

**PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL LACTOSUERO
PROVENIENTE DE LA ELABORACIÓN DE QUESO RICOTTA POR MEDIO DE
SEPARACIÓN POR MEMBRANAS**

**LINA MARIA GARAVITO HERRERA
TATIANA MÉNDEZ SÁNCHEZ**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director:

**Nubia Liliana Becerra Ospina
Ingeniero Químico**

Codirector:

**Oscar Libardo Lombana Charfuelan
Ingeniero Químico**

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Felipe Correa Mahecha
Firma del Jurado

MEng. Luis Alberto Figueroa Casallas
Firma del Jurado

Bogotá D. C. Junio de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-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

Decano de Facultad

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa

Dra. 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.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, especialmente a mi mamá, por brindarme todo su apoyo a lo largo de estos 5 años, a mi abuelita por acompañarme siempre y darme todo su amor, sin ellas esto no hubiera sido posible, a mi papá por darme el apoyo durante toda la carrera.

Asimismo, agradezco a todas las personas que conocí a lo largo de la carrera, y a Dios por permitirme compartir con ellos. Finalmente quiero agradecer a mi compañera de tesis, por compartir conmigo este camino y lograr sacar este proyecto de la mejor manera.

-Lina María Garavito Herrera

DEDICATORIA

En primer lugar, doy gracias a Dios, el amor más grande de mi vida. Al forjador de mi destino, y la luz en mi caminar, quien guía mis pasos y me colma de su sabiduría. Sin él no habría sido posible.

A mis padres, Stella Sánchez y Guillermo Méndez, quienes me acompañaron a lo largo de mi formación profesional, por forjarme bajo sus principios, valores y virtudes para ser la persona que soy, por su voz de aliento y su esfuerzo para brindarme siempre lo mejor. Doy gracias a mi abuelito, por su amor incondicional y ser mi motor; que la vida nos permita seguir cumpliendo más logros a tu lado. Y a toda mi familia, por su apoyo y su confianza.

A las grandes personas que me permitió conocer la universidad, a mi mejor amiga Mariana Cerquera, por su nobleza y su compañía. A Nicolas Noy, por su amistad incondicional y sus enseñanzas. Fueron indispensables para superar momentos difíciles y compartir momentos inolvidables.

Finalmente, dedico este proyecto a las personas que me acompañaron en el transcurso de estos cinco años, quienes me brindaron su amor, su apoyo y su compañía, para hacer de la universidad un lugar increíble.

-Tatiana Méndez Sánchez

AGRADECIMIENTOS

En agradecimiento al **Gerente Jose Ricardo Rodríguez** por la oportunidad brindada, por suministrar la información y los recursos necesarios para llevar a cabo el presente proyecto.

A nuestra directora la **Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina** por compartir su conocimiento y experiencia para la realización de este proyecto, por su orientación a lo largo de nuestras carreras y en el desarrollo del presente proyecto, por su tiempo dedicado y cada una de las enseñanzas aportadas para nuestra formación personal y profesional.

A nuestro orientador y Codirector el **Ing. Oscar Libardo Lombana Charfuelan** por su amable colaboración y acompañamiento a lo largo de este proyecto, por sus sugerencias y recomendaciones para la culminación del trabajo de grado.

A la **Fundación Universidad de América** por su formación académica en el transcurso de estos años, a los docentes que fueron parte de nuestro aprendizaje y todo el personal que fueron partícipes de nuestra estadía.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
1. GENERALIDADES	18
1.1. La industria de productos lácteos	18
1.2. Elaboración de queso Ricotta	19
1.3 Lactosuero	21
<i>1.3.1. Aprovechamiento del lactosuero</i>	22
<i>1.3.2. Clasificación del lactosuero</i>	23
<i>1.3.3. Caracterización de lactosueros en general</i>	24
<i>1.3.4. Proteínas presentes en el Lactosuero</i>	26
1.4 Contaminación ambiental	32
1.5 Tecnología de Membrana	33
1.6 Membranas	35
2. LACTOSUERO PROVENIENTE DE LECHE DE BÚFALA	37
2.1. Industria de la leche de búfala	37
<i>2.1.1. Características fisicoquímicas de la leche de búfala</i>	37
2.2. Caracterización del lactosuero	41
<i>2.2.1. pH</i>	42
<i>2.2.2. Proteína</i>	43
<i>2.2.3. Densidad</i>	43
<i>2.2.4. Acidez</i>	43
<i>2.2.5. Humedad</i>	43

2.2.6. <i>Sólidos totales</i>	43
2.2.7. <i>Cenizas</i>	44
2.2.8. <i>Grasa</i>	44
3. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA	45
3.1. Tecnologías de membrana	45
3.1.1. <i>Ultrafiltración (UF)</i>	45
3.1.2. <i>Microfiltración (MF)</i>	47
3.1.3. <i>Nanofiltración (NF)</i>	49
3.1.4. <i>Ósmosis inversa (OI)</i>	50
3.1.5. <i>Electrodialisis (ED)</i>	51
3.1.6. <i>Características de las tecnologías de membrana</i>	51
3.2. Matriz de selección	52
3.2.1. <i>Método de análisis jerárquico (AHP)</i>	53
3.2.2. <i>Criterios de selección</i>	54
3.2.3. <i>Elaboración de la matriz</i>	56
3.2.4. <i>Resultados método análisis jerárquico</i>	60
4. CONDICIONES DE TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA	63
4.1. Variables y parámetros que influyen en la separación	63
4.1.1. <i>pH</i>	63
4.1.2. <i>Presión transmembranaria (PTM)</i>	63
4.1.3. <i>Flujo de permeado</i>	64
4.1.4. <i>Material y configuración de las membranas</i>	64
4.1.5. <i>Orientación de la corriente de alimentación</i>	73
4.1.6. <i>Concentración de solutos retenidos</i>	74
4.1.7. <i>Viscosidad</i>	77

4.1.8. <i>Temperatura</i>	77
4.1.9. <i>Mantenimiento y limpieza</i>	77
4.2. Selección de condiciones de operación para MF y UF	79
4.2.1. <i>Antecedentes</i>	79
4.2.2. <i>Condiciones de Microfiltración</i>	89
4.2.3. <i>Condiciones de Ultrafiltración</i>	91
4.3. Proyección global teórico	94
5. APROVECHAMIENTOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS EN LA SEPARACIÓN POR MEMBRANA	98
5.1. Aplicaciones de las proteínas del lactosuero	98
5.1.1. <i>Aplicaciones del concentrado proteico (WPC)</i>	98
5.2. Aplicaciones del permeado de ultrafiltración	109
6. CONCLUSIONES	112

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Proceso de elaboración del queso Ricotta	20
Figura 2. Estructura de la β -Lactoglobulina	27
Figura 3. Estructura de la α -Lactoalbúmina	29
Figura 4. Estructura de la BSA	30
Figura 5. Estructura de las inmunoglobulinas	31
Figura 6. Procesos de separación TM para líquidos y gases	34
Figura 7. Clasificación de las membranas	36
Figura 8. Relación de pesos moleculares promedio de proteínas de lactosuero	46
Figura 9. Selectividad del proceso de Nanofiltración	49
Figura 10. Propuesta de tecnologías de membranas seleccionadas	62
Figura 11. Estructuras de poro de las membranas	67
Figura 12. Corte transversal de una membrana asimétrica	68
Figura 13. Módulo plano	69
Figura 14. Módulo en espiral	70
Figura 15. Membrana de módulo tubular	72
Figura 16. Módulos de fibra hueca	73
Figura 17. Espaciadores para reducir el fenómeno de concentración por polarización	74
Figura 18. Fenómeno de polarización	76
Figura 19. Proyección global del sistema de MF y UF	95
Figura 20. Actividad de patentamiento de las principales tendencias tecnológicas	106
Figura 21. Impacto industrial de las principales tendencias tecnológicas de aprovechamiento	107

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Resultados estandarización de datos sobre la caracterización del lactosuero	25
Tabla 2. Principales proteínas presentes en el lactosuero de búfala	26
Tabla 3. Pesos moleculares de las proteínas	32
Tabla 4. Clasificación de las tecnologías de membranas	35
Tabla 5. Caracterización de leche de búfala vs leche de vaca	38
Tabla 6. Perfil de aminoácidos de la leche de búfala	40
Tabla 7. Caracterización Lactosuero queso Ricotta	42
Tabla 8. Características de las tecnologías de membrana	51
Tabla 9. Criterios de selección tecnologías de membrana	56
Tabla 10. Matriz principal comparación de criterios de selección	57
Tabla 11. Valores de consistencia de criterios de selección	58
Tabla 12. Escala de importancia relativa de Saaty	59
Tabla 13. Resultado matriz de selección tecnologías de membrana	60
Tabla 14. Condiciones de operación antecedentes	85
Tabla 15. Selección de condiciones de operación	94
Tabla 16. Comparación producción de Helados Fábrica Belén vs Competencia	102

RESUMEN

En el presente proyecto se proponen las alternativas para el aprovechamiento para del lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta por medio de separación por membranas. El lactosuero alcanza aproximadamente los 8.750 L al mes para la empresa, cuya disposición final es dirigida hacia los vertimientos, ocasionando serios problemas de corrosión y contaminación de los cuerpos hídricos; desaprovechando la oportunidad de generar un valor agregado a este subproducto, que al mismo tiempo minimice el impacto al medio ambiente.

Para el desarrollo de este proyecto se realizó la caracterización de este lactosuero identificando el componente de interés para su recuperación, como lo son las proteínas, obteniendo un valor de 0,8 g/100g en el lactosuero. De esta manera, se seleccionan las tecnologías de membrana que faciliten su separación, determinando los criterios de evaluación contemplados en el método de análisis jerárquico para las tecnologías de microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración. Como resultado se elige la microfiltración como etapa de pretratamiento y la etapa de ultrafiltración para la recuperación de proteínas.

Se establecieron las condiciones de operación para las tecnologías seleccionadas por medio de la revisión bibliográfica de las experimentaciones realizadas por los diferentes autores para la recuperación de proteínas séricas contenidas en el lactosuero, analizando cada una de las variables y parámetros que influyen en la separación por membranas. Como es el caso de: el pH, presión transmembranaria, material y configuración de las membranas, orientación de la corriente de alimentación, concentración de solutos retenidos, viscosidad, temperatura, mantenimiento y limpieza.

Por último, se estudiaron los principales aprovechamientos de los productos obtenidos de las tecnologías de membrana. En primer lugar, se estableció el uso potencial del retenido de la etapa de ultrafiltración correspondiente a las proteínas, conocidas comercialmente como concentrados proteicos y, en segunda instancia, se propone la valorización de la corriente de permeado proveniente de la ultrafiltración.

Palabras clave: Lactosuero, Leche búfala, separación membranas, microfiltración, ultrafiltración.

INTRODUCCIÓN

La Empresa que proporcionó el lactosuero objeto de estudio en este proyecto, es una compañía dedicada a la producción y comercialización de quesos, ofreciendo gran variedad de productos al consumidor, empleando como materia prima principal la leche de búfala. Su planta de producción se encuentra ubicada en el municipio de Chía, Cundinamarca.

En el proceso de producción la leche es sometida a tratamientos de pasteurización, estandarización, coagulación, agitación, corte, desuerado e hilado para la obtención de quesos. Producto de la fabricación de quesos se obtiene un subproducto denominado lactosuero, que representa alrededor del 85-90% del volumen de la leche empleada en el proceso. Este lactosuero presenta un alto contenido de nutrientes no aprovechados correspondientes a proteínas y minerales; que es dirigido hacia los vertimientos, generando un impacto ambiental por la contaminación de los cuerpos de agua al presentar grandes cantidades de materia orgánica.

Actualmente se ha evidenciado un incremento en la búsqueda de alternativas para la valorización de este subproducto. Identificando una oportunidad de aprovechamiento, con el fin de recuperar los compuestos de interés del lactosuero, y disminuir el impacto ambiental ocasionado; generando de esta manera un nuevo ingreso para la empresa por la incursión de un nuevo producto.

Por esta razón, en pro de la sostenibilidad y tratamiento de este subproducto, se hace la propuesta de utilizar tecnologías de membrana para la recuperación de compuestos que representen un valor agregado para la industria, teniendo en cuenta las diversas aplicaciones que presentan estas tecnologías en la separación de compuestos de distintos tamaños y pesos moleculares.

El presente proyecto expone las diferentes alternativas de aprovechamiento de los productos resultantes de la separación por membranas del lactosuero obtenido de la elaboración de queso Ricotta, realizando una propuesta de valorización para la empresa.

En la selección de las diferentes tecnologías de membrana se empleó el método de análisis jerárquico evaluando los diversos criterios de selección. Las condiciones para la operación de estas tecnologías fueron seleccionadas de manera bibliográfica.

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer alternativas para el aprovechamiento del lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta por medio de separación por membranas.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades del lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta.
- Seleccionar la tecnología de membranas para la separación de compuestos de interés identificados en la caracterización.
- Determinar los parámetros y condiciones para la separación por membranas.
- Describir los posibles aprovechamientos de los productos obtenidos por la separación por membranas.

1. GENERALIDADES

Con el fin de contextualizar el presente proyecto, se mencionan algunos conceptos básicos de los componentes del lactosuero y tecnologías de membrana, lo anterior con la finalidad de guiar el proyecto hasta el cumplimiento de los objetivos propuestos.

1.1 La industria de productos lácteos

La industria alimentaria es uno de los sectores productivos que mayor impacto tiene sobre el medio ambiente, bien sea por sus procesos productivos o por los diferentes productos que salen del mercado. En este caso se realiza énfasis en la industria láctea. [1]

La industria láctea cuenta con gran variedad de productos. Sin embargo, a través de la fabricación de estos se generan diversos residuos, tanto sólidos, como atmosféricos y efluentes líquidos. Dentro de las emisiones se pueden encontrar, los gases de las calderas y material particulado; en cuanto a los residuos sólidos, principalmente corresponden a materiales de empaque y productos no conformes. No obstante, la principal repercusión de la contaminación de esta industria corresponde a los efluentes hídricos, ocasionada por los vertimientos generados en los procesos productivos como en la producción de queso y la mantequilla, afectando el recurso hídrico por la presencia de grasas, proteínas, sales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos de los diferentes procesos en las aguas residuales. [1]

El principal subproducto en esta industria y que cuenta con mayor volumen de producción es el lactosuero, en Latinoamérica el 50% de las queserías procesan al menos de 10.000 litros de leche por día, donde se estima que anualmente se generan alrededor de 17.000 millones de litros de suero provenientes de empresas pequeñas y medianas (pymes). En el año 2012, la producción de leche en Argentina fue de aproximadamente 11.338 millones de litros, el 41% de la producción de leche se destinó a la elaboración de quesos generando un total de 4.015 millones de litros de suero por año, de los cuales solo el 45% fue procesado para la obtención de productos con valor

agregado, mientras que el resto se utilizó para alimentación animal o vertido como efluente líquido.[2]

En el caso de Colombia en el año 2013, se estima que solamente un 45% de la leche se procesó en productos por canales formales registrados, el 35% del total de la producción de leche fue destinado a la elaboración de quesos, generando un total de 2.033.000.000 de litros de lactosuero por año en los cuales se estima que el 70% se utiliza como alimentación animal o fue vertido como efluente líquido.[2]

En el caso de las pequeñas y medianas empresas (pymes) queseras el suero generado es comúnmente utilizado para alimentación animal o desechado como efluente líquido, algunas queserías producen queso Ricotta como alternativa de uso del suero dulce, aprovechando solamente las propiedades nutricionales de las proteínas. [2]

1.2 Elaboración de queso Ricotta

El queso es un producto lácteo que ha jugado y juega un rol importante en la nutrición humana desde hace varios siglos. El propósito ha sido hacer un producto menos perecedero y que preserve sus nutrientes. Para su elaboración, se remueve el agua o suero de la leche, se precipitan los sólidos en forma de cuajada y finalmente se realizan operaciones de corte, salado, maduración, entre otras. [3]

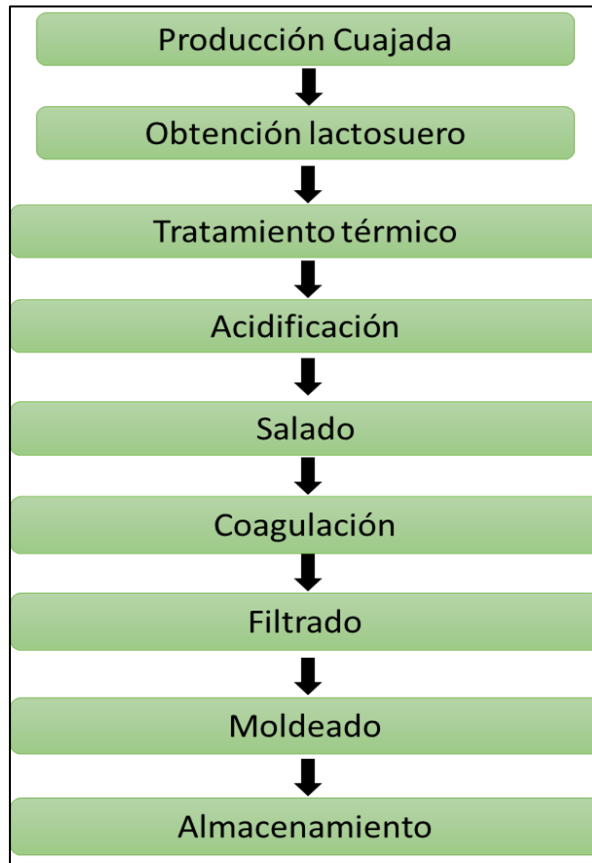
En la actualidad, se cuenta con gran diversidad de quesos en el mercado. En el presente proyecto se basa únicamente en el tipo de queso Ricotta. Obtenido a partir del precipitado de proteínas séricas, albumina y lactoglobulina que atrapan en su estructura a la lactosa y a la materia grasa remanente en el suero de quesería, obteniéndose por cada 100 kilogramos de suero entre 4 y 5 kilogramos del producto, se compone aproximadamente de 68,3% de agua, 14,9% de proteínas, 12,6% de grasa, 2,7% de carbohidratos y 1,5% de minerales[2].

La Empresa trabaja de lunes a viernes de 8 de la mañana a 5 de la tarde, es decir opera 8 horas por día para un total de 40 horas semanales, su volumen de producción

de lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta varía desde los 400 a 600 L/día, con un aproximado de 8.750 L de lactosuero al mes.

Figura 1.

Proceso de elaboración del queso Ricotta.



Nota. En la figura se representa las etapas de la producción del queso Ricotta para La Empresa.

En la Figura 1 se presenta el proceso de producción del queso Ricotta para La Empresa soporte, el cual consiste inicialmente en emplear como materia prima el lactosuero proveniente de la elaboración de cuajada, en una proporción aproximada del 98,5%. Posteriormente, se realizan análisis de pH y acidez como parámetros iniciales. Seguidamente, se lleva a una marmita a una temperatura inicial de 25°C, donde se realizará un aumento en su temperatura hasta alcanzar los 70°C.

Luego de haber alcanzado dicha temperatura se procede a agregar la leche en una proporción del 1% hasta incorporar la mezcla y nuevamente se lleva a un proceso de calentamiento hasta una temperatura de 82°C.

En seguida, se adiciona de manera circular el ácido cítrico en una concentración de 0,09% y se agita nuevamente. Consecutivamente, se adiciona sal en una cantidad de 0,35% sobre la superficie y se continúa agitando sin disminuir la temperatura. Cuando se observe la floculación de los sólidos del suero, se detiene el calentamiento agitando lentamente, obteniendo de esta manera el queso como producto final y como subproducto, el lactosuero que será analizado en el presente proyecto. Finalmente, el queso es llevado a moldeo donde pasará por el proceso de enfriamiento y empaque. El volumen de producción de La Empresa se encuentra aproximadamente en 100 kilogramos diarios de queso Ricotta y de 400 a 600 Litros de lactosuero.

Una de las etapas de producción consiste en la coagulación, allí por medio de la adición del cuajo, la leche se coagula, separándose en dos fases: Una fase sólida, denominada cuajada, que posteriormente se escurre y se prensa dando lugar finalmente al queso, por otro lado, un líquido amarillento denominado lactosuero, el cual representa el 85%-90% del volumen total de la leche procesada. [4]

1.3 Lactosuero

El lactosuero se caracteriza principalmente por ser rico en proteínas de alto valor biológico y lactosa, de coloración amarilla verdosa que comprende la fase hídrica de la leche conformada por sustancias disueltas siendo considerado un sustrato de interés [5]. El lactosuero (LS) es un subproducto, que se obtiene de la coagulación en la fabricación del queso o productos similares [6]. Aproximadamente el 90% del total de la leche utilizada en la elaboración del queso se elimina como lactosuero (LS), siendo este uno de los componentes más contaminantes que existen en la industria láctea. Debido al elevado contenido de materia orgánica. [6]

Por otra parte, existe suficiente evidencia científica que respalda las diversas propiedades físicas, químicas, nutricionales y biológicas de las proteínas y otros componentes del lactosuero. Este subproducto retiene cerca de 55% del total de ingredientes de la leche como la lactosa, proteínas solubles, lípidos, vitaminas y sales minerales, considerándose un subproducto con alto valor nutricional y con gran potencial de aprovechamiento. [6]

La cantidad y composición del lactosuero es muy variable debido a que depende de diversos factores, por ejemplo:

- El tipo de queso (4 L/kg en quesos frescos y hasta 11,3 L/kg en quesos madurados).
- El tratamiento térmico de la cuajada que puede disminuir el porcentaje de proteína del suero resultante.
- La forma de coagulación si se realiza por la adición de ácidos o enzimas.
- El cuajo empleado (microbiano, quimosina o mezclas quimosina/pepsina), que aporta amargor residual al LS por inactivación incompleta de las enzimas proteolíticas. [6]

1.3.1. Aprovechamiento del lactosuero

El lactosuero, subproducto de la fabricación de queso es uno de los vertimientos más contaminantes de la industria alimentaria, debido a su elevado contenido en materia orgánica. La presencia de lactosa es la principal responsable de este, gracias a su capacidad para actuar como sustrato de fermentación microbiana. [4]

Es así, como el aprovechamiento de este subproducto constituye un tema prioritario debido a que presenta un mayor grado de desarrollo, dado los grandes volúmenes generados por la industria quesera, además del valor nutricional de sus componentes que puede ser aprovechado. Pese a esto, el grado de aprovechamiento es relativamente escaso. [7]

Se han realizado varias investigaciones con el objetivo de encontrar alternativas de uso para este subproducto. Las alternativas de transformación en subproductos van

desde suero en polvo, concentrados proteicos [4], procesos fermentativos, ácidos grasos, ácidos orgánicos, alcoholes, bebidas, queso Ricotta entre otros. [7]

1.3.2. Clasificación del lactosuero

La composición del lactosuero no sólo puede depender de los factores mencionados anteriormente, sino, de manera muy significativa, del pH. Clasificándose de la siguiente manera:

1.3.2.a. Lactosuero dulce. Posee un pH entre 5,6 y 6,3, es obtenido como subproducto de la elaboración de quesos duros, semiduros y ciertos quesos blandos en los cuales es utilizado el cuajo como insumo principal. Este tipo de suero se obtiene generalmente de la precipitación de las proteínas por hidrólisis específica de la k-caseína, por coagulación enzimática. Con pH próximo al de la leche inicial y sin variación de la composición mineral. [6]

1.3.2.b. Lactosuero ácido. Presenta un pH que oscila entre los 4,4 a 5,1 y es obtenido al precipitar la caseína y formar el cuajo mediante la adición de algún tipo de ácido como, por ejemplo: el ácido láctico o el ácido cítrico. [8]

Cerca del 50% de los nutrientes contenidos en la leche están presentes en el lactosuero entre los que se encuentran una proporción importante de proteínas hidrosolubles, lactosa, vitaminas, minerales y grasas, entre ellos se destacan la lactosa en un promedio de 4,5 - 5% p/v y las proteínas solubles en 0,6- 0,8 p/v. [9]

En Colombia para el año 2013 el 35% del total de la producción de leche fue destinado a la elaboración de quesos, generando un total de 2.033 millones de litros de suero por año, de los cuales se estima que el 70% se utilizó como alimentación animal o fue vertido como efluente líquido. [2] La empresa para la que se está desarrollando este proyecto, actualmente, no realiza ningún tratamiento para el lactosuero, dirigiéndose directamente hacia los vertimientos. Es importante llevar a cabo este proyecto, debido a que, al presentarse eventuales auditorías ambientales, la empresa se puede ver perjudicada al

no efectuar el cumplimiento de la Norma establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible según la Resolución 631 del 2015, donde establece los parámetros y valores permisibles en los vertimientos puntuales de los cuerpos de agua, debido a que no se realiza ningún tratamiento para el vertimiento de agua para la medición de parámetros contaminantes.

Por consiguiente, es relevante considerar alternativas para la valorización del lactosuero, al ser un subproducto con alto potencial de aprovechamiento. Considerando su valor nutritivo, el lactosuero puede aportar niveles de fósforo, sodio, calcio, potasio, magnesio y manganeso como minerales, y vitaminas B, C, E y D para el ser humano. [9]

Según diferentes investigaciones, el lactosuero se ha empleado en diversos procesos industriales, basados en su valor nutricional para la comercialización y desarrollo de productos tales como etanol, ácido láctico, bebidas fermentadas, ácidos orgánicos, biomasa, concentrados, aislados e hidrolizados de proteína, películas comestibles, entre otros. [9]

1.3.3. Caracterización de lactosueros en general

Dentro de las caracterizaciones consultadas para el lactosuero se tomó como referencia los valores registrados en la tesis “Determinación de una alternativa viable para el aprovechamiento del lactosuero generado por la empresa quesillos armero guayabal”, donde se realizó una estandarización sobre las características físicas y químicas de lactosueros producidos en diversos países como Australia, Bélgica, Brasil, Nueva Zelanda, entre otros, realizada por los autores Carvalho, Prazeres y Rivas sobre los principales parámetros para la caracterización de lactosuero proveniente de lugares internacionales. [10] Como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Resultados estandarización de datos sobre la caracterización del lactosuero.

pH/EC	Lactose/LA	Proteins	Fats and oils	Mineral salts	BOD ₅	COD	BOD /COD	TS	TSS
5	-	-	-	-	40 - 60	75.8	0.53 - 0.79	56.8	21.82
-	-	-	-	-	-	68.8 ± 11.5	-	3.19 ^b	1.3 ± 1.14 ^b
-	45-50/0.5	6 - 8	4 - 5 ^d	8 - 10 ^a	30 - 50	60 - 80	0.50 - 0.63	-	-
3.92	-	-	-	-	-	74.5 ± 0.4	-	-	9.4 ± 0.5
4.9	50	-	-	-	-	74.2	-	66.83	22.15
4.5-5.0	-	-	-	-	-	73 - 86	-	-	20 - 22
-	3.9 ^a	0.72 ^a	0.79 ^a	0.46 ^a	-	-	-	5.87	-
4.2	49.2	-	-	-	-	102.1	-	70.9	-
3.8 - 6.3	-	-	-	-	35.5 - 46.0 ^c	60.3 - 66.7	-	-	4.1 - 10.0
4.9 ± 0.3	45.9 ± 0.88	2.71 ± 0.05	9.44 ± 1.14	-	-	68.6 ± 3.3	0.55	5.93 ± 0.38	1.35 ± 0.06
-	43.92	1.42	0 ^a	6.1	37.7 ± 2.8	100	-	-	-
5.8	-	-	0.99	-	29.5	73.4	0.4	-	7.2
4.46 ± 0.3 - 7.6 ± 0.15	-	125 ± 2 ^b	0.9 ± 0.5 ^a	-	40 ± 2.55	60 ± 10	0.67	59 ± 0.5	1.5 ± 0.23
4.7	42.6	-	-	-	-	86.3	-	-	6.9
6.0 - 6.5	50 - 60	-	-	-	27 - 36	50 - 70	0.51 - 0.54	55 - 65	10 - 15

Nota. La tabla muestra la caracterización del lactosuero recopilada por fuentes internacionales. Los parámetros se encuentran expresados en g/L con excepción de: BOD5/COD (adimensional); a (%); b (g/kg); c (como BOD7); d (como lípidos). Tomado de: J. S. Nafar Rodríguez y A. M. Galeano Ortiz, Determinación de una alternativa viable para el aprovechamiento del lactosuero generado por la empresa quesillos armero guayaba, tesis pre., Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8312/1/6161806-2021-1-IQ.pdf>

1.3.4. Proteínas presentes en el Lactosuero

Tabla 2.

Principales proteínas presentes en el lactosuero de búfala.

Principales proteínas	Características
β – Lactoglobulina	<ul style="list-style-type: none">• Representa el 46% de proteínas totales de lactosuero• Compuesto de 162 aminoácidos
α – Lactoalbúmina	<ul style="list-style-type: none">• Comprende principalmente entre 20 – 25% de las proteínas totales• Gran afinidad en minerales como calcio, magnesio, zinc y aluminio.

Nota. La figura representa las principales proteínas presentes en la leche de búfala. Tomado de: N. Monroy Pedraza, «Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración, tesis, pre. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia», 2020 [En línea] Disponible: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1719&context=ing_alimentos

Las principales proteínas séricas están altamente estructuradas, por lo tanto, son susceptibles de ser desnaturalizadas. Las proteínas no constituyen la fracción más abundante del lactosuero, no obstante, son las de mayor interés a nivel económico y nutricional, las proteínas poseen diversas propiedades dentro de las que se encuentran: la solubilidad, hidratación, textura y consistencia, formación de espuma y propiedades de gelificación, entre otras.[11] Observando un alto potencial de aprovechamiento.

1.3.4.a. β -Lactoglobulina (β -Lg). Es la proteína más abundante en el lactosuero bovino, en el que alcanza concentraciones de 2 a 4 mg/mL, representando alrededor de la mitad de las proteínas del lactosuero. En términos de masa, constituye cerca del 50% de las

proteínas del lactosuero. También se encuentra presente en la leche de otras especies, como la equina y la porcina, sin embargo, no se encuentra en la leche humana.

Está formada por una sola cadena de 162 aminoácidos, con un peso molecular aproximado de 36 kDa, en forma de dímero. [6] La β -Lg de los rumiantes se presenta en forma de dímeros con los monómeros unidos de forma no covalente. Estos dímeros se forman entre pH 7,5 y pH 5,2, el punto isoeléctrico de la β -Lg. Por encima de pH 7,5 y por debajo de pH 3,5, la β -Lg se encuentra en forma de monómeros, mientras que entre pH 5,2 y pH 3,5 se encuentra en forma de octámeros. La β -Lg se desnaturaliza con relativa facilidad por el calor, especialmente en ausencia de ligandos asociados. [6] La β -Lactoglobulina cuenta con diversas aplicaciones, como, por ejemplo, emulsificante, espumante y gelificante. [6]

Figura 2.

Estructura de la β -Lactoglobulina.



Nota. En la figura se representa la estructura tridimensional de la proteína β -Lg. Tomado de: M. Almecija, "Obtención de lactoferrina bovina mediante ultrafiltración del lactosuero," Univ. Granada, pp. 1–315, 2007, [En línea]. Disponible: <http://ddd.uab.cat/pub/landes/11394218v7p196.pdf>

1.3.4.b. α -Lactoalbúmina (α -La). Es una proteína que se encuentra en la leche de casi todas las especies. Esta proteína constituye cerca del 20% de la masa de las proteínas del Lactosuero. Es considerada la segunda proteína en mayor proporción en el Lactosuero bovino (entre 1 y 1,5 mg /mL), y la más abundante en el lactosuero humano. [6]

La α -La es una proteína formada por una sola cadena polipeptídica de 123 componentes aminoacídicos. Es una proteína ácida con un punto isoeléctrico de alrededor de 4,8. Tiene un peso molecular aproximado de 14 kDa. Es mucho más flexible, aunque sus puentes disulfuro la mantienen en forma de un elipsoide compacto. Tiene mayor capacidad de retención de agua (0,06g/g de proteína). [6]

Es empleada en la industria farmacéutica, principalmente en las fórmulas infantiles, donde puede llegar a reemplazar la albúmina de huevo en los productos alimenticios; se utiliza como aditivo en bebidas energéticas o en productos a base de carne y pescado.[12]

Figura 3.

Estructura de la α -Lactoalbúmina



Nota. En la figura se representa la estructura tridimensional de la proteína α -La. Tomado de: M. Almecija, “Obtención de lactoferrina bovina mediante ultrafiltración del lactosuero,” Univ. Granada, pp. 1–315, 2007, [En línea]. Disponible:
<http://ddd.uab.cat/pub/landes/11394218v7p196.pdf>.

1.3.34.c. Seroalbúmina (BSA). La seroalbúmina bovina es una de las proteínas más abundantes en el sistema circulatorio sanguíneo. Sirve de transporte de los ácidos grasos, insolubles en el plasma sanguíneo; aísla radicales libres de oxígeno o inactiva metabolitos lipófilos que son tóxicos. [12]

Su tamaño es relativamente grande, aproximadamente 66000-69000 g/mol, conformada por una cadena de 583 aminoácidos. Al igual que la α -lactoalbúmina y la β -lactoglobulina, es una proteína ácida, presentando carga neta nula a valores de pH entre 4,7 y 4,9. Su estructura tridimensional Figura 4. está compuesta por tres dominios, cada

uno de ellos formado por diez segmentos helicoidales. Su estructura secundaria, en su forma nativa, es principalmente alfa-helicoidal y contiene 17 puentes disulfuro.[12]

La BSA es muy utilizada tanto en la industria alimentaria como para fines terapéuticos, como para otras aplicaciones, especialmente por sus principales propiedades como: capacidad espumante, propiedades gelificantes y capacidad de enlazar ligandos. La primera de ellas es consecuencia de que su difusión a través de la interfase aire-agua le permite reducir la tensión superficial, creando y estabilizando las emulsiones. En esta interfase, las moléculas de BSA se desdobl原因 parcialmente y se asocian para producir una película intermolecular elástica. [12]

Figura 4.

Estructura de la BSA.

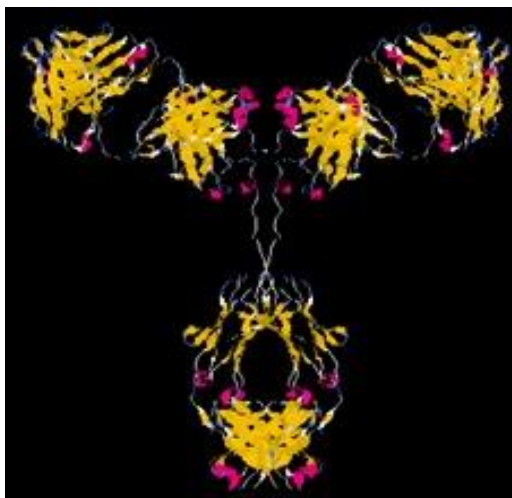


Nota. En la figura se representa la estructura tridimensional de la proteína BSA. Tomado de: M. Almecija, “Obtención de lactoferrina bovina mediante ultrafiltración del lactosuero,” Univ. Granada, pp. 1–315, 2007, [Online]. Available: <http://ddd.uab.cat/pub/landes/11394218v7p196.pdf>.

1.3.4.d. Inmunoglobulinas. Son glicoproteínas cuya función esencial consiste en la unión de un antígeno. Cuando las inmunoglobulinas detectan los antígenos, se unen a ellos y actúan de transductores de la información. [12]

Las inmunoglobulinas tienen un punto isoeléctrico entre 5,5-8,3 y un peso molecular que varía entre 150.000-1.000.000 g/mol. Están formadas por cadenas polipeptídicas agrupadas, dependiendo del tipo de inmunoglobulina, en una o varias unidades estructurales básicas.[12] Cada unidad estructural básica tiene forma de “Y” como se puede observar en la Figura 5 y está compuesta por dos cadenas de bajo peso molecular, denominadas cadenas ligeras o cadenas L; y otras dos de alto peso molecular, llamadas cadenas pesadas o cadenas H. Las cadenas ligeras están formadas por unos 200 aminoácidos, mientras que las pesadas poseen unos 400 aminoácidos. Cada cadena ligera está unida a una cadena pesada por un puente disulfuro, mientras que las cadenas pesadas, que están glicosiladas, se unen entre sí mediante dos puentes disulfuro. [12]

Figura 5.
Estructura de las inmunoglobulinas.



Nota. En la figura se representa la imagen de inmunoglobulinas. Tomado de: M. Almecija, “Obtención de lactoferrina bovina mediante ultrafiltración del lactosuero,” Univ. Granada, pp. 1–315, 2007, [En línea]. Disponible: <http://ddd.uab.cat/pub/landes/11394218v7p196.pdf>.

Tabla 3.

Pesos moleculares de las proteínas.

Proteína	Peso molecular (g/mol)	Peso molecular (kDa)
α -LA	14000	14
β -LG	18000	18
BSA	66000	66
Inmunoglobulinas	150000	150

Nota. En la tabla se presenta la recopilación los diferentes pesos moleculares de las proteínas presentes en el lactosuero.

1.4 Contaminación ambiental

Los principales aspectos medioambientales de la industria láctea se centran en el elevado consumo de agua y energía, la generación de aguas residuales con alto contenido orgánico y gestión de residuos; cabe destacar que la cuantificación de estos aspectos puede variar entre unas instalaciones y otras en función de factores como el tamaño y antigüedad de la instalación, equipos y planes de limpieza. [13]

El problema medioambiental con mayor relevancia que presenta la industria láctea es la generación de aguas residuales, tanto por su volumen como por la carga contaminante asociada, se ha estimado que el 90% de la DQO de las aguas residuales de una industria láctea es atribuible a componentes de la leche y solo el 10% a suciedad ajena a la misma. Generalmente los efluentes líquidos de esta industria presentan alto contenido de materia orgánica, presencia de aceites y grasas, niveles elevados de nitrógeno y fosforo, variaciones importantes del pH. [13]

La disposición del lactosuero es una de las grandes problemáticas de la industria Láctea, la continua descarga de este subproducto en los ecosistemas genera un impacto en la estructura física y química de los suelos, reduciendo los rendimientos de cultivos y provocando serios problemas de contaminación de agua subterránea. Adicionalmente,

desechar el lactosuero no solo representa un problema ecológico, sino que también implica un gran desperdicio de nutrientes al ser un subproducto no aprovechado. [11]

En la actualidad, el lactosuero ha mostrado un crecimiento exponencial en los estudios que buscan valorizar este subproducto, según el análisis realizado por *J. Nafar, et al.*, indica que a partir del año 2016 ha incrementado las investigaciones con relación a su aprovechamiento, en especial los últimos 3 años. [10]

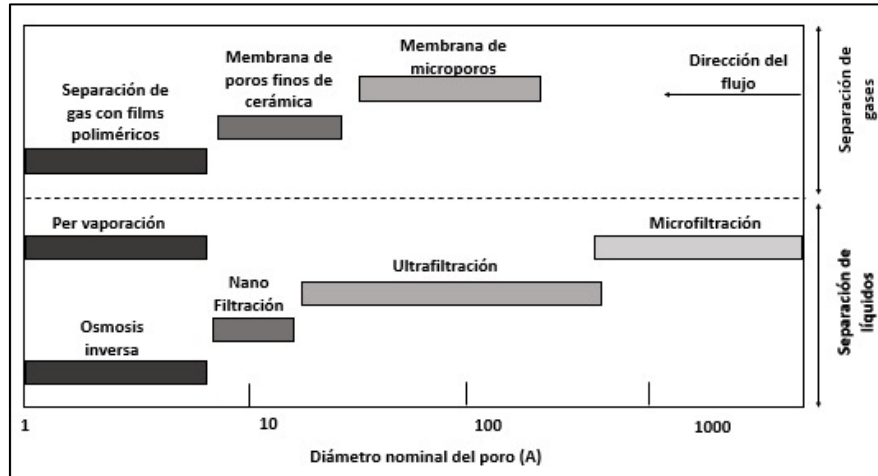
1.5 Tecnología de Membrana

Las tecnologías de membrana han representado aplicaciones en las diferentes industrias, como en la obtención de proteínas del lactosuero, la desalinización del agua de mar, la limpieza de aguas residuales, la obtención de componentes volátiles a partir del café soluble, entre otras [14]. Las Tecnologías de Membranas (TM) son métodos de filtración de solutos disueltos en un fluido, cuyo fundamento es la separación por la diferencia de los pesos moleculares y el tamaño de partícula. [15]

Los procesos de separación por membrana se clasifican de acuerdo al tamaño de las partículas o de las moléculas que son capaces de retener, en el caso de los líquidos los procesos de separación pueden ser la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, per vaporación y electrodiálisis, mientras que en el caso de los gases existen diferentes tipos de separación a través de membranas de microporos de diferentes tamaños de poro y películas poliméricas como se observa en la Figura 6. [15]

Figura 6.

Procesos de separación TM para líquidos y gases.



Nota. La figura representa la clasificación de los procesos de separación por membrana de líquidos y gases según el diámetro nominal del poro. Tomado de: B. E. P. Muñoz, “Tecnologías de Micro y Ultrafiltración Aplicadas en Procesos Alimentarios,” tesis pre, Facultad de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional de San Martín Tarapoto, 2005. [En línea] Disponible en: <http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3128/FIAI%20-%20Eduardo%20Pe%c3%b1a%20Mu%c3%b1oz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

De esta manera, la corriente de entrada al proceso de separación por membranas (corriente alimento) se divide en dos corrientes: aquella que contiene las sustancias que han atravesado la membrana (permeado) y la corriente que contiene los compuestos que han quedado retenidos sobre la membrana (rechazo). Para que esta separación tenga lugar, las membranas se ven sometidas a la acción de una fuerza impulsora: presión, presión parcial, potencial eléctrico o concentración.[16]

De acuerdo con el presente proyecto las tecnologías a considerar corresponden a la separación por membrana de líquidos, cuya principal fuerza impulsora corresponde a la diferencia de presiones como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.

Clasificación de las tecnologías de membranas.

Tecnología	Principio Impulsor	Diámetro de Poro	Ejemplos
Microfiltración	Presión	10 – 0,1 μm	Células microbianas, grandes coloides, partículas pequeñas, etc.
Ultrafiltración	Presión	< 0,1 μm – 5nm	Proteínas, emulsiones, coloides macromoleculares.
Nanofiltración	Presión	1nm	Compuestos orgánicos y sales disueltas.
Osmosis inversa	Presión	< 1nm	Pequeños compuestos orgánicos, sales disueltas.
Electrodialisis	Potencia eléctrico	< 5nm	Sales disueltas.

Nota. La tabla expone la clasificación de las tecnologías de membrana según el principio impulsor, diámetro de poro de la membrana y aplicación de la tecnología. Tomado de: M. C. Feijó, “Microfiltración tangencial,” Enfoque UTE, vol. 3, no. 1, pp. 01–07, 2012, [En línea].

Disponible:

<http://www.ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/index.php/revista/article/view/5>.

1.6 Membranas

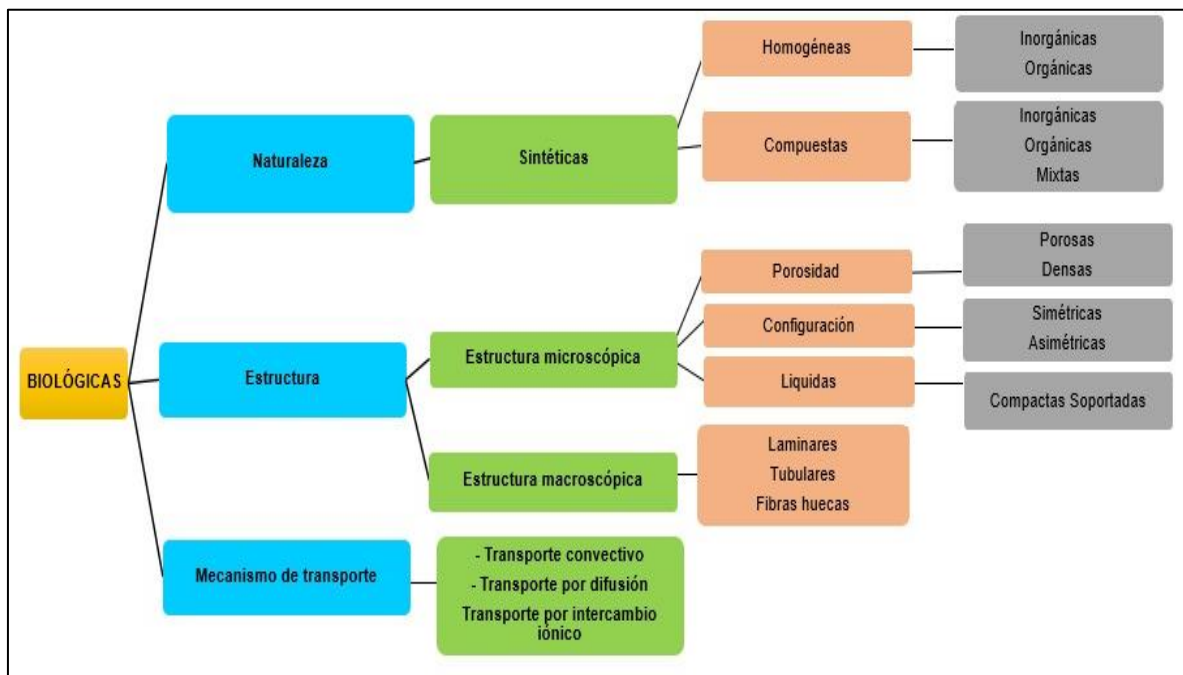
Las membranas son estructuras semipermeables, que facilitan el paso de determinados componentes y evita o restringe el paso de otros. En la bibliografía se describen de acuerdo con el tamaño de poro, como unidad de medida se pueden encontrar en micrómetros, Angstroms y Daltons. Teniendo en cuenta que, un micrómetro (μm) equivale a mil Angstroms (Å), mientras que, la medida denominada como Dalton

corresponde a una unidad de masa, utilizada para expresar la masa de átomos y moléculas. Es decir, es una medida de pesos moleculares de la corriente filtrante. [17]

El transporte de componentes a través de la membrana se realiza siempre aplicando una fuerza impulsora. Para el caso de la nanofiltración se da por la acción de la presión transmembrana (PTM) que consiste en la diferencia de presión entre el lado del retenido y el del permeado de la membrana. La membrana posee un espesor pequeño comparado con su superficie que, cuando se interpone entre dos fases fluidas macroscópicas, ejerce un control selectivo de las transferencias de materia o de energía entre ellas. [15] Una posible clasificación toma como punto de partida tres enfoques distintos: su naturaleza, su estructura y su mecanismo de transferencia, tal como se muestra en la siguiente figura. [18]

Figura 7.

Clasificación de las membranas.



Nota. En la figura se representa la clasificación de las membranas según su naturaleza, estructura y mecanismo de transporte. Tomado de: Á. F. Ruiz, “Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM. tesis maestría, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid. [En línea] Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38460/TFM-G979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

2. LACTOSUERO PROVENIENTE DE LECHE DE BÚFALA

En el presente capítulo se realiza la contextualización y caracterización del lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta a partir de leche de búfala.

2.1. Industria de la leche de búfala

La leche es uno de los alimentos que presentan mayor consumo a nivel global, se caracteriza principalmente por su contenido de nutrientes, como: proteínas, grasas, vitaminas y minerales, necesarias para la nutrición humana. [19] Entre las vitaminas que contiene se pueden encontrar: la Vitamina B12 (riboflavina), la B1 (tiamina), y las vitaminas A, D, E y K liposolubles. Los minerales en mayor proporción son el calcio y el fósforo, su contenido de grasa corresponde a los triglicéridos, y respecto al contenido proteico; la proteína que se encuentra en mayor proporción en la leche es la caseína, [19] esta última relaciona su importancia en la fabricación de quesos.

La leche de búfala en los últimos años ha presentado un incremento en su producción, debido a su alta calidad y rendimiento en sus productos. En los últimos treinta años, el crecimiento de la producción de leche de búfala fue del 248,4%, en cambio la leche de vaca en ese mismo periodo apenas alcanzó el 40,5%, de cabra fue del 105,4% y la de oveja del 40,0%, lo que señala indiscutiblemente la importancia de la evolución de la lechería bubalina. [20]

Una de las principales ventajas que presenta la leche bubalina respecto a la leche de vaca corresponde a su rendimiento, según *Ménard et al.*, si se desea obtener 1 kilogramo de mantequilla se requerirían 14 kilogramos de leche de vaca, mientras que procesando leche de búfala para la misma cantidad de mantequilla se requieren 10 kilogramos. Disminuyendo de esta manera costos de producción en la materia prima, manteniendo así la calidad del producto final. [21]

2.1.1. Características fisicoquímicas de la leche de búfala

La leche de búfala tiene un valor altamente nutritivo, es excelente para la preparación de productos lácteos. En la actualidad, el consumidor ha mostrado una preferencia hacia

las variedades de quesos elaborados con leche de búfala, dejando atrás el consumo de productos lácteos de leche bovina. Uno de los principales productos es el queso Mozzarella, que adquiere características únicas y precios diferenciales al ser elaborado con leche bubalina.[22] Por esta razón, la leche de búfala muestra un valor agregado en comparación a la leche bovina, en lo que respecta a sus propiedades fisicoquímicas la leche de búfala presenta mayor cantidad de nutrientes aprovechables en la elaboración de productos como se muestra a continuación. [23]

Tabla 5.

Caracterización de leche de búfala vs leche de vaca.

Componente	Leche de Búfala	Leche de vaca
Agua (%)	82,04	87,17
Proteína (%)	4,36	3,47
Grasa (%)	7,64	3,9
Lactosa (%)	4,83	4,75
Minerales (%)	1,13	0,71
Energía Kcal	97	61
Sólidos totales (%)	17,96	12,83

Nota. En la tabla se presenta la comparación de las características fisicoquímicas de la leche de búfala respecto a la leche bovina. Tomado de: O. A. Aguilar Guerra, «Comparación química y sensorial de quesos frescos elaborados a base de leche entera de vaca y leche entera de búfala», Vet zoo.Umich.Mx, pp. 0-55, 2014, [En línea]. Disponible en: [http://www.vetzoo.umich.mx/phocadownload/Tesis/2008/Febrero/prevencion y tratamiento del distemper canino.pdf](http://www.vetzoo.umich.mx/phocadownload/Tesis/2008/Febrero/prevencion_y_tratamiento_del_distemper_canino.pdf).

La leche de búfala presenta mayor densidad y acidez titulable que la de vaca, pero valores similares de pH.[19]. La elevada acidez que presenta la leche bubalina con respecto a los registrados para leche bovina, se debe principalmente al contenido de caseína, otro aspecto al cual se atribuye los altos valores para la acidez obedece a las temperaturas del lugar donde se encuentre la búfala. [21] Por otra parte, se observa que

el contenido de grasa en la leche de búfala se puede ver influenciado por el ciclo de lactancia, método de ordeño, tipo de raza bubalina, alimentación del búfalo, condiciones ambientales y número de partos, entre otros factores. [21] Sin embargo, otros estudios señalan que la nutrición es considerada como el único factor que influye la composición de grasa en la leche de búfala.

Comparando los valores de grasa para leche de búfala con la leche de vaca, la leche de búfala duplica el contenido de grasa respecto a la de vaca, lo que implica que la leche bubalina tiene mayor cantidad de energía, por lo tanto, mayor contenido de calorías. [22] [24] Adicionalmente, en la fabricación de quesos, la leche de búfala presenta una ventaja, la etapa de coagulación es más rápida, debido a que los glóbulos grasos de la leche de búfala son de mayor tamaño (4,1 – 4,8 micras) que los de la leche de vaca (3,6 – 4,0 micras). [19] Esta característica es aprovechada para la elaboración de derivados lácteos ricos en grasa tales como la nata, manteca, crema y grasa clarificada. [24] No obstante, a pesar de presentar mayor contenido de grasa que en la vaca, representa significativamente un menor contenido de colesterol en el búfalo que en la materia grasa de leche de vaca. [24] En cuanto al color, presenta un tono blanco opaco debido a la ausencia de β -caroteno, ya que la búfala es capaz de metabolizar este pigmento en vitamina A. [19]

El contenido de proteína en leche de búfala se puede ver afectado por la alimentación del animal, puesto que puede influir en cambios de composición proteica.[21] Considerando que el contenido de proteínas es uno de los componentes más importantes en la industria láctea, debido a su aplicación en diversos procesos, como la fabricación de queso, siendo la leche de búfala rica en proteínas séricas y aminoácidos esenciales. En un estudio realizado en Córdoba, Colombia se obtuvo (3,86 a 4,24 % p/p) de proteína en la leche de búfala observando niveles más altos con respecto a leche procedente de vaca, sin embargo, en otros estudios no se observó diferencias significativas. [21] La principal diferencia reside en la mayor concentración de inmunoglobulinas en la leche de búfala, así como de lactoferritina. [19]. La composición

de los aminoácidos esenciales de la leche de búfala en comparación a la leche de vaca se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6.

Perfil de aminoácidos de la leche de búfala

Aminoácidos (g/g prot)	Leche	
	Búfala	Vaca
Lisina	10,30	8,22
Triptófano	1,11	1,48
Treonina	5,66	3,97
Cistina	0,42	0,91
Valina	8,40	5,29
Metionina	3,52	3,02
Isoleucina	7,36	4,50
Leucina	12,61	8,84
Tirosina	4,71	4,44
Fenilalanina	6,22	4,25

Nota. En la tabla se presenta el perfil de aminoácidos para la leche de Búfala. Tomado de: C. A. Bustamante Hinojosa, «Evaluación de la suplementación alimenticia en Bufalas (*Bubalus bubalis*), durante el primer tercio de la lactancia, en un sistema de producción en trópico húmedo, en zona ecología interandina en Colombia.», tesis maestría, Facultad de ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia. [En línea] Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10099>

Como se observa en la Tabla 6, la leche de búfala presenta mayor contenido de aminoácidos en comparación a leche de vaca. Según la bibliografía la leche de búfala tiene un 25,5 % más de aminoácidos esenciales que la leche de vaca, a excepción de cistina y triptófano.[24]

Asimismo, el contenido de minerales presentes en la leche de búfala es superior, comparado con la leche de vaca y de cabra. Para el contenido de Fosforo se observa que las leches de las 3 especies analizadas (búfala, vaca y cabra) poseen altos

contenidos del mineral comparados con la leche humana (150 mg/kg); sin embargo, la leche búfala posee mayor cantidad del mineral que las leches de cabra y vaca respectivamente, lo cual es de resaltar, debido a que el Fósforo es importante en la nutrición humana porque contribuye junto con las proteínas a la alta capacidad buffer del sistema digestivo, adicionalmente, la leche de búfala presenta mayor concentración de boro, hierro y manganeso que la de vaca.. [25] Respecto al contenido de vitaminas, la leche de búfala presenta mayores contenidos de vitamina A y antioxidantes como el tocoferol y el ácido ascórbico.[24]

Según estudios realizados por *Deepak Sahai* se puede observar que la leche de búfala posee un contenido de calcio superior a otras leches. Esto es muy importante teniendo en cuenta que la leche es uno de los principales alimentos que aporta calcio.

Debido a sus ventajas a nivel nutricional, y a su gran rendimiento a nivel industrial la leche de búfala es empleada para la producción de quesos, yogures, mantequilla, entre otros productos lácteos. Para este caso, la empresa hace uso de la leche de búfala al generar alto rendimiento en sus productos, manteniendo la calidad en sus productos. [24]

2.2. Caracterización del lactosuero

Para llevar a cabo la caracterización del lactosuero se tomó una muestra de 500 ml de éste en la etapa de floculación de la producción del queso Ricotta, la muestra se encontraba a una temperatura de 40°C. Posteriormente, fue llevado al laboratorio donde la temperatura de recepción de la muestra fue de 4°C y la temperatura de muestreo de 2,1°C. A continuación, se presentan los datos obtenidos de la caracterización del lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta a partir de leche de búfala.

Tabla 7.*Caracterización Lactosuero queso Ricotta*

Parámetro	Resultado	Método Utilizado
Densidad	1,0235g/mL	AOAC 925.22 Ed 20:2016 (Picnometría)
Acidez	0,33 g/100g	AOAC 947-05 Ed 20.2016 expresada como ácido láctico.
pH	4,61	Electrometría a 20°C
Proteína total (N x 6,38)	0,8 g/100g	ISO 1871:2009 (Kjeldahl)
Humedad	93,7 g/100g	P-LF 008 (Gravimetría)
Grasa	0,4 g/100g	AOAS 989.05 Ed: 21:2009
Sólidos totales	6,3 g/100g	Cálculo por diferencia
Cenizas	0,5 g/100g	P-LF-0001 (Gravimetría, calcinación a 600°C)

Nota. En la tabla se presentan los resultados obtenidos en la caracterización del lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta para La Empresa. En el Anexo 1. se evidencia los resultados del laboratorio.

2.2.1. pH

Como se observa en la Tabla 7, se obtuvo un valor de pH de 4,61 para el lactosuero obtenido de elaboración de queso Ricotta. Es decir, el lactosuero analizado corresponde a un lactosuero de tipo ácido, según los valores reportados por *Y. Motta-correa* y *M. Mosquera*. Teniendo en cuenta que la clasificación del lactosuero varía acorde al tipo de queso y al método de producción, se puede inferir que debido a la adición de ácido cítrico como se mencionó en el proceso de elaboración del queso Ricotta repercute directamente en el pH del lactosuero.

2.2.2. Proteína

Dentro de las pruebas fisicoquímicas realizadas cabe resaltar el porcentaje de proteína total, con un valor de 0,8 g/100g, identificando una oportunidad de valorización para el lactosuero y de esta manera aprovechar este subproducto que comúnmente es desechado por la industria láctea. A partir de los resultados obtenidos se puede inferir que dentro de las proteínas que se encuentran de forma mayoritaria es la β -lactoglobulina, puesto que se tienen partículas con un tamaño promedio de 2,80 μm . Considerando que, valores de pH entre 5,2 y 3,5 la β -lactoglobulina se encuentra en forma de octámeros, según reportan algunos autores. [26]

2.2.3. Densidad

Con base a los resultados obtenidos de densidad como se observa en la Tabla 7, el lactosuero obtuvo un valor promedio de 1,0235 g/mL, este corresponde a los valores reportados por *Monsalve y González*. Adicionalmente, presenta un valor inferior a la densidad de la leche que se encuentra en un rango de 1,030 g/mL a 1,033 g/mL según el decreto 616 de 2006, lo cual es común para este subproducto.[11]

2.2.4. Acidez

Según Resolución 2310, 1986 el rango de acidez para el lactosuero líquido no puede exceder del 0,4% expresado en ácido láctico, de acuerdo con los resultados obtenidos, se obtuvo un valor promedio de 0,33g/100g lo que indica que se encuentra dentro del rango establecido por la normativa. [11]

2.2.5. Humedad

En la Tabla 7 se logra observar un valor de 93,7 gramos sobre 100 gramos de muestra, lo que quiere decir que en el lactosuero analizado se logra obtener un valor de 93,7%, este valor se puede considerar elevado debido a la cantidad de agua que posee el lactosuero, este se aproxima a lo reportado por *Guerrero y Gómez*. Donde se observa un valor entre 93 a 95% para el lactosuero ácido. [27]

2.2.6. Sólidos totales

Teniendo en cuenta que la lactosa es el sólido soluble más abundante del lactosuero según por normativa en la resolución 02310 de 1986 se conoce que el valor máximo de

lactosa es de 4,5%, lo que se logra inferir es que al obtener un valor de 6,3 Brix (6,3 g/100g de muestra) para el lactosuero caracterizado, no obstante un estudio realizado por *Bautista*, obtuvo un valor de Brix de 4,4 a 4,6, un valor inferior al obtenido, esta variación se puede dar principalmente por el tipo de queso fabricado y a su vez las características de la leche como materia prima, que va de la mano con el rendimiento del proceso, el cual influye directamente a este parámetro. [28]

2.2.7. Cenizas

El porcentaje de ceniza en el lactosuero según estudios realizados es de 0,6% [29], para este caso el promedio obtenido de cenizas es de 0,5%; por otro lado, en la normativa colombiana específicamente en la resolución 02310 de 1986 habla acerca del valor máximo permitido de cenizas el cual es de 0,8% en lactosuero líquido, dando así confiabilidad a los obtenidos para este parámetro. Este parámetro fue relacionado con el porcentaje de minerales presentes en el lactosuero, por lo que se infiere que es inferior al porcentaje de proteínas.

2.2.8. Grasa

Se realizó adicionalmente la comparación con otras caracterizaciones de lactosuero ácido, donde se obtuvieron datos similares, sin embargo, estas corresponden a valores de lactosuero obtenidos a partir de leche bovina. Es importante recalcar que la leche de búfala presenta valores superiores de parámetros tales como la proteína, grasa, lactosa, sólidos totales y sólidos no grasos comparado a leches de cabra y vaca [25] según diferentes estudios.

Por esta razón, el presente proyecto estará enfocado en la separación de proteínas por medio de tecnologías de membrana, considerando que la separación de proteínas es un campo en constante crecimiento en la industria de los bioprocesos. Esto se debe fundamentalmente a que muchos bioproductos son proteínas y existe un gran interés, tanto científico como comercial, en su purificación y concentración. [30] Las proteínas del lactosuero, además de tener sus propiedades específicas, parcialmente hidrolizadas son una importante fuente de péptidos bioactivos, que encuentran aplicación en la industria alimentaria. [12]

3. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA

En el presente capítulo se realiza la descripción de las tecnologías de membrana, para la separación de las proteínas, que contiene el lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta, junto a las variables y criterios de selección a considerar para su posterior elección por medio de una matriz de selección empleando el proceso de Análisis Jerárquico (AHP).

3.1. Tecnologías de membrana

Para la selección de las tecnologías de membranas para la separación de proteínas presentes en el lactosuero es necesario conocer cada una de las características que define cada tecnología, como: Diámetro de corte, presión de operación, costos de implementación y mantenimiento que requiere cada una de ellas, de esta manera, definir los criterios de evaluación a emplear en la matriz de selección. En primer lugar, se realiza una descripción para cada tecnología, que posteriormente ayudará a identificar cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

3.1.1. Ultrafiltración (UF)

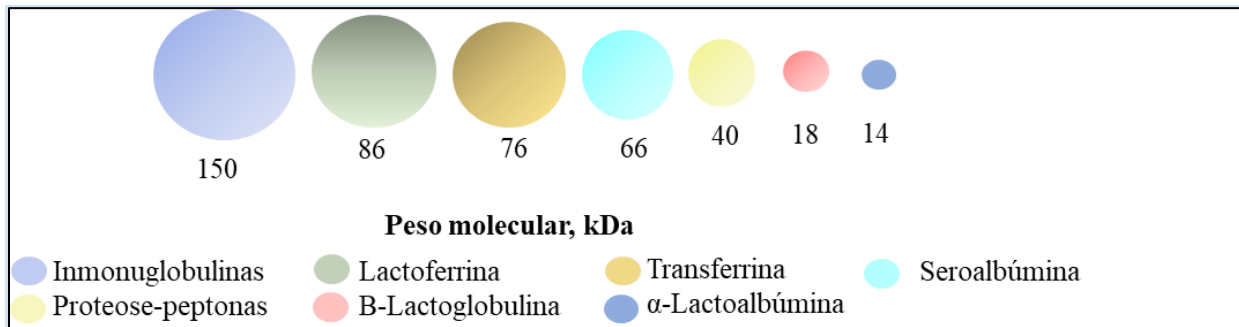
Este proceso de separación es empleado generalmente para la concentración de enzimas, análisis de bacteriófagos y virus y en la preparación de ultrafiltrados libres de células y proteínas a partir de soluciones biológicas. Esta técnica de filtración tiene por objetivo la separación o concentración de componentes de una solución, mediante el paso forzado de ésta a través de una membrana, permitiendo o impidiendo el paso de sustancias acorde a su tamaño o peso molecular. La fuerza motora que permite la separación es la diferencia de presión en ambos sentidos de la membrana filtrante.[14] En la actualidad, son numerosos los ámbitos industriales en los que las membranas de ultrafiltración se aplican, entre ellos la industria alimentaria para la recuperación de compuestos de valor. Una de las aplicaciones de la ultrafiltración es el fraccionamiento de macromoléculas, como por ejemplo las proteínas de la leche.

La membrana empleada en la microfiltración posee poros muy finos cuyo rango está entre 10-1000 Å y su principal función es separar macromoléculas y coloides de una

corriente líquida. [14] La UF permite concentrar grandes moléculas y macromoléculas de peso molecular entre 1 y 200 kDa, entre las que se encuentran las del lactosuero; por lo cual la membrana tiene un diámetro aproximado de poro de 0,01µm, y emplea presiones comprendidas entre 1 y 10 bar. Como se muestra en la Figura 8.[6]

Figura 8.

Relación de pesos moleculares promedio de proteínas de lactosuero.



Nota. En la Figura se observa la relación de pesos moleculares de las principales proteínas presentes en el lactosuero. Tomado de: J. S. Ramírez-Navas, C. A. Solís-Carvajal, and C. A. Vélez, “Tecnología de membranas: Obtención de proteínas de lactosuero,” *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 12, no. 24, p. 52, 2018, doi: 10.31908/19098367.3815. [En línea] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672018000200052

Sin embargo, debido a la complejidad del lactosuero, es necesario usar diferentes procesos de tecnologías de membrana y otras operaciones unitarias para producir un producto específico. Por ejemplo, para la producción de WPC con 35% - 85% de proteína en el total de sólidos puede lograrse mediante la combinación de ultrafiltración (UF) y diafiltración (DF). [15]

Básicamente, las membranas de UF consisten en una capa fina que permite el paso selectivo de sustancias a través de la membrana (capa activa) unida a un soporte más grueso y de mayor porosidad que la capa activa lo cual favorece la permeabilidad de dichas sustancias. Las membranas con este tipo de configuración reciben el nombre de membranas asimétricas o anisotrópicas. [16]

Una de las aplicaciones de la ultrafiltración, es la obtención de concentrado de proteínas del lactosuero (WPC) y los aislados de proteínas del lactosuero (WPI). La diferencia entre ambos es que el WPC contiene hasta un máximo de 80 % de proteína, mientras que el WPI llega a contener hasta un 90 %. [9]

Para obtener los concentrados de proteínas del lactosuero (WPC) en primer lugar, se separa la nata con el fin de reducir el contenido de grasa del lactosuero. Tras esta operación, se procede a calentar el suero para evitar la contaminación bacteriana. En el caso de lactosuero ácido, el tratamiento térmico se realiza a bajas temperaturas. [31]

Antes de la etapa de ultrafiltración se pueden realizar pretratamientos adicionales, como desmineralización, modificaciones enzimáticas, o la implementación de otra tecnología, como la microfiltración. Si el modo de operación de la etapa de ultrafiltración es concentración, los concentrados de proteínas que se obtienen contienen hasta, aproximadamente, un 70 % de proteína. [16]

Los aislados de proteínas del lactosuero se pueden obtener, principalmente, por dos métodos: tecnología de membranas o por intercambio iónico. La tecnología de membranas utiliza etapas en serie de ultrafiltración y microfiltración para obtener WPI. [12] Las membranas de microfiltración empleadas para tal fin se diseñan para retener partículas en suspensión en el rango de micras, como es el caso de grasas presentes en el lactosuero concentrado. Por otro lado, las membranas de ultrafiltración empleadas se diseñan para retener los constituyentes del lactosuero en el rango molecular, como es el caso de las proteínas, separándolas de lactosa y otras impurezas presentes en el lactosuero.[32]

3.1.2. Microfiltración (MF)

El proceso de microfiltración generalmente se emplea para la retención de sólidos en suspensión, es decir, es empleada como etapa de limpieza, de concentración o como pretratamiento para la nanofiltración o la ósmosis inversa.

Esta tecnología puede separar partículas con un tamaño comprendido entre 0,05 y 10 μm , a presiones comprendidas entre los 0,5 y 3 bar. La MF, en ciertas circunstancias, permite eliminar completamente bacterias y esporas (de tamaño: aproximado de 0,4 a 2 μm) de la leche y derivados lácteos para extender su vida útil, convirtiéndose en una alternativa a la ultrapasteurización. [7]

La separación mediante la microfiltración se basa fundamentalmente en la relación existente entre el diámetro de las partículas y el diámetro de los poros de las fibras, actuando como un tamiz. Se utilizan preferentemente membranas microporosas que permiten efectuar separaciones en los rangos micrométrico y submicrométrico con tamaños de poro de 0,1 a 10 μm y las diferencias de presión establecidas a través de la membrana son de 0,1 a 2 bar.

La microfiltración se puede llevar a cabo a diferentes condiciones por sus diversas aplicaciones, entre las cuales se pueden encontrar:

- Opera a temperaturas aproximadas a las atmosféricas y, por lo tanto, permite evitar el sabor a cocido que se produce en el procesamiento de productos lácteos de larga duración.
- Eliminar células muertas con sus enzimas potencialmente activas que pueden causar alteraciones en las leches líquidas durante el almacenamiento.
- Aplicarse en la producción de derivados lácteos, por ejemplo, se utiliza para eliminar bacterias, esporas y grasa en la producción de concentrado de proteína (WPC - Whey Protein Concentrate) y aislado de proteína (WPI - Whey Protein Isolate) logrando productos de alta calidad. [6]

La microfiltración se puede realizar de dos maneras considerando su flujo. Una de ellas es la separación por flujo tangencial, donde por medio de una corriente de fluido circula paralelamente a la superficie de la membrana, la separación se realiza por un diferencial de presión a través de la membrana que provoca que parte del fluido pase a través de la membrana mientras que el resto barre la superficie limpiándola.[15]

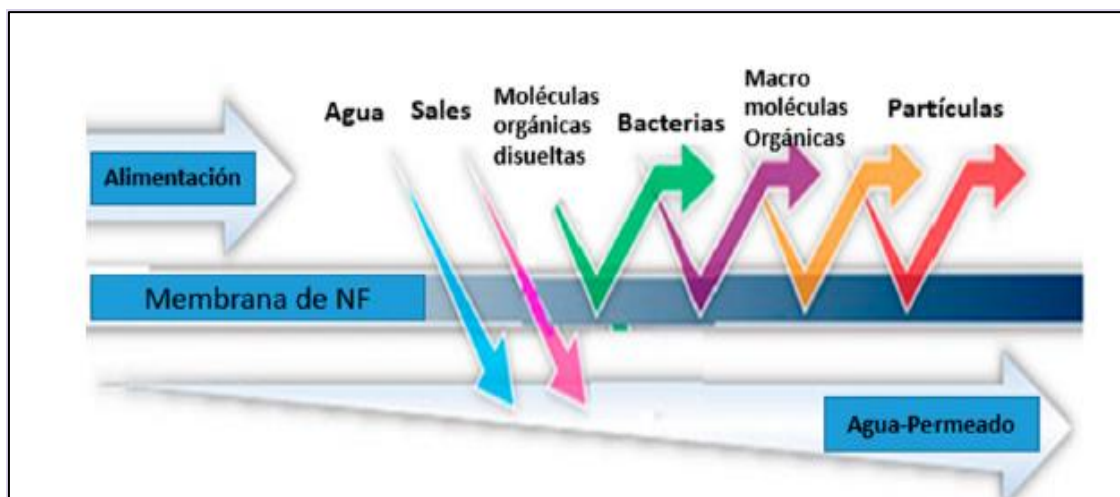
La segunda forma es la denominada filtración perpendicular o longitudinal. En esta filtración todo el fluido pasa a través de la membrana quedando en la superficie las partículas que no pueden atravesar la membrana. Típicamente opera a baja presión para minimizar que los sólidos se aglomeren en la superficie. Las velocidades de flujo tangencial van desde 3 a 6 m/s en módulos tubulares, que son los más comunes. A escala industrial la MF se lleva a cabo en módulos multi-etapas. [15]

3.1.3 Nanofiltración (NF)

Proceso de separación que usa membranas con un diámetro de poro inferior a $0,001\mu\text{m}$ (1nm). Retiene lactosa y otros componentes, permitiendo permear solo iones minerales monovalentes y agua. La NF permite concentrar y desmineralizar parcialmente el lactosuero líquido. Debido a la selectividad de las membranas, la mayoría de los iones monovalentes, los ácidos orgánicos y parte de la lactosa pasarán a través de la membrana. Aproximadamente, el nivel máximo de desmineralización es del 35% de reducción del contenido de ceniza con un factor de concentración de 3,5 a 4,0. [6]

Figura 9.

Selectividad del proceso de Nanofiltración.



Nota. La figura representa la selectividad de la membrana en el proceso de Nanofiltración respecto a la corriente de alimentación que ingresa al sistema. Tomado de: L. R. Posada David, "Nanofiltración en el manejo del lactosuero," *J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 10–25, 2016, doi: 10.22507/jet.v5n2a4. [En línea] Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/jet/article/view/1307/1080>

La NF es una tecnología de separación por membrana en la cual se trabaja con altas presiones, tiene un bajo consumo de energía favoreciendo su uso frente a otras técnicas de membranas. Este proceso de separación de componentes trabaja bajo el mismo fundamento que la ósmosis inversa y la ultrafiltración. Es una técnica intermedia a las mencionadas, determinada por dos características principales, en cuanto a su estructura microporosa (tamaño de poro) y a los materiales membranarios que llevan cargas eléctricas particularizando los mecanismos de transferencia. Dentro de estos mecanismos, en la nanofiltración principalmente se genera el Equilibrio de Donnan que consiste en el equilibrio entre los iones que pueden atravesar la membrana y los que no, lo cual es determinado por las concentraciones de los iones, así como por sus cargas positivas o negativas. [17]

3.1.4. Ósmosis inversa (OI)

Es una técnica de separación muy compleja que elimina partículas tan pequeñas como los iones monovalentes de una solución. Requiere altas presiones (de 15 a 70 bar) para superar la presión osmótica a través de la membrana. Esto permite al agua fluir desde la solución del concentrado hacia el permeado diluido. [33]

Por medio de esta tecnología se pueden retener moléculas de muy bajo peso molecular tales como las sales, siendo su mecanismo fundamental la difusión. El tamaño de poro en este caso es menor a $0,0005 \mu\text{m}$, oscilando las presiones aplicadas entre 10 y 50 bares. Al presentar un tamaño de poro tan reducido, sólo las moléculas orgánicas de muy pequeño tamaño y solutos sin carga pueden pasar a través de la membrana junto con el agua. [33]

La aplicación más común de la osmosis inversa es la purificación del agua, eliminando sales y otras impurezas para mejorar las propiedades de una solución. Esta tecnología es capaz de rechazar sales, azúcares, proteínas, colorantes y otros constituyentes de peso molecular mayor a 150 dalton. [33]

Las membranas empleadas en esta tecnología son semipermeables permitiendo el paso al fluido a purificar y rechazando los contaminantes, reteniéndolos. Sin embargo, también requiere de una fuerza impulsora que empuje al fluido a través de la membrana y que comúnmente es la presión ejercida por una bomba. [33]

3.1.5. *Electrodialisis (ED)*

Recibe este nombre el movimiento de iones a través de una membrana cargada, movimiento que es favorecido para los iones de signo opuesto al de las cargas presentes en la matriz sólida de la membrana (contraiones) y restringido para los que presenten la misma carga (coiones).[18]

3.1.6. *Características de las tecnologías de membrana*

Con base a lo anterior, se establecieron los parámetros que definen cada una de las tecnologías, contemplando los valores expuestos en cada uno de los artículos y documentos consultados que ayudarán como soporte para la elección de los criterios de selección. Como se muestra a continuación.

Tabla 8.
Características de las tecnologías de membrana.

Tecnología de membrana	Diámetro de Corte	Presión (Bar)	Referencia
Ultrafiltración	0,01 a 0,1 μm	2 a 10	M.González Cáceres[34]
Ultrafiltración	0,01 μm	< 10	J.S Ramírez Navas.[6]
Ultrafiltración	0,001 a 0,1 μm	2 a 20	F. A. Trigo y V. Martínez López[35]
Ultrafiltración	0,01 a 0,1 μm	N/A	M. A. Yam Cervantes.[36]
Ultrafiltración	0,001 a 1 μm	2 a 10	F. Ruiz.[18]
Ultrafiltración	< 0,3 μm	2 a 10	L. Palacio Martínez.[37]

Microfiltración	0,1 a 10 μm	0.2 a 2	F. A. Trigo y V. Martínez López[35]
Microfiltración	0,1 a 5 μm	0.5 a 3	M.González Cáceres[34]
Microfiltración	0,05 a 10 μm	0.5 a 3	J.S Ramírez Navas.[6]
Microfiltración	0,1 a 10 μm	0.1 a 2	L. Palacio Martínez.[37]
Microfiltración	0,05 a 10 μm	0.5 a 3	R. Ibañez Lorente[38].
Nanofiltración	150 a 1000 Da	10 a 30	M.González Cáceres[34]
Nanofiltración	0,001 μm	40	F. A. Trigo y V. Martínez López[35]
Nanofiltración	< 0,002 μm	5 a 35	A. Sotto Diaz[39]
Nanofiltración	0,001 μm	-	M. Coronel[40]
Ósmosis Inversa	50 a 150 Da	10 a 80	M.GonzálezCáceres[34]
Ósmosis Inversa	0,0005 a 0,0015 μm	-	J.S Ramírez Navas.[6]
Ósmosis Inversa	0,0005 μm	30 a 80	F. A. Trigo y V. Martínez López[35]
Ósmosis inversa	2000 y 3000 g/mol	20 a 100	L. Palacio Martínez.[37]

Nota. En la tabla se muestra la compilación de los valores de diámetro de corte y presión para cada una de las tecnologías de membrana, expuestos por diferentes Autores.

3.2. Matriz de selección

Para la selección de la tecnología de membrana se empleó como método de selección el método de análisis jerárquico (AHP).

3.2.1. Método de análisis jerárquico (AHP)

Es claro que, en el ambiente competitivo actual, las organizaciones y proyectos enfrentan diariamente la toma de decisiones, tanto a nivel estratégico como en el táctico, siendo muchas veces consecuencias fundamentales para la supervivencia o desarrollo de estos. Es así, como surge una metodología para la solución de problemas multicriterio, el cual se conoce como proceso de análisis jerárquico (AHP).[41]

El método de análisis jerárquico (AHP) fue desarrollado a finales de los años 60 por Thomas Saaty, quien a partir de su investigación en el campo militar y su experiencia docente formuló una herramienta sencilla para ayudar a las personas responsables de la toma de decisiones. Su simplicidad ha sido evidenciada en los cientos de aplicaciones en las cuales se han obtenido importantes resultados en la actualidad. El AHP es una metodología para estructurar, medir y sintetizar. Ha sido aplicado ampliamente en la solución de una gran variedad de problemas y selección. [41]

Este es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios, y está basado en el principio que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos utilizados en el proceso. Por otro lado, se utiliza para realizar comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior. [41]

Las principales ventajas de este método se logran entender como: Análisis del efecto de los cambios en un nivel superior sobre el nivel inferior, ofrece información sobre el sistema y permite una vista panorámica de los actores, objetivos y propósitos, y por último permite flexibilidad para encarar cambios en los elementos de manera que no afecten la estructura total.

3.2.2. Criterios de selección

Para la selección de las tecnologías de membrana se contemplaron los siguientes criterios de selección:

3.2. 2.a. Temperatura La temperatura de operación de cada una de las tecnologías se seleccionó como criterio de selección, con el fin de asociarla a los costos energéticos que implicaría el uso de cada tecnología. El rango de temperaturas seleccionado se estableció por medio de diferentes fuentes bibliográficas.

3.2.2.b. Diámetro de corte: El diámetro de corte es uno de los parámetros más importantes para la selección de las tecnologías de membranas. Cada una de ellas presentan diferentes rangos de diámetro de corte, que limitan la separación de sustancias, sin embargo, para la selección de la tecnología se debe contemplar el tamaño de las proteínas a separar y el peso molecular. Por lo tanto, este criterio se define como limitante para la obtención de proteínas presentes en el lactosuero.

3.2.2.c. Presión de operación: La presión es la fuerza impulsora para la separación de dichas tecnologías, cada una de estas opera a presiones diferentes, implicando mayores costos y selección de bombas para el rango de presiones de la tecnología seleccionada. Por lo tanto, se define como criterio de selección. Cabe mencionar, que esta presión es diferente a la presión transmembranaria.

No obstante, a pesar de que estos criterios se establecieron para la matriz de selección también se contemplaron los costos de las tecnologías de membrana, teniendo en cuenta el presupuesto fijado y volumen producido de lactosuero por La Empresa. Sin embargo, no fue posible establecer una relación entre los costos encontrados por cada una de las tecnologías, debido a que no se logró una cotización para las tecnologías. Por lo tanto, los valores registrados son extraídos de proyectos donde emplearon estas tecnologías. Según *N. Monroy* evaluó experimentalmente la separación de proteínas contenidas en el lactosuero usando membranas de ultrafiltración variando la concentración de proteínas en la alimentación, empleando un módulo de ultrafiltración (X-Flow AQUAFLEX 20), con un caudal de 5.280 L/día, una PTM de 300 kPa a una velocidad de flujo de 0,003 m³/s y una concentración de flujo de alimentación de 0,11

g/L. [11] El módulo de ultrafiltración con un área de 20 m², de Polisulfona y dimensiones: 0,5 metros por 1,54 metros presentó un costo de \$16'615.538, excluyendo los valores de bombas centrífugas, tanques de almacenamiento, tuberías, válvulas, etc. [11]

Por otro lado, *Cuartas B. E.* desarrolló una investigación acerca de las membranas de nanofiltración aptas para la desmineralización del lactosuero, empleando la planta piloto de NF/UF diseñada en el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear (DIQN) de la Universidad Politécnica de Valencia compuesta por un módulo plano, que trabaja simultáneamente con dos membranas en serie con un área de 90 cm² cada una. Las membranas de NF utilizadas fueron NF200, NF270, Ds-5 DK, Ds-5 DL y la membrana de UF SD-polietersulfona. [31] La membrana de ultrafiltración utilizada está hecha de polietersulfona con un corte de peso molecular de umbral límite de 10 KDa y un área de 3 m², suministrada por PTI Advanced filtration. El costo de la membrana de UF fue de \$13'202.656 y la de NF \$8'801.77. [31] Para hacer el estudio económico, se basaron en los datos aportados por la empresa ubicada en la Comunidad Valenciana, que genera 12,8 m³ de suero/día. La planta opera de lunes a viernes durante 9 horas al día. De tal forma que se estima que trabaja 222 días/año.[31]

En la evaluación de la utilización de la MFT para la fabricación de queso y aprovechamiento del lactosuero por *M. Cáceres, et al.* Se realizó el aumento del rendimiento de la elaboración de queso por medio de la microfiltración tangencial (MFT) y con el permeado elaboraron lactosuero en polvo. La experimentación fue llevada a cabo en la planta piloto de DECAB de la escuela politécnica nacional. Donde el volumen empleado para la determinación de costos fue de 5000 L/día, el equipo de microfiltración presentó un costo de \$133'464.036 que incluye tanque de alimentación, bomba centrífuga, boba de recirculación, intercambiador de calor, módulo tubular de filtración de membrana cerámica de 0,1µm o 0,2 µm de diámetro de poro y una superficie de membrana de 0,2m² (Marca SCT, MEMBRALOX).[42]

En la evaluación técnica y financiera sobre la producción de suero en polvo partiendo del lactosuero generado en el proceso de fabricación de quesos de leche de búfala por

C.Ortiz realizó un estudio de las últimas tecnologías en cuanto al procesamiento del lactosuero. Determinando las condiciones de operación en escala laboratorio, para posteriormente realizar la proyección a escala industria. Allí empleó la tecnología de Osmosis inversa, empelando una membrana polimérica de polisulfonas con configuración en espiral con fibras huecas por medio de flujo cruzado. Esta membrana tiene un costo unitario de \$25'252.500. [43]

Con base a los valores registrados para los costos de las tecnologías de membrana se determina eliminar ósmosis inversa y diafiltración de la matriz de selección, considerando que el uso de estas tecnologías generalmente son empleadas para la separación de moléculas más pequeñas y emplean altas presiones, por lo tanto, para la separación de proteínas actuaría como una etapa de limpieza y purificación, sin embargo, se requiere de un presupuesto más amplio para la implementación de dichas tecnologías. Por lo tanto, en la matriz de selección se evaluarán las tecnologías de Ultrafiltración, microfiltración y nanofiltración.

Tabla 9.

Criterios de selección tecnologías de membrana.

Tecnología de membrana	Temperatura (°C)	Diámetro De Corte	Presión de Operación (bar)
Ultrafiltración	30-60	0,01 µm - 0,1 µm	2 a 10
Nanofiltración	< 30	0,001 µm	5 a 40
Microfiltración	30 -50	0,1 µm - 10 µm	0,5 a 3

Nota. En la tabla se presentan los criterios de selección para las tecnologías de membrana, junto a los valores de temperatura, diámetro de corte y presión, fijados por medio de la revisión bibliográfica.

3.2.3. Elaboración de la matriz

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada se definieron los criterios para la matriz de selección que será analizada mediante el método de Análisis jerárquico. En primer lugar, se planteó la matriz principal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10.

Matriz principal comparación de criterios de selección.

Criterios/ Criterios	Temperatura	Diámetro de Corte	Presión de Operación
Temperatura	1	1/5	1/3
Diámetro de Corte	5	1	3
Presión	3	1/3	1
Total	9,00	1,53	4,33

Nota. En la tabla se presenta la matriz de comparación de criterios para determinar la ponderación de cada criterio por medio del método AHP.

Para la matriz principal, se realiza la comparación de criterios otorgando una escala de importancia, y se evaluó de la siguiente manera:

- Temperatura respecto al diámetro de corte. Donde el parámetro que se priorizó corresponde al diámetro de corte, con un valor de 5, queriendo decir que presenta una importancia fuerte respecto a la temperatura, puesto que el diámetro de corte será el encargado de limitar la separación de la membrana, en las tecnologías de membrana el fundamento de la separación consiste en la diferencia de los pesos moleculares y el tamaño de partícula, por lo tanto, para la obtención de proteínas se debe contar con un diámetro de corte que permita recuperar las proteínas contenidas en el lactosuero. Por medio de la revisión bibliográfica se logró establecer el rango para los diámetros de corte para cada tecnología como se muestra en la Tabla 10.
- Temperatura respecto a presión. El parámetro que se priorizó fue la presión, con un valor de 3, es decir, presenta una importancia moderada con relación a la temperatura. A pesar de que ambas se relacionan con los gastos energéticos de operación para cada tecnología de membrana. La presión, se considera la fuerza impulsora para la separación.
- Presión respecto al diámetro de corte. Nuevamente el parámetro que se priorizó fue el diámetro de corte, con un valor de 3, presentando una importancia moderada

con relación a la presión, dado que el tamaño de partícula y el rango de presión de operación ya está fijada por cada tecnología, sin embargo, se debe garantizar la separación de proteínas. Por lo tanto, este parámetro presenta un mayor valor como se mencionó anteriormente.

Por otro lado, al finalizar la calificación y determinar la ponderación de cada uno de los criterios de selección escogidos, se realizó un análisis AXP como se muestra en la Tabla 11, el cual consiste en la multiplicación de la matriz inicial por la columna de la ponderación esta obtenida de la matriz normalizada; luego de obtenido este valor total de AXP se procede a determinar los siguientes valores que son el índice de consistencia (CI), valor de consistencia aleatoria (RI) y por último la relación de consistencia (CR). Si este último valor es inferior a 0,1 quiere decir que los criterios de selección se han ponderado correctamente y la calificación dada es la correcta.

Tabla 11.

Valores de consistencia de criterios de selección.

AXP			
	0,32	$CI = (n_{max} - n) / (n - 1)$	0,0277
	1,95	$RI = 1,98 * (n - 2) / n$	0,6600
	0,79	$CR = CI / RI$	0,0419
TOTAL	3,06		

Nota. En la tabla se muestra la relación de consistencia para la ponderación seleccionada para los criterios de selección, el índice de consistencia debe presentar un valor inferior a 0.1.

Eventualmente, se realizó la calificación de cada criterio de selección con base a la tecnología de membrana, evaluando la importancia de la temperatura, presión y diámetro de corte en relación con la obtención de proteínas. Como se requiere para llevar a cabo el análisis jerárquico (AHP), el cual se considera como una de las técnicas más completas, ordenadas y efectivas para la simplificación de decisiones complejas. Como método de calificación se tomó la escala de importancia relativa propuesta por Thomas

Saaty, expuesta en la Tabla 12, permitiendo establecer una relación entre los criterios de selección de acuerdo con su importancia.

Tabla 12.

Escala de importancia relativa de Saaty.

Escala	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en practica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Nota. La tabla muestra el significado de los valores numéricos con los que se evalúan los criterios y alternativas en el método AHP. Tomado de: J. Moreno, “El Proceso Análítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodologías y aplicaciones.,” Recta monográfico, vol. 1, pp. 21–53, 2002. [En línea] Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/116344/Blanca,%20Kallas,%20Gil%202017%20DRAC.pdf>

Los valores 2,4,6 y 8 se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores, estos son considerados valores intermedios de preferencia. Esta escala se utiliza fundamentalmente para incorporar los juicios o valoraciones del decisor, lo cual permite eliminar las ambigüedades que el ser humano tiene al comparar en la proximidad del cero o del infinito. [44]

3.2.4. Resultados método análisis jerárquico.

Acorde al método de análisis jerárquico para la matriz de selección de las tecnologías de membrana, se obtuvo la escala de importancia para las tecnologías de membrana acorde a la calificación otorgada por cada criterio de selección. Los resultados obtenidos por el método se muestran a continuación.

Tabla 13.

Resultado matriz de selección tecnologías de membrana.

Tecnología de membrana	Criterios de selección			Resultado
	Temperatura	Diámetro de Corte	Presión	
Ultrafiltración	0,14	1,43	0,67	1,10
Nanofiltración	0,57	0,22	0,23	0,26
Microfiltración	0,29	1,09	1,22	1,04
Ponderación	0,11	0,63	0,26	-

Nota. En la tabla se presentan los resultados obtenidos en la matriz de selección de las tecnologías de membrana por medio del método AHP.

Observando que la tecnología que obtuvo un valor superior es la ultrafiltración, de acuerdo con la ponderación definida para la temperatura, diámetro de corte y presión. Esta tecnología es la indicada para implementarse en la recuperación de proteínas del lactosuero, en relación con su tamaño y costos de operación. Corroborando de esta manera, lo expuesto por *M. Almecija*, quien presenta a la ultrafiltración como una de las técnicas más utilizadas para el aprovechamiento de las proteínas del lactosuero, mediante la cual se obtiene el concentrado de proteínas del lactosuero (WPC) y los aislados de proteínas del lactosuero (WPI). [12]

Sin embargo, las tecnologías de membranas no son excluyentes, es decir que, para obtener mejores resultados en la obtención de algún producto, resulta conveniente la implementación de dos o más tecnologías. Según *J.S Ramírez, et al.* La ultrafiltración es una interesante alternativa en el proceso de separación de proteínas y péptidos del lactosuero, componentes que presentan funcionalidad nutricional y tecnológica. Sin

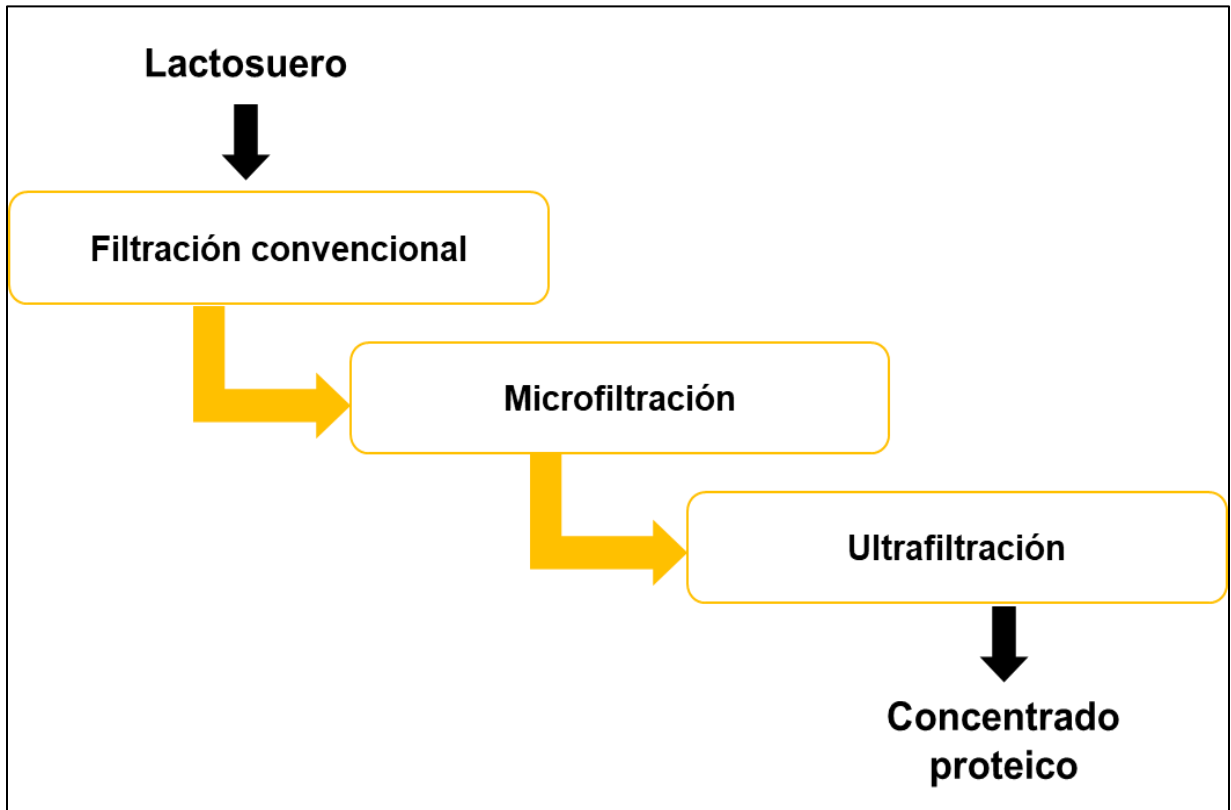
embargo, para lograr mejores resultados se debe: acompañar de otras tecnologías como microfiltración, nanofiltración, osmosis inversa y diafiltración. [6] Sin embargo, la implementación de más tecnologías requiere de mayores costos para la empresa, por consiguiente, se decidió seleccionar sólo dos tecnologías de membrana.

Por esta razón, acorde a los resultados de la matriz de selección la tecnología a implementar junto a la ultrafiltración es la microfiltración, una tecnología comúnmente empleada como pretratamiento para la ultrafiltración, capaz de retener partículas en suspensión en el rango de micras, como es el caso de grasas presentes en el lactosuero concentrado. [12]

De esta manera, de acuerdo con el presupuesto destinado por la empresa para el presente proyecto, se propone emplear la microfiltración y la ultrafiltración como tecnologías de membranas para la separación de los compuestos de interés, como se muestra en la Figura 10, para su posterior aprovechamiento.

Figura 10.

Propuesta de tecnologías de membranas seleccionadas.



Nota. En la figura se evidencia las tecnologías seleccionadas para la recuperación de proteínas para el lactosuero.

4. CONDICIONES DE TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA

En este capítulo se seleccionarán las condiciones de operación de las tecnologías de microfiltración y ultrafiltración para la recuperación de proteínas contenidas en el lactosuero, esta selección se realizará por medio de la revisión bibliográfica.

4.1. Variables y parámetros que influyen en la separación

El permeado en un proceso de tecnologías de membrana puede presentar diversas perturbaciones, principalmente por el pH, la presión transmembranaria (PTM), el material de construcción de la membrana, la orientación del flujo de filtrado y la concentración de solutos retenidos, entre otras. [15]

4.1.1. pH

El pH es una de las variables con influencia en el permeado obtenido en la separación por membranas, el pH de la corriente de alimentación es uno de los factores más influyentes en el incremento del coeficiente de ensuciamiento de la membrana (CE) y en el desarrollo del fenómeno de polarización por concentración (CP); los cuales son los principales responsables de la reducción del flujo de permeado.[15] Cuando el pH es cercano al punto isoeléctrico de la proteína puede generar colmatación en la membrana, mientras que, cuando la solución presenta un pH básico (7) la tendencia del ensuciamiento de la membrana se reduce, debido a que ocurre una repulsión electrostática entre los péptidos, los cuales tienen una carga eléctrica negativa y un punto isoeléctrico bajo. [15][12]. Según *D.Lucas, et al.* la mejor selectividad y pureza para la recuperación de α -Lactoalbúmina se obtuvo con un pH 7 y menor fuerza iónica ($0,2 \text{ mol } 1^{-1}$) logrando la recuperación de la β -Lactoglobulina. En el caso de la BSA y las Inmunoglobulinas, con un pH de 4,8 y una baja fuerza iónica se recupera el 70% de BSA. [45] De esta manera, el valor de la fuerza iónica óptimo será el mínimo posible.[12] Y la alta retención de proteínas se observa cuando la carga de la proteína es igual a la carga de la membrana.[45]

4.1.2. Presión transmembranaria (PTM)

La presión transmembranaria interviene en la polarización por concentración y la velocidad de flujo en un sistema de ultrafiltración. Cuando la PTM aumenta, también se

incrementa la tasa de flujo y la resistencia de la membrana, ocasionando la colmatación de partículas en la superficie de la membrana, observando la formación de una torta que reducen la permeabilidad y el rendimiento del sistema. Por lo tanto, emplear presiones altas implicará mayor cantidad de partículas que se depositan sobre el interior de los poros de la membrana. Con el fin de disminuir el efecto de la PTM se realizan procesos previos de limpieza de líquido a filtrar, tales como la microfiltración, considerada una etapa de pretratamiento, que permite reducir la población de bacterias, coloides, el contenido graso, lipoproteína y agregados de proteínas que aceleran la colmatación del equipo de ultrafiltración. [15][11]

4.1.3. Flujo de permeado

El flujo de permeado presenta una relación directa con la presión transmembranaria se evidencia que la tendencia del flujo de permeado difiere en función de la presión a través de la membrana. En una membrana ideal con poros uniformemente distribuidos y de igual tamaño, sin polarización de la concentración ni taponamientos y presión osmótica despreciable el flujo del fluido a través de la membrana es directamente proporcional a la presión aplicada e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido [15].

Esta relación entre la presión transmembranaria y el flujo se establece mediante la ley de Darcy, como se muestra a continuación:

$$J_P = \frac{PTM}{R_t * \mu}$$

Donde μ es la viscosidad del permeado y R_t es la resistencia hidráulica total en contra del flujo de permeado. Según la ley de Darcy el flujo incrementa linealmente con la presión transmembranaria. Sin embargo, al aumentar la presión la polarización de la concentración y la colmatación aumentan, ocasionando un descenso en el flujo. [42]

4.1.4. Material y configuración de las membranas

4.1.4.a. Materiales de las membranas. En el mercado actualmente se pueden encontrar membranas fabricadas en una gran variedad de materiales. En general se pueden

clasificar en dos grandes familias: membranas poliméricas u orgánicas y membranas inorgánicas. [16]

- Membranas poliméricas. Las membranas poliméricas u orgánicas son las más utilizadas en la actualidad. Y comúnmente emplean configuraciones tipo *espiral* y *plate and frame*. Estas membranas presentan algunas desventajas, entre las que se encuentran su duración limitada (aproximadamente un año), y su restricción en la industria láctea para concentrar lactosuero y leche que tengan altas viscosidades. [15] Sin embargo, su principal ventaja, radica en su tamaño, debido a que requieren menos superficie en planta para la misma superficie filtrante. [15]

Estas membranas en los últimos años han mostrado gran desarrollo, son muy competitivas gracias a sus propiedades de separación y precios asequibles. Pueden ser hidrófilas, si están hechas de materiales altamente polares con alta afinidad por el agua (ésteres celulósicos, poliamidas alifáticas, etc.), o por el contrario, hidrófobas, si se componen de materiales apolares con baja afinidad por el agua (polietileno, polipropileno, etc.). [16]

El primer tipo de material utilizado en la fabricación de membranas fue el acetato de celulosa. Es un material de bajo precio y de fácil adquisición, presenta una buena resistencia a la colmatación cuando hay grasas y proteínas presentes. Sin embargo, es poco resistente al cloro, a pH extremos y a la temperatura por lo que no puede soportar limpiezas severas. [16]

Considerando estos problemas, se vieron en la necesidad de investigar y desarrollar otros polímeros para la fabricación de membranas. Es así, como surgen la membranas de poliamida empleadas comúnmente en ósmosis inversa y nanofiltración. [16] Este material presentó mejoras respecto a la celulosa, entre ellas es químicamente más estable, no obstante, se colmata fácilmente y tiene baja tolerancia al cloro. [16]

De este modo, uno de los materiales que presentó buena estabilidad química y térmica, resistencia a los agentes oxidantes son los polisulfonas y polietersulfonas,[16] comúnmente empleadas en la industria láctea para tratamiento del lactosuero.

- Membranas inorgánicas. Por otro lado, las membranas inorgánicas son consideradas mejores que las poliméricas, presentan una gran resistencia térmica y química, tienen una gran durabilidad (aproximadamente 5 años). Poseen un alto grado de resistencia química y a los disolventes. [15] Muy pocos productos químicos pueden dañarlas, los fabricantes especifican un rango de pH de utilización de 0,5 a 13, se han aplicado en el rango entre 0-14. [16] Adicionalmente, se pueden utilizar factores de concentración muy altos o en el tratamiento de fluidos viscosos. No obstante, su principal desventaja es el alto precio, en muchos casos es 10 veces mayor al de las poliméricas. [15] Las membranas inorgánicas, tienen una gran variedad de materiales para su fabricación. [16] Entre los que se pueden encontrar:

- Materiales cerámicos: Se fabrican por combinación de un metal con un no metal. Los métodos de fabricación de estas membranas cerámicas son muy diversos: sinterizado, procesos de deshidratación de geles, anodizado sobre una capa de metal, etc. [18] Entre las que podemos encontrar: Membranas formadas por un soporte poroso de carbono y capa activa de óxido de zirconio y membranas con una base de α -alúmina con capa activa de γ -alúmina.[16]

- Vidrios: Se usan normalmente en forma de membranas de fibra hueca, estando disponibles para un rango de poro comprendido entre los 10 y los 90 nm. Han encontrado su principal aplicación en la industria biotecnológica debido a que permiten reducir las pérdidas de producto gracias a la gran resistencia a la adsorción que presentan.[16]

- Metálicos: Se obtienen principalmente por sinterizado de polvos metálicos o mediante bombardeo de una lámina (Por una cara o por las dos). Sus principales aplicaciones son: La ultrafiltración y la purificación o separación de gases con alta difusividad. [18] Se caracterizan por su alta resistencia, lo que permite usarlas en ambientes muy agresivos.[16]

En la Ultrafiltración los materiales más empleados son los poliméricos, al ser de carácter hidrofílico, tienen una carga eléctrica negativa que coincide con la carga

eléctrica de muchas macropartículas disueltas en el lactosuero. Por ende, los materiales poliméricos no favorecen la colmatación de la membrana. Sin embargo, también son empleadas membranas inorgánicas. [15]

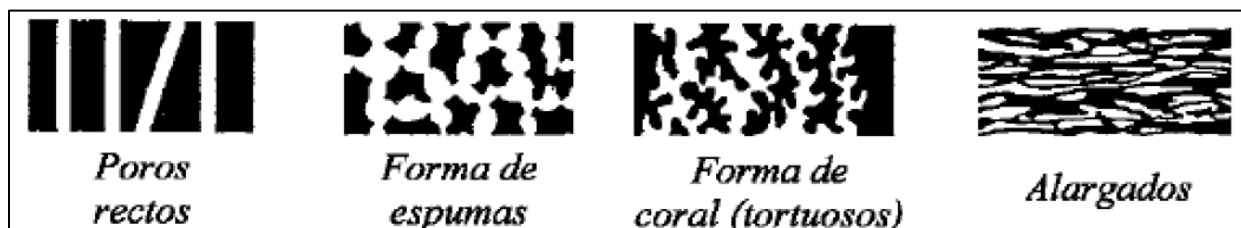
Estudios recientes han mostrado que el uso de membranas híbridas (inorgánicas y orgánicas), tienen un gran rendimiento en la separación de proteínas, puesto que además de permitir la adición en su estructura, de una carga negativa que mejora la capacidad de hidrofobicidad y porosidad, reducen el nivel de ensuciamiento de la membrana. Además, presentan una mayor durabilidad al uso de materiales de limpieza.[15]

1.1.4.b. Configuración Las membranas también se pueden clasificar acorde a su configuración o disposición de las capas que conforman la membrana. [18] Estas pueden dividirse en:

- **Membranas simétricas:** Son aquellas en las que sus propiedades morfológicas y sus propiedades funcionales no dependen de la cara de la membrana, es decir su funcionalidad es la misma independiente a la cara. Existen diferentes estructuras de poro para este tipo de membranas, como se muestra en la Figura 11. [18]

Figura 11.

Estructuras de poro de las membranas.

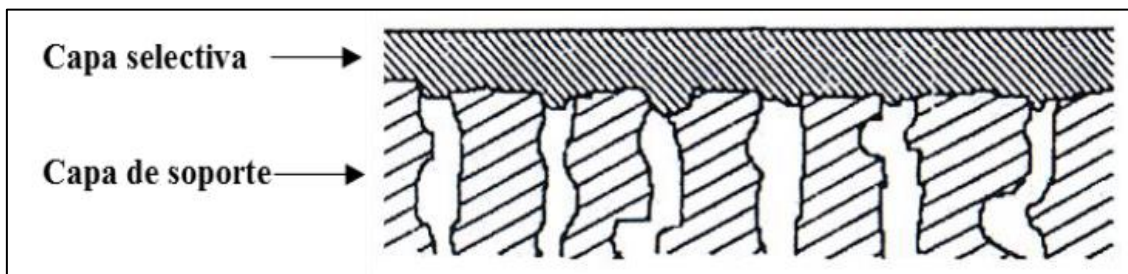


Nota. En la figura se presentan las diferentes estructuras de poro para las membranas simétricas. Tomado de: Á. F. Ruiz, “Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM.” tesis maestría, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid. [En línea] Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38460/TFM-G979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Membranas asimétricas: A diferencia de las membranas simétricas, las asimétricas poseen propiedades morfológicas y/o funcionales distintas por cada cara de la membrana. Sean homogéneas o no tendrán una estructura formada aparentemente por dos capas, una capa fina, denominada capa selectiva, que proporciona las características de funcionalidad a la membrana y cuyo espesor es muy pequeño comparado con el de la otra capa, llamada capa de soporte, cuyos poros son de un diámetro mucho mayor que los de la capa fina por lo que no suele afectar a las características de funcionalidad, pero proporciona una mayor resistencia mecánica. En la Figura 12 se muestra un corte transversal de una membrana asimétrica. [18]

Figura 12.

Corte transversal de una membrana asimétrica.



Nota. En la figura se presentan las capas que conforman una membrana asimétrica. Tomado de: Á. F. Ruiz, “Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM.” tesis maestría, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid.

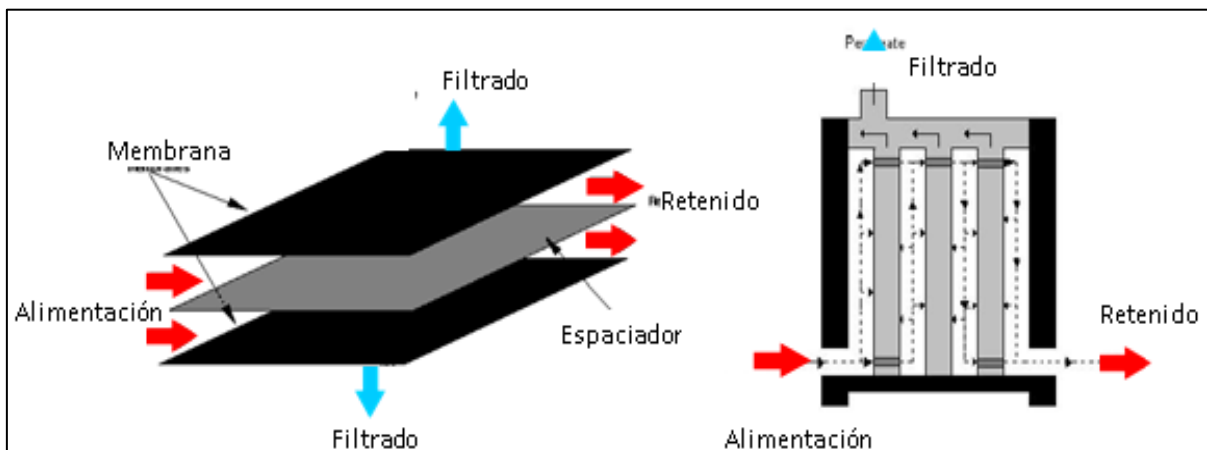
[En línea] Disponible en:
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38460/TFM-G979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

4.1.4.c. Configuración en módulo. Un módulo es la unidad de membrana más simple para su aplicación, se encuentra conformado por la membrana, las estructuras de soporte, la entrada para la alimentación y las salidas para el filtrado y el retenido. [18] Las membranas en módulo se pueden clasificar en diferentes tipos:

- Placas planas: Este primer tipo de módulo se conforma por una serie de placas rígidas planas, en las que se coloca la membrana. Entre la membrana y la placa se coloca un rejilla de drenaje, obteniendo el canal de filtrado. La membrana se sella en los bordes pero se deja un sistema para drenar el filtrado, generalmente un tubo, en seguida otra membrana y otro separador para el filtrado se colocan en la otra cara de la placa como se muestra en la Figura 13. Las placas son ordenadas una encima de otra o en algunos casos, unas al lado de las otras, según sea un almacenamiento vertical u horizontal, de esta manera se obtienen unos cartuchos que son colocados en las carcasas rectangulares de acero inoxidable. La alimentación, se bombea de forma paralela a la membrana, se distribuye a lo largo de los diferentes canales en un extremo, y el retenido se recoge en el extremo opuesto. [18]

Figura 13.

Módulo plano.



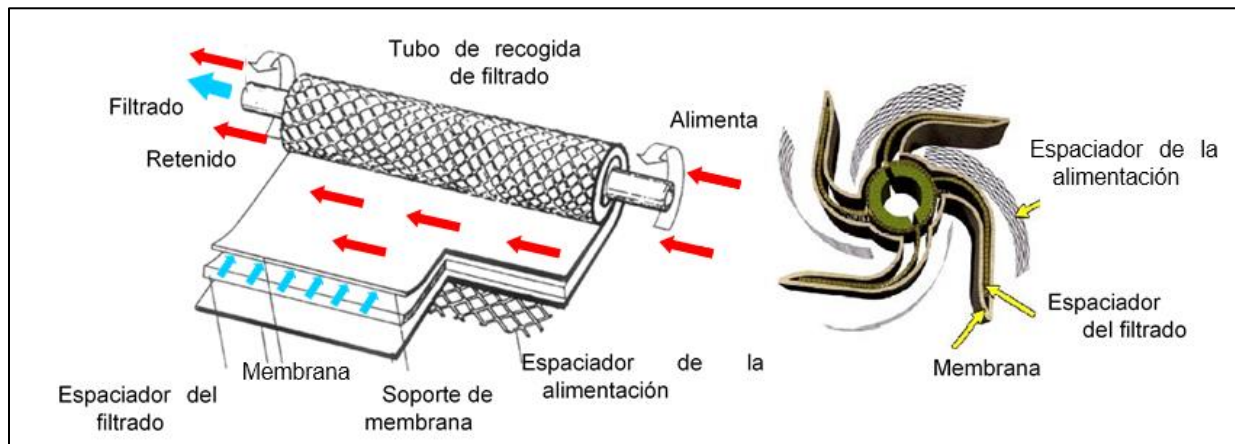
Nota. En la figura se muestra el módulo de placas planas. Tomado de: . F. Ruiz, “Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM.” tesis maestría, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid. [En línea] Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38460/TFM-G979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Arrollamiento en espiral: Esta configuración de módulo es el más compacto y económico. Allí se colocan dos membranas juntas con sus partes activas una frente a

otra, separadas por un material tipo malla y se ajustan por tres lados. El cuarto lado se fija alrededor de un tubo central perforado. Un espaciador se coloca alrededor de la envoltura y todo el sistema se enrolla alrededor del tubo central en una configuración espiral como se representa en la Figura 14.[18] La alimentación se bombea longitudinalmente por la unidad, el filtrado es forzado a pasar entre las láminas de membrana para llegar al canal de filtrado y de manera espiral hacia el tubo colector central perforado. La membrana se coloca dentro de carcadas de PVC o de acero inoxidable.[18] Son uno de los tipos de módulos más utilizados a nivel industrial. [16]

Figura 14.

Módulo en espiral.



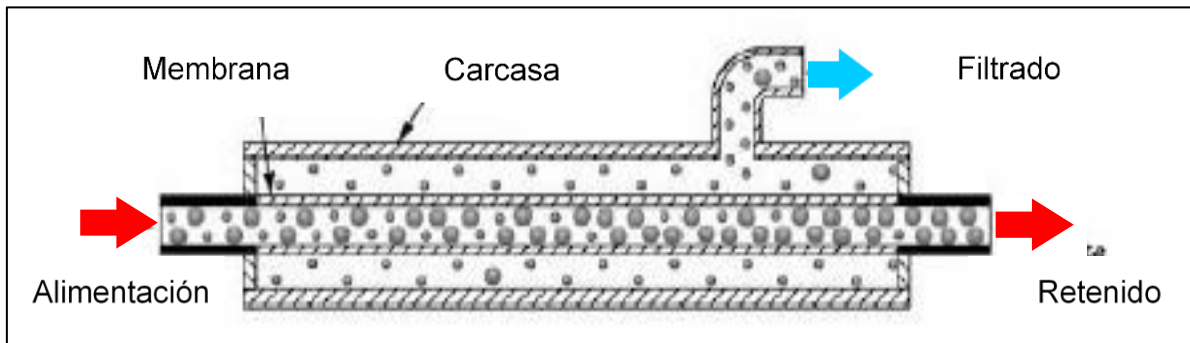
Nota. En la figura se muestra el módulo de membranas en espiral. Tomado de: F. Ruiz, “Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM.” tesis maestría, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid. [En línea] Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38460/TFM-G979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Tubulares: Los sistemas tubulares tienen canales internos relativamente grandes, con diámetros que varían entre 3 y 25 mm y longitudes entre 25 cm y varios metros. Las membranas se introducen en una carcasa de PVC o de acero inoxidable, existiendo la posibilidad de agruparlas dentro de un único cartucho. La alimentación circula por el interior de los tubos, permitiendo al filtrado pasar a través de la membrana y recogiendo en el espacio que queda entre el exterior de la membrana y la carcasa.

[18] Sin embargo, dada su baja tendencia al ensuciamiento y a su facilidad de limpieza, sobre todo en el caso de las membranas tubulares cerámicas, son la configuración más utilizada en la industria láctea. [16] Entre los inconvenientes destaca la menor relación área superficial-volumen que se traduce en un mayor requerimiento de espacio. [18] Estos módulos operan en régimen turbulento con velocidades que oscilan entre 2 y 6 m/s y son capaces de manejar corrientes de alimentación con partículas bastante grandes. [18]

Figura 15.

Membrana de módulo tubular.

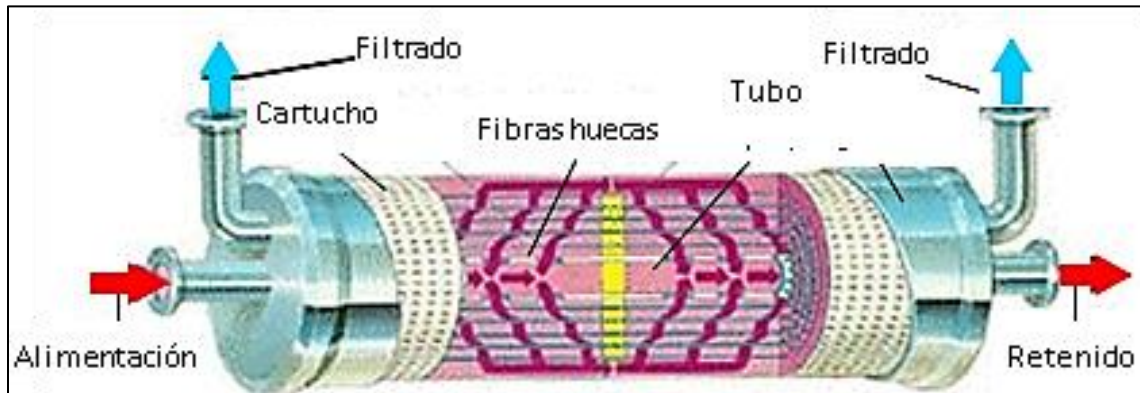


Nota. En la figura se muestra el módulo de membranas en espiral. Tomado de: F. Ruiz, "Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM." tesis maestría, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid. [En línea] Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38460/TFM-G979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Capilares y de fibra hueca: Este tipo de configuración es relativamente reciente. El tipo de membrana que se utiliza es una membrana tubular[18]. Sin embargo, las principales diferencias radican en el menor tamaño de las membranas capilares y de fibra hueca, además no necesitan ubicarse dentro de un módulo que actúe de soporte[16], puesto que la membrana tiene la forma de un tubo autoportante con una capa muy densa en el interior de este.[18] Cada fibra tiene un tamaño de poro muy uniforme, existen disponibles fibras con diámetros comprendidos entre 0,19 y 1,25 mm. Las fibras tienen un espesor transversal de aproximadamente 200 μm . Este tipo de membranas se presentan en forma de haces, los cuales pueden contener entre 50 y 30.000 fibras individuales. [16] Generalmente la alimentación circula por el interior de las fibras, recogiendo el filtrado en el exterior de estas y en el interior de la carcasa. Cada carcasa está provista de una entrada para la alimentación, una salida para el retenido y un par de salidas para el filtrado como se muestra en la Figura 16. Existe también la posibilidad de que la alimentación circule por el exterior de las fibras y el filtrado se recoja en el interior. Esta forma de operación se usa en ósmosis inversa.[18]

Figura 16.

Módulos de fibra hueca.



Nota. En la figura se muestra el módulo de fibra hueca. Tomado de: F. Ruiz, “Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM.”, tesis maestría, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid. [En línea] Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38460/TFM-G979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

4.1.5. Orientación de la corriente de alimentación

La orientación del flujo de alimentación es un factor técnico importante, ya que puede repercutir en el rendimiento del proceso y en el mantenimiento de la membrana. Como consecuencia de ello, cuando la filtración se realiza en dirección perpendicular a la superficie de la membrana, se evidencia la colmatación de las películas observando la reducción del flujo de permeado a pocos minutos de iniciado el proceso, es decir, presenta mayor probabilidad de incrustaciones y, por lo tanto, procedimientos de limpieza para su mantenimiento. Mientras que si la orientación del flujo filtrante es paralela no se percibe descenso en el flujo de permeado y no se afecta la permeabilidad de la membrana. [15]

Otro método que se emplea frecuentemente es circular una corriente de agua en sentido opuesto al flujo de alimentación con el objetivo de eliminar las incrustaciones que se encuentran en la superficie de la membrana, aunque este método no es completamente efectivo, debido a que no garantiza la remoción del total de la película

formada, disminuye el uso de productos químicos para su limpieza. Otra alternativa, resulta mantener constante la presión de operación del sistema o el flujo de filtrado; sin embargo, estas dos últimas metodologías pueden tener efectos adversos en la calidad del producto, rendimiento y reproducibilidad del proceso. [15]

Teniendo en cuenta los factores antes mencionados, es posible reducir el fenómeno de concentración por polarización y el ensuciamiento de la membrana, si se usan espaciadores en su interior (promotores de turbulencia), u obstáculos al flujo normal de permeado que reducen la deposición de partículas sobre la superficie y el interior del equipo y mantienen constante la concentración de los solutos retenidos.

Figura 17.

Espaciadores para reducir el fenómeno de concentración por polarización.



Nota. En la figura se presentan los espaciadores descritos para disminuir el fenómeno de concentración por polarización y el ensuciamiento de la membrana. Tomado de: C.A. Solís, C.A. Vélez, J.S. Ramírez-Navas, Tecnologías de membrana: Ultrafiltración. [En línea] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672017000200026

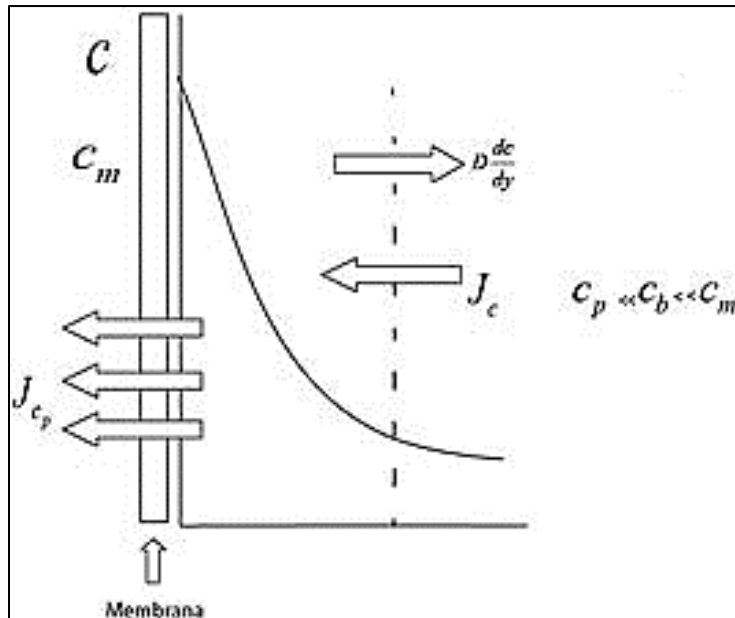
4.1.6. Concentración de solutos retenidos

La superficie de la membrana generalmente presenta acumulación de solutos, debido a que allí ocurre la filtración de solutos. Este fenómeno es conocido como polarización por concentración. Cuando la concentración de solutos aumenta éstos tienden a atravesar la membrana de acuerdo con la ley de difusión de Fick. El ensuciamiento suele provocar una acentuada disminución inicial del flujo de permeado, el cual paulatinamente

alcanza un estado estacionario, lo cual genera caudales significativamente menores al inicial. [46] A causa de esto la membrana puede perder selectividad.

Figura 18.

Fenómeno de polarización



Nota. En la figura se presenta el comportamiento del flujo de permeado en función del tiempo para una membrana. Tomado de: C.A. Solís, C.A. Vélez, J.S. Ramírez-Navas, Tecnologías de membrana: Ultrafiltración. [En línea] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_artt_ext&pid=S1909-83672017000200026

En un proceso de membranas, el soluto se transporta hacia la superficie de las membranas por flujo convectivo generado por el disolvente. Éste atraviesa la membrana en mayor grado, de forma que la concentración de solutos aumenta acercándose a la superficie de la membrana. En condiciones estacionarias, el flujo convectivo y difusivo se igualan formándose una capa límite de espesor. Este fenómeno de aumento de la concentración en la superficie de la capa límite se lo conoce como polarización por concentración. [46]

4.1.7. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad por considerar al momento de emplear tecnologías de membrana, al incrementar la viscosidad se presenta una alta resistencia a la permeación y, por ende, una disminución en el flux; por esta razón, algunos autores recomiendan trabajar a temperaturas superiores a la temperatura ambiente, generando una reducción en la viscosidad del fluido facilitando la transferencia de masa. [11]

4.1.8. Temperatura

La temperatura además de influenciar en los costos energéticos del proceso se relaciona directamente con la viscosidad, al incrementar la temperatura, la viscosidad disminuye, por lo tanto, la velocidad del flujo incrementará. El lactosuero es un fluido tixotrópico, es decir, a medida que incrementa el flujo la viscosidad disminuye, pero al cesar no recupera de inmediato su viscosidad original. A medida que la proteína y la grasa se concentran, el fluido se vuelve más viscoso provocando caídas de presión, sin embargo, a causa de la temperatura los glóbulos de grasa y la proteína se vuelven más solubles y de esta manera, facilitan el flujo a través de la membrana evitando que las partículas se adhieran a las paredes de la membrana. [47] Por esta razón, es recomendable operar a temperaturas superiores a la temperatura ambiente.

4.1.9. Mantenimiento y limpieza

En las tecnologías de membrana es común encontrar colmatación en la superficie o en el interior de los poros de la membrana como consecuencia del paso de solutos. Esta colmatación o fouling genera una resistencia en la transferencia de masa, ocasionando un descenso del flujo de filtrado a través del tiempo. [38] La magnitud de estas colmataciones depende de las condiciones de operación del proceso, como la velocidad tangencial, la presión transmembranal, la composición de la corriente alimento o la temperatura [16]. Por esta razón es necesario realizar ciclos de limpieza y mantenimiento, con el fin de recuperar las propiedades filtrantes de la membrana. La limpieza puede ser de distinta naturaleza: física, química y biológica o sanitaria. [38]

- Limpieza física. Los métodos físicos están basados en la aplicación de esfuerzos mecánicos para eliminar las partículas adsorbidas sobre la superficie. [16] Este tipo de

limpieza consiste generalmente en circular la corriente de alimentación a través del módulo de membrana sin aplicar presión transmembrana. En caso de presentar compuestos adheridos con mayor fuerza a la membrana, se recomienda sustituir la corriente de proceso por una solución de enjuagado haciéndola circular a través de la membrana a alta velocidad. [38] La principal ventaja de la limpieza física radica en que no utilizan reactivos químicos, por lo que el impacto ambiental en el proceso de limpieza es menor.[16]

La limpieza física puede llevarse a cabo de diferentes maneras, una de ellas consiste en aplicar presión en el lado del permeado, de manera que éste vuelva a atravesar la membrana, este método es conocido como Backflushing. [16] Otra manera, consiste en introducir aire de manera constante en el mismo sentido de flujo que la corriente alimento. Permitiendo el debilitamiento de la capa de suciedad depositada sobre la membrana. [16] Entre otros mecanismo de limpieza físicos como: ultrasonidos, campos eléctricos y promotores de turbulencias.

- Métodos químicos. Este método es el más empleado a nivel industrial por su eficacia respecto a los métodos de limpieza físicos. [16] Se basa en la acción específica de un determinado reactivo químico sobre las partículas de suciedad adsorbidas tanto en la superficie de la membrana como en su estructura interna. [16] La mayoría de estos métodos incluyen agentes químicos como ácidos, álcalis, surfactantes, desinfectantes o combinaciones de ellos, causando reacciones de hidrólisis, saponificación y solubilización, entre otras. [16] El mecanismo predominante depende tanto de la naturaleza del agente de limpieza como del contaminante.[38]

En el caso de la industria alimentaria, en particular en la industria láctea, diversos autores proponen el mismo protocolo de limpieza química de membranas. [12] En primer lugar, se realiza una limpieza con álcalis, luego de un aclarado con el objetivo de eliminar los restos del agente de limpieza. Seguidamente, se lleva a cabo una etapa de limpieza ácida, nuevamente se realiza un aclarado. Por último, si las características filtrantes de la membrana no coinciden con las que presentaba la membrana inicialmente, se recomienda realizar una tercera etapa de limpieza empleando surfactantes o desinfectantes, como hipoclorito sódico.[16][12]

Sin embargo, a pesar que los métodos químicos de limpieza presenten una mejor efectividad, los agentes convencionales pueden ser agresivos con las membranas y dañarlas, disminuyendo su vida útil y su selectividad, además de generar un incremento de los costos de producción (grandes consumos de agua y energía) [16] adicional de períodos más largos de limpieza, sin olvidar el impacto ambiental por los vertimientos generados.

4.2. Selección de condiciones de operación para MF y UF.

4.2.1. Antecedentes

Para la selección de las condiciones de operación para la microfiltración y la ultrafiltración se consideraron diversas investigaciones realizadas por distintos autores en la experimentación del lactosuero a través de tecnologías de membrana.

Según *Agnel Muñi, et al.* Investigaron la eficiencia de un sistema de ultrafiltración/nanofiltración tangencial en serie para el fraccionamiento y concentración del lactosuero [48], llevaron a cabo su experimentación en una planta piloto de filtración tangencial provista de dos procesos en serie; un proceso de ultrafiltración y un proceso de nanofiltración. Estos autores realizaron un acondicionamiento al lactosuero dulce proveniente de la producción de queso blanco. Empleando una prefiltración, por medio de una malla de tela de 0,1 mm de diámetro de poro con el objetivo de retener los restos de partículas de queso (arena de queso) y algunos restos de grasa existentes en suspensión. Preparando la corriente para la etapa siguiente, la centrifugación, esta etapa se realizó con el fin de remover la grasa que presentaba el lactosuero. Para esto emplearon una desnatadora Westfalia tipo MTA 5-00-104, con un rendimiento de 750 L/h y 7.700 revoluciones del bol por minuto. Se centrifugó el lactosuero a una temperatura promedio de 35°C y por cargas de 130 litros. [48]

Luego de prefiltrado y centrifugado el lactosuero fue sometido a un proceso de ultrafiltración tangencial, utilizando cargas de 20 L, a una temperatura promedio de 35°C y a cinco presiones transmembrana diferentes para determinar cuál proporciona la mayor

eficiencia de separación de la membrana. Para el proceso de ultrafiltración hicieron uso de una bomba de servicio continuo para alimentar el lactosuero a un módulