585
Biorreactor 2	18	1	\$ 11.692
Biorreactor 3	18	5	\$ 58.461
Biorreactor 4	18	18	\$ 210.460
Biorreactor 5	48	22	\$ 685.943
Centrifuga 2	1	7,5	\$ 4.872
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 980.587</b>

**Nota.** Los datos de la tabla muestran los costos asociados al consumo energético por equipo.

## 6.3 Costos de materia prima

La principal materia prima empleada en el proceso es el lactosuero, este no tiene ningún costo, dado que es un desecho que tienen varias empresas productoras de queso como se ha mencionado anteriormente. Por otro lado, en la **Tabla 27**, se presenta el costo de las sales, oligoelementos y agua requeridos por lote según el balance de masa previamente desarrollado en el capítulo 5. El proceso requiere agua destilada para preparar la disolución de oligoelementos (165,82 kg) y para el biorreactor 5 requiere (149,25 kg), lo que da un total de 315,07 kg. Los documentos de soporte, fichas técnicas y referencias de los sitios web consultados, se encuentran en el apartado de anexos.

**Tabla 27.***Costos materia prima*

<b>Materia prima</b>	<b>kg requeridos</b>	<b>Precio por kg [COP]</b>	<b>Total [COP]</b>
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1,133	\$ 9.667	\$ 10.955
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0,500	\$ 145.321	\$ 72.653
NaCl	0,083	\$ 55.259	\$ 4.604
NH <sub>4</sub> Cl	0,175	\$ 271	\$ 47
Ácido cítrico	0,277	\$ 213	\$ 59
MgSO <sub>4</sub> * 7H <sub>2</sub> O	0,200	\$ 348	\$ 70
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0,250	\$ 5.800	\$ 1.450
Citrato de NH <sub>4</sub> Fe	0,008	\$ 348	\$ 3
Extracto de levadura	0,017	\$ 38.670	\$ 644
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	4,500	\$ 1.547	\$ 6.960
ZnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0,333	\$ 5.027	\$ 1.676
CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0,333	\$ 19.335	\$ 6.444
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0,333	\$ 77.340	\$ 25.777
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0,167	\$ 5.800	\$ 967
CuCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0,217	\$ 5.800	\$ 1.257
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,083	\$ 77.378	\$ 6.448
Agua destilada	315,067	\$ 1.800	\$ 567.120
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 707.134,56</b>

**Nota.** Los datos de la tabla muestran los costos asociados al consumo de materia prima.

## 7. CONCLUSIONES

Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del lactosuero, por medio de una revisión bibliográfica, comparando datos de autores tanto nacionales como internacionales, recopilando un total de 19 artículos, que permitieron evidenciar que, las propiedades del lactosuero son muy variables dependiendo de factores como: alimento del ganado, condiciones del terreno, tratamiento de la leche al momento de la coagulación (enzimática o ácida) y la procedencia del lactosuero según el tipo de queso.

Se identificaron los biopolímeros que se pueden obtener a partir de lactosuero, siendo específicamente los biopolímeros extraídos a partir de la síntesis de microorganismos (PHA, PCL, PLA). Enfocando la investigación hacia la producción de polihidroxialcanoatos (PHA), dado que al utilizar lactosuero como sustrato este presenta mayores rendimientos, además tiene múltiples aplicaciones y puede ser utilizado para la elaboración de empaques, plástico de embalaje, bolsas biodegradables, películas microbianas, entre otros.

Se identificaron los microorganismos que utilizan como sustrato lactosuero, siendo *Haloferax mediterrani*, *Pseudomonas putida* y *Bacillus megaterium* de mayor interés, puesto que, los rendimientos presentados en los estudios referenciados, son los de mayor rendimiento. Adicionalmente, se determinó que, el mejor microorganismo, es la cepa *Bacillus megaterium*, en base al análisis de aspectos clave como disponibilidad, rendimiento, aplicaciones y economía del proceso, soportados en un total de 12 documentos que permitieron corroborar, plantear y analizar la información consultada.

Se realizó el diseño conceptual básico, en base a la literatura y en conocimientos de ingeniería conceptual básica, en lo cual, derivó en la construcción de un diagrama de bloques, un balance de materia y un diagrama de proceso. Cabe resaltar que el diseño se encuentra en fase preliminar y es una idea basada en la investigación teórica realizada por los autores, soportado en un total de 6 artículos diferentes que, en base a

las condiciones de operación se llega al diseño planteado, con un criterio de decisión en base a dichos artículos.

Se definieron los costos asociados al diseño conceptual básico del proceso, siendo los costos de capital estimados de \$ 295.231.854 pesos colombianos; los costos asociados a las materias primas son de \$ 707.134,56 COP/lote y el costo asociado al consumo energético estimado de \$ 980.587 COP/lote. Adicionalmente, se puede evidenciar que los costos por lote son elevados, no obstante, utilizando lactosuero como sustrato permite reducir alrededor del 40% y 50% de los costos totales en la producción de PHB; dado que se trata de un subproducto en la industria láctea colombiana, este no tiene costo.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. P. Támara, “Aprovechamiento industrial del lactosuero”, trabajo fin de grado, *Univ. de Córdoba*, Berástegui, Córdoba, Colombia, 2015. [En línea]. Disponible en:  
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/1044/APROVECHAMIENTO%20INDUSTRIAL%20DEL%20LACTOSUERO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [2] M. L. Castells *et al.*, “Valorización del lactosuero”. *Instituto Nac. de Tec. Industrial INTI*, San Martín, Argentina. [En línea], Disponible en:  
<https://www.inti.gob.ar/lacteos/pdf/lactosuero.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [3] G. E. Villota, F. A. Cuesta, y D. M. Flóres, “Plan integral de manejo de lactosuero: Algunas aplicaciones”, *Sennova*, 2015, [En línea]. Disponible en:  
<https://www.redalyc.org/pdf/4419/441942921001.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [4] J. S. Nafar y A. M. Galeano, “Determinación de una alternativa viable para el aprovechamiento del lactosuero generado por la empresa quesillos Armero Guayabal.”, *Fund. Univ. de América*, vol. 6, no. 11, pp. 951–952, 2020.
- [5] M. Á. Mazorra, H. Ramírez, M. E. Lugo, A. F. González y B. Vallejo, “Caracterización del lactosuero y requesón proveniente del proceso de elaboración de queso cocido (asadero) región Sonora,” *Nov. Sci.*, vol. 11, no. 23, pp. 220–233, 2019, doi: 10.21640/ns.v11i23.2072.
- [6] R. E. López, M. L. Becerra y L. M. Borrás, “Caracterización físico-química y microbiológica del lactosuero del queso paipa,” *Cienc. y Agric.*, vol. 15, no. 2, pp. 99–106, 2018, doi: 10.19053/01228420.v15.2.
- [7] N. Monroy, “Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración,” *Univ. La Salle, Cienc. Unisalle*, p. 109, 2020, [En línea]. Disponible: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_alimentos/721](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/721). [Accedido: 27-nov-2021]

- [8] M. A. Forero y L. C. Ordoñez, "Propuesta para la elaboración de una bebida láctea energizante a partir del lactosuero en la empresa Casalac," *Programa ingeniería Quím.*, 2017, [En línea]. Disponible en: <http://e-journal.usd.ac.id/index.php/LLT%0Ahttp://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpdpb/articloe/viewFile/11345/10753%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.758%0Awww.iosrjournals.org>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [9] R. F. Riofrío, "Caracterización de lactosuero proveniente de cuatro producciones de diferentes tipos de queso," p. 74, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/bitstream/23000/3177/1/000110271.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [10] M. C. Álvarez, "Caracterización fisicoquímica de los diferentes tipos lactosueros producidos en la Cooperativa Colanta LTDA," tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, *Corporación Universitaria Lasallista*, 2013. [En línea]. Disponible: [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1036/1/Caracterizacion\\_fisicoquimica\\_diferentes\\_tipos\\_lactosueros\\_producidos\\_Colanta.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1036/1/Caracterizacion_fisicoquimica_diferentes_tipos_lactosueros_producidos_Colanta.pdf). [Accedido: 27-nov-2021]
- [11] M. Á. Mazorra y J. M. Moreno, "Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal," *CienciaUAT*, vol. 14, no. 1, p. 133, Jul. 2019, doi: 10.29059/cienciauat.v14i1.1134.
- [12] N. Daza, "Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Sector Lácteo," *Director*, vol. 1828, no. 1, pp. 334–334, 2021, [En línea]. Disponible: [http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Archivos/Foros/caracterizacion\\_citricos1.pdf](http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Archivos/Foros/caracterizacion_citricos1.pdf). [Accedido: 27-nov-2021]
- [13] R. A. Parra, "Lactosuero: importancia en la industria de alimentos.," *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 62, no. 1, pp. 4967–4982, 2009, [En línea]. Disponible: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0304-28472009000100021&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472009000100021&lng=en&nrm=iso&tlng=es). [Accedido: 27-nov-2021]

- [14] Ministerio de Salud de Colombia, “Resolución número 02310 de 1986”, vol. 0182, no. 86, pp. 1–18, 1986. [En línea]. Disponible: [https://www.invima.gov.co/documents/20143/441425/resolucion\\_02310\\_1986.pdf/64615e1e-8373-b43e-e595-037af034b802](https://www.invima.gov.co/documents/20143/441425/resolucion_02310_1986.pdf/64615e1e-8373-b43e-e595-037af034b802). [Accedido: 27-nov-2021]
- [15] C. Alava, M. Gómez y J. A. Maya, “Caracterización fisicoquímica del suero dulce obtenido de la producción de queso casero en el municipio de Pasto.,” *Rev. Colomb. Investig. agroindustriales*, vol. 1, pp. 22–32, 2014, doi: 10.23850/24220582.110.
- [16] W. J. Guerrero, C. A. Gómez, J. Castro, C. A. González y E. M. Santos, “Caracterización fisicoquímica del lactosuero en el Valle de Tulancingo,” *XII Congr. Nac. Cienc. Y Tecnol. Aliment.*, pp. 321–328, 2010.
- [17] R. F. Rico, “Evaluación de un sistema mixto de enzimas para la producción de galactooligosacáridos y ácido glucónico a partir de lactosuero como fuente de lactosa,” pp. 7–9, 2018.
- [18] R. Albin, “Determinación del pH en diversas especies de los renovales de la provincia de Valdivia,” *Bosque*, vol. 1, no. 1, pp. 3–5, 1975, doi: 10.4206/bosque.1975.v1n1-02.
- [19] J. Callejas, F. Prieto, V. E. Reyes, Y. Marmolejo y M. A. Méndez, “Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo,” *Acta Univ.*, vol. 22, no. 1, pp. 11–18, 2012, doi: 10.15174/au.2012.304.
- [20] “Productos Lácteos San Francisco, S.A.”. (2019). [En línea]. Disponible en: <https://www.planetamexico.com.mx/productos-lacteos-san-francisco-sa-de-cv-F1707C10F19D0>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [21] O. García *et al.*, “Preparación de queso Doble crema.”, *SENA, 2014*. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/6581>. [Accedido: 27-nov-2021]

- [22] A. C. Osorio y L. A. Martínez, “Desarrollo de una propuesta de aprovechamiento de los residuos grasos lácteos provenientes de la empresa Levelma S.A.S.,” *Prog. Phys. Geogr.*, p. 116, 2017.
- [23] B. M. Márquez, “Cenizas Y Grasas,” Universidad Nacional de San Agustín., 2014.
- [24] O. Franchi, “Suero de leche, propiedades y usos: Innovación en la industria láctea.,” pp. 1–49, 2010.
- [25] J. M. Pais, J. Núñez, M. V. Lara, L. M. Rivera, L. E. Trujillo y M. J. Cuaran, “Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología,” *Bionatura*, vol. 2, no. 4, pp. 468–476, 2017.
- [26] O. Miranda, I. Palma, P. Fonseca, M. Cutiño, R. Lara y C. Cedeño, “Características fisico-químicas de sueros de queso dulce y ácido producidos en el combinado de quesos de bayamo,” *Rev. Cuba. Aliment. y Nutr.*, vol. 19, no. 1, pp. 21–25, 2009, [En línea]. Disponible: [http://www.revicubalimentanut.sld.cu/Vol\\_19\\_1/Articulo\\_1\\_19\\_1\\_21\\_25.pdf](http://www.revicubalimentanut.sld.cu/Vol_19_1/Articulo_1_19_1_21_25.pdf). [Accedido: 27-nov-2021]
- [27] J. R. Guerrero, L. A. Ramírez y W. Puente, “Caracterización del suero de queso blanco del combinado lácteo Santiago,” 2011, [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543774010.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [28] P. Paredes, A. Chávez, J. Rodríguez, N. Aguilar, A. Rentería y G. Rodríguez, “Propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de suero de leche de queso Chihuahua,” *Investig. Cienc.*, vol. 22, no. 62, pp. 11–16, 2014, [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/2QuGsXQ>.
- [29] J. A. Gómez y Ó. J. Sánchez, “Producción de galactooligosacáridos: alternativa para el aprovechamiento del lactosuero. Una revisión,” *Ing. y Desarro.*, vol. 37, no. 1, pp. 129–158, 2019, doi: 10.14482/inde.37.1.637.

- [30] M. J. Loayza, "Polímeros biodegradables como alternativa para reducir la producción y el consumo de productos elaborados con plástico," *Univ. Científica del Sur. Fac. Ciencias Ambient. Ing. Ambient.*, pp. 1–126, 2018, [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12805/1711>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [31] L. Avérous and E. Pollet, *Chapter 2 Biodegradable Polymers*, vol. 50. 2012. [Online] Available in: <https://www.semanticscholar.org/paper/Chapter-2-Biodegradable-Polymers-Av%C3%A9rous-Pollet/ce73728bd437af6d4c26c8f8bed804147a73fc0c>. [Access: Nov. 27, 2021]
- [32] S. S. Ray and M. Bousmina, "Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 8, pp. 962–1079, 2005, doi: 10.1016/j.pmatsci.2005.05.002.
- [33] R. P. Babu, K. O'Connor and R. Seeram, "Current progress on bio-based polymers and their future trends," *Prog. Biomater.*, vol. 2, no. 1, p. 8, 2013, doi: 10.1186/2194-0517-2-8.
- [34] M. F. Valero, Y. Ortegón y Y. Uscategui, "Biopolímeros: avances y perspectivas biopolymers: progress and prospects," vol. 80, pp. 171–180, 2013.
- [35] P. Zikmanis, S. Kolesovs and P. Semjonovs, "Production of biodegradable microbial polymers from whey," *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 7, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s40643-020-00326-6.
- [36] S. A. Sánchez, A. L. Mora, M. A. Marín and M. del S. Yepes, "Identification of polyhydroxyalkanoate-producing bacteria in soils contaminated with fique wastes," *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 14, no. 2, pp. 89–100, 2012.
- [37] A. M. Khattab, M. E. Esmael, A. A. Farrag and M. I. A. Ibrahim, "Structural assessment of the bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) produced by *Bacillus flexus* Azu-A2 through cheese whey valorization," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 190, no. May, pp. 319–332, 2021, 2021, [Online]. Available in: 10.1016/j.ijbiomac.2021.08.090.

- [38] J. C. Philp, R. J. Ritchie and K. Guy, “Biotechnology policy series Biobased plastics in a bioeconomy,” *Trends Biotechnol.*, vol. 31, pp. 65–67, 2013, doi: 10.1016/j.tibtech.2012.11.009.
- [39] J. Pais, L. S. Serafim, F. Freitas and M. A. M. Reis, “Conversion of cheese whey into poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by *Haloferax mediterranei*,” *N. Biotechnol.*, vol. 33, no. 1, pp. 224–230, 2016, doi: 10.1016/j.nbt.2015.06.001.
- [40] “Poliésteres alifáticos - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos.” [https://www.mexpolimeros.com/poliésteres alifáticos.html](https://www.mexpolimeros.com/poliésteres_alifáticos.html). [Accedido: 29-sep-2021]
- [41] A. M. Rojas, L. P. Montaña y M. J. Bastidas, “Producción de ácido láctico a partir del lactosuero utilizando *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*,” *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 44, no. 3, pp. 5–10, 2015, doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v44n3.55604.
- [42] P. Tsapekos, M. Alvarado-Morales, S. Baladi, E. F. Bosma and I. Angelidaki, “Fermentative production of lactic acid as a sustainable approach to valorize household bio-waste,” *Front. Sustain.*, vol. 1, no. September, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3389/frsus.2020.00004.
- [43] L. V. Cuervo, “Método de obtención de ácido poliláctico (PLA) a partir del suero de queso,” WO2020021346, 30-ene-2020.
- [44] L. V. Cuervo y J. C. Echeverry, “Evaluación de la síntesis de ácido poliláctico proveniente del suero,” tesis de pregrado. *Fund. Univ. de América*, 2016.
- [45] S. Das, A. Majumder, V. Shukla, P. Suhazsini and P. Radha, “Biosynthesis of Poly(3-hydroxybutyrate) from cheese whey by *Bacillus megaterium* NCIM 5472,” *J. Polym. Environ.*, vol. 26, no. 11, pp. 4176–4187, 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1288-2.
- [46] “Poliésteres alifáticos - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos.” [En línea]. Disponible en: [https://www.mexpolimeros.com/poliésteres alifáticos.html](https://www.mexpolimeros.com/poliésteres_alifáticos.html). [Accedido: 27-nov-2021]

- [47] A. L. Machado, "Síntese e Caracterização de Poli(Succinato de Etileno) com Possível Aplicação como Matriz Encapsuladora de Bioativos," *Centro universitário estadual da zona oeste (UEZO)*, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [48] G. Y. Tan *et al.*, "Start a Research on Biopolymer Polyhydroxyalkanoate (PHA): A Review," *Polym. 2014, Vol. 6, Pages 706-754*, vol. 6, no. 3, pp. 706–754, Mar. 2014, doi: 10.3390/POLYM6030706.
- [49] M. G. Gonzáles, "Producción de poli-hidroxicanoatos por bacterias del género *Bacillus* de origen marino," pp. 4–19, 2008, [Online]. Available: [https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/288/1/gonzalez\\_m.pdf](https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/288/1/gonzalez_m.pdf).
- [50] J. Możejko and R. Kiewisz, "Bacterial polyhydroxyalkanoates: Still fabulous?" *Microbiol. Res.*, vol. 192, pp. 271–282, 2016, doi: 10.1016/J.MICRES.2016.07.010.
- [51] M. Barbosa, A. Espinosa, D. Malagón y N. Moreno, "Producción de poli- $\beta$  - hidroxibutirato (PHB)  $\beta$  por *Ralstonia eutropha* ATCC 17697," *Univ. nac. de Colombia*, vol. 10, no. 1, pp. 45–54, 2005.
- [52] A. Martínez, "Comportamiento antagónico de *Bacillus megaterium* (de bary, 1884) contra hongos in vitro," tesis de pregrado, *Univ. Autónoma Antonio Narro*, Torreón, México, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8308>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [53] S. RamKumar, V. Deepak, K. Kalishwaralal, N. Rameshkumar, M. Jeyaraj and S. Gurunathan, "Optimization and fed-batch production of PHB utilizing dairy waste and sea water as nutrient sources by *Bacillus megaterium* SRKP-3," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 2, pp. 705–711, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.040.
- [54] T. M. Amaro, D. Rosa, G. Comi and L. Lacumin, "Prospects for the use of whey for polyhydroxyalkanoate (PHA) production," *Front. Microbiol.*, vol. 10, no., pp. 1–12, 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.00992.

- [55] K. H. Berwig, C. Baldasso and A. Dettmer, "Production and characterization of poly(3-hydroxybutyrate) generated by *Alcaligenes latus* using lactose and whey after acid protein precipitation process," *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 31–37, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.06.067.
- [56] Y. González, J. C. Meza, O. González y J. A. Córdova, "Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: Plásticos de origen microbiano," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 29, no. 1, pp. 77–115, 2013.
- [57] A. C. Lemos y A. Mina, "Polihidroxialcanoatos (PHA) producidos por bacterias y su posible aplicación a nivel industrial," *Inf. Técnico*, vol. 79, no. 1, pp. 83–101, 2015, [En línea]. Disponible en: [http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/view/139/195](http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/139/195). [Accedido: 27-nov-2021]
- [58] B. Tomadoni, D. Merino and V. A. Alvarez, "Biodegradable Materials for Planting Pots," no. April 2021, pp. 85–103, 2020, doi: 10.21741/9781644900659-4.
- [59] Y. G. García, J. C. Meza, M. Contreras, G. Reynoso, J. Antonio y C. López, "Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 29, no. 1, pp. 77–115, 2013 [En línea]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992013000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992013000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es). [Accedido: 27-nov-2021]
- [60] F. A. El-malek, H. Khairy, A. Farag and S. Omar, "The sustainability of microbial bioplastics, production and applications," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 157, pp. 319–328, 2020, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2020.04.076.
- [61] D. Fernández, S. Bautista, D. Fernández, A. Ocampo, A. García y A. Falcón, "Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas," *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 24, no. 3, pp. 52–56, 2015. [En línea]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542015000300008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542015000300008). [Accedido: 27-nov-2021]



- [62] A. C. Cardona, A. L. M. Mora y M. Montoya, "Identificación molecular de bacterias productoras de PHA en subproductos de lácteos y caña de azúcar," *Rev. Fac. Nac. Agron.* vol.66, n.2, pp.7129-7140, 2013.
- [63] M. Koller, P. Hesse, R. Bona, C. Kutschera, A. Atlić and G. Braunegg, "Potential of various archae- and eubacterial strains as industrial polyhydroxyalkanoate producers from whey," *Macromol. Biosci.*, vol. 7, no. 2, pp. 218–226, 2007, doi: 10.1002/mabi.200600211.
- [64] B. Colombo, T. P. Sciarria, M. Reis, B. Scaglia and F. Adani, "Polyhydroxyalkanoates (PHAs) production from fermented cheese whey by using a mixed microbial culture," *Bioresour. Technol.*, vol. 218, no. 2016, pp. 692–699, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.024.
- [65] M. Koller, "Recycling of waste streams of the biotechnological poly(hydroxyalkanoate) production by *Haloferax mediterranei* on whey," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/370164.
- [66] I. Fernández., "Estudio del metabolismo de polihidroxicanoatos en *Pseudomonas putida*: implicaciones fisiológicas y aplicaciones en el desarrollo de bioplásticos funcionalizados", tesis de doctorado, *Univ. complutense de Madrid*, Madrid, España, 2015.
- [67] G. Vazquez., "Análisis genético y bioquímico del metabolismo del poli (3-hidroxi-butirato) (PHB) en *Bacillus megaterium*," tesis de doctorado, *Univ. de Buenos Aires*, Buenos Aires, Argentina, 2010.
- [68] A. Rodríguez, "Study for poly[(R)-3-hydroxybutyrate] production by bacterial strains and its modification for drug delivery systems," Doctoral thesis, *Univ. Politècnica de Catalunya*, 2013. [Online]. Available in: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94869>. [Access: Nov 27, 2021]

- [69] C. Álvarez, “Análisis de la producción de polihidroxitirato usando lactosuero como materia prima,” Tesis de maestría, *Univ. Nac. de Colombia*. Manizales, Colombia, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/54014/1053807168.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [70] S. Obruca, I. Marova, S. Melusova and L. Mravcova, “Production of polyhydroxyalkanoates from cheese whey employing *Bacillus megaterium* CCM 2037,” *Ann. Microbiol.*, vol. 61, no. 4, pp. 947–953, 2011, doi: 10.1007/s13213-011-0218-5.
- [71] G. Sathiyarayanan, G. S. Kiran, J. Selvin and G. Saibaba, “Optimization of polyhydroxybutyrate production by marine *Bacillus megaterium* MSBN04 under solid state culture,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 60, pp. 253–261, 2013, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2013.05.031.
- [72] “*Ingeniería del diseño*”. (2005). [En línea]. Disponible: <https://www.educaweb.com/profesion/ingeniero-diseno-410/>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [73] E. Cantón, “Estudio del diseño de una planta de procesado para el aprovechamiento de lactosuero de quesería,” *Univ. Politécnica Cataluña*, p. 90, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/90371/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [74] P. Loera, “Simulación estocástica y control óptimo de procesos para el tratamiento de aguas residuales de excretas porcinas.” pp. 16–30, 2003, [En línea]. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/1608/capitulo2.pdf>. [Access: Nov 27, 2021]
- [75] P. Doran, “Principios de ingeniería de los bioprocesos,” Academic P. London, 1995 [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/yormanzambrano/principios-de-ingeniera-de-los-bioprocesos-doran-pauline>. [Accedido: 27-nov-2021]

- [76] S. M. López y D. S. Vega, “Diseño conceptual de un biorreactor para la producción de biomasa de *Azotobacter chroococcum* a escala banco”, trabajo de fin de grado, *Fund. Univ. de América*, 2020 [En línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7795/1/6141296-2020-1-IQ.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [77] “Ley de Solubilidad de Henry.” [En línea]. Disponible en: [http://132.248.48.64/repositorio/moodle/pluginfile.php/1983/mod\\_resource/content/9/Contenido/index.html](http://132.248.48.64/repositorio/moodle/pluginfile.php/1983/mod_resource/content/9/Contenido/index.html). [Accedido: 27-nov-2021]
- [78] J. J. Carroll, “Henry’s law: A historical view,” *J. Chem. Educ.*, vol. 70, no. 2, pp. 91–92, 1993, doi: 10.1021/ed070p91.
- [79] “Presión Atmosférica Datos Abiertos Colombia”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/w/62tk-nxj5/dneh-mcp2?cur=54pOj50hiTz>. [Accedido: 27-nov-2021]
- [80] Enel-Codensa, “Tarifas de energía eléctrica (\$/kwh) reguladas por la comisión de regulación de energía y gas julio de 2021”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/personas/1-17-1/2021/tarifario-julio-2021.pdf>. [Accedido: 27-nov-2021]

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1.**

### **RECOMENDACIONES**

Para futuras investigaciones que requieran el análisis del uso de lactosuero como sustrato, más allá del diseño conceptual básico, se recomienda tener presente el limitante de oxígeno soluble en el agua; ya que dicho compuesto, es un limitante en la producción de PHA a partir de microorganismos aerobios.

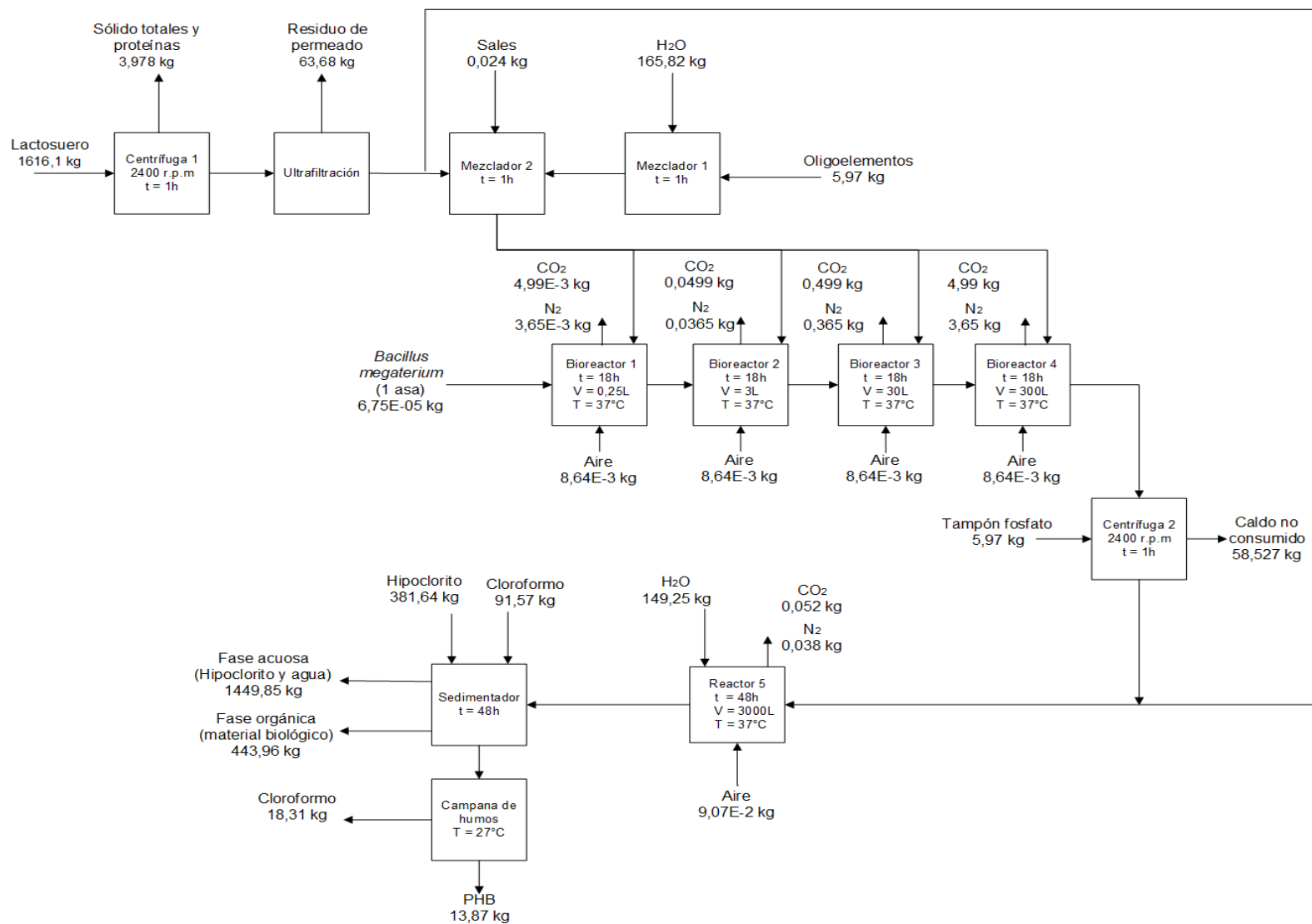
Adicionalmente, sería un enfoque de investigación complementario, el estudio de los problemas de transferencia de masa y de crecimiento en microorganismos productores de PHA aerobios, ya que en la mayoría de fuentes bibliográficas afines, el oxígeno disuelto en los medios de cultivo, no es un parámetro a considerar de manera rigurosa.

El proceso planteado de manera conceptual, deja en evidencia como subproducto, material biológico con un alto porcentaje de lactosa en composición. Teniendo en cuenta lo anterior, se sugiere el estudio del aprovechamiento de la materia biológica remanente; puede ser aprovechados como fertilizantes, materia prima para la generación de biogás, como fuente de lactosa de microorganismos del género *Lactobacillus*, entre otros.

Se recomienda que, en caso de requerir un balance de energía para un diseño más detallado, tener en cuenta la ruta biológica del microorganismo a tratar de manera detalla; ya que el microorganismo en una o más etapas de la ruta, va a liberar energía en forma de calor; modificando así el comportamiento del equipo, las condiciones de operación iniciales generando focos de calor dentro de los biorreactores y el cambio de la temperatura óptima, afectando la curva de crecimiento exponencial.

## ANEXO 2.

### DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO



## ANEXO 3.

### FICHA TÉCNICA PARA CENTRÍFUGA 1 Y CENTRÍFUGA 2

## Technical data

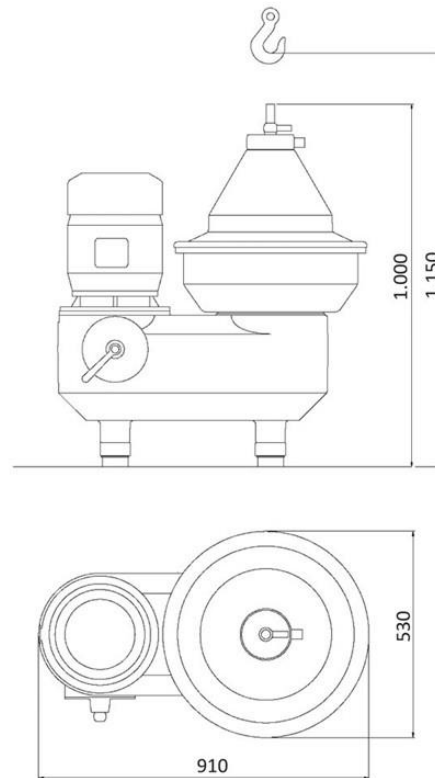
اطلاعات فنی

## MSE 25-01-177

Capacities and feed pressures			
Milk and whey skimming			
Effective capacity	2500 l/h		
Feed pressure at separator inlet	0.5 bar		
Milk clarification			
Rated capacity	3500 l/h		
Feed pressure at separator inlet	1.0 bar		
Technical data			
Bowl			
Solids holding space	1.1 l		
3-phase AC motor			
Rating	7.5 kW		
Operating water requirement			
For pulse-like closing water/ flush water feed	15 l/h		
Per ejection	3 l		
Cooling water requirement	-		
Minimum lifting capacity for hoist	250 kg		
Weights and shipping data			
	gross/kg	net/kg	dimensions/cm
Separator	-	310	110x80x110
Bowl	-	75	-
Motor	-	42	-
Shipping volume	1.8 m <sup>3</sup>		

When skimming whey, the effective capacity depends on the cheese fines content of the whey and the required separating efficiency.  
The rated capacity indicates the max. throughput capacity of the bowl.

## Dimensions in mm



## Function


Skimming of milk and whey, clarification and standardisation of milk. Minimum temperature for all applications is 25 - 55 °C, depending on the process.

## Application

Dairies, cheese factories

## ANEXO 4.


### TANQUES MEZCLADORES 1, 2 Y BIORREACTOR 5



WENZHOU QIANGZHONG

MACHINERY TECHNOLOGY CO.,LTD.

<b>Tipo de tanque:</b>	Reactor de tanque
<b>Garantía:</b>	1 año
<b>Marca:</b>	Qiangzhong
<b>Certificaciones:</b>	SGS/TUV/CE/ISO 9001
<b>Grado automático:</b>	Semiautomático




Volumen [L]	Precio (USD)	Potencia [kW]	Diámetro [m]
100	\$ 2.000	1,5	550
300	\$ 2.200	2,2	800
500	\$ 2.500	3	900
1000	\$ 3.200	4	1200
2000	\$ 4.500	7,5	1400
3000	\$ 6.000	11	1600
5000	\$ 8.000	22	1800

Velocidad de agitación [r/min]	Velocidad de dispersión [r/min]	Velocidad de homogenización [r/min]	Presión [atm]	Temperatura [°C]
36-82	1440	2880	>0,9	<160°C



## ANEXO 5.



### FICHA COMERCIAL BIORREACTORES 1, 2, 3, Y 4





**GUANGZHOU YUHUA INSTRUMENT CO., LTD.**

✓ Established in 2006
✓ Professional development of chemical instruments
✓ Strong manufacturing


<b>Type equipment:</b>	Reaction Kettle
<b>Warranty of core components:</b>	1 year
<b>Trademark:</b>	Guangzhou Xiaoha
<b>Material:</b>	SS304/316
<b>Control Device:</b>	Yes





Mechanical stirring



Magnetic stirring

Capacity	3L	5L	10L	20L	30L	50L	100L	200L	300L	500L	1000L
Material	Inner bladder: 304/316 optional, outer layer: 304/316 optional (Part of the contact material can be all designed as 316 material, strong acid-base products, can be installed as required high borosilicate glass liquid hopper or glass condenser)										
Electrothermal power(According to product design)	1KW	2KW	3KW	4KW	5KW	6KW	12KW	15KW	18KW	22KW	25KW
Motor power	0.12KW	0.12KW	0.18KW	0.18KW	0.18KW	0.25KW	0.75KW	1.1KW	1.5KW	2.2KW	3KW
Inner pan size	Can be customized according to requirements					350	500	550	650	700	1050
Thickness of kettle body	3mm 4mm 5mm 7mm Optional on demand										
Stirring speed	Constant speed 30-60r/min ,Speed regulation 50-500r/min ,Subsequent customization is require according to that state of the reaction medium										
Speed control mode	1. Constant speed(30-60r/min) 2. Variable frequency speed regulation(50-300r/min)Speed adjustable (optional)										
Connection Mode	Butt weld flange type (kettle body opening is flange type)										
Sealing method	Mechanical seal/packing seal, can be designed and manufactured according to requirements										
Heating mode	Electric/steam/external circulate oil heating/external cryogenic cool circulating device										
Matching products(Match according to needs)	1. Low temperature chiller 2. High and low temperature circulating device 3. High temperature oil bath 4. High temperature air cooled oil bath 5. Vacuum pump										
Configuration	1) Standard: Large flange/control box/mirror/connectable/cleaning ball/hand hole (solid feeding)/spotlight/ 2) Optional: feeding tank (stainless steel / glass optional) / liquid level meter / condenser / reflux collection / pH value monitoring or control / frequency conversion control 1) Selection: 1. Hydraulic lifting 2. Automatic PLC control system 2) Selection: 1. Disperser 2. Homogeneous shear 3. Emulsifying device										

## ANEXO 6.

### FICHA TÉCNICA COMERCIAL DE EQUIPO DE ULTRAFILTRACIÓN



**DALIAN REYES IMPORT & EXPORT CO., LTD.**

Top quality  
Professional team  
Best service  
Welcome order

No. de Modelo:	TGUF.
Fuerza motriz:	Eléctrico.
Rendimiento:	Filtración eficiente.
Uso:	Protección ambiental, industria química.
Estilo:	Tubo.
Certificación:	CE.
Origen:	China.



Especificaciones del equipo

Modelo	Volumen de agua procesada (m <sup>3</sup> /h)	El rendimiento técnico	La alimentación (KW).	Entrada de tubo	Salida del tubo	Dimensiones (L x W x H)	Comentarios
TGUF-0.5	0.5	Presión: ≤0.2MPa Rango de PH: 5.5 ~ 8.5 Rango de temperatura de operación: 10~35 °C Tasa de recuperación: 90-95%	0.75	DN25	DN20	1600×700×1700mm	El equipo incluye el tratamiento previo depósito de FRP /
TGUF-1	1		1.1.	DN32	DN25	2000×700×1700mm	
TGUF-2	2		1.3	DN32	DN32	2500×1000×1700m m	
TGUF-3	3	La eliminación bacteriana	1.5	DN32	DN32	3000×1000×1700m m	
TGUF-5	5	Tasa: ≥ 99, 9%	1.75	DN50	DN40	3300×1000×1700m m	
TGUF-8	8	Adaptación la tensión: 380V 50Hz	2.1.	DN50	DN50	2500×1000×1800m m	Tamaño de la Host/ No incluye equipos de pretratamiento
TGUF-10	10		2.4	DN65	DN50	2800×1000×2000m m	
TGUF-15	15		4.8	DN65	DN65	2800×1200×2000m m	


## ANEXO 7.

### SEDIMENTADOR DE LAMAS PARA PROCESOS DE SEPARACIÓN DE TRES FASES



**Shanghai Ecopro Environmental Engineering Co. Ltd.**

Office add : RM1102 NO.211 Jingang Rd, Shanghai PR China 201206  
Factory add: Xibei High-Tech Industry Park ,Wuxi city Jiangsu Province







400-855-0715  
[www.ecoproseparation.com](http://www.ecoproseparation.com)

Método	Tratamiento físico
Marca	ECOPRO
Origen	Wuxi city, Provincia de Jiangsu

Uso	Industrial
Capacidad	1000 L
Capacidad de producción	500 sets/año

**Descripción:**

El decantador Lamas Sistema Se utiliza principalmente como el tanque de sedimentación primaria, la actual depuradora aprovechen las capacidades o amplía la capacidad para el tratamiento cuando La planta de tratamiento de aguas residuales está limitada por el espacio.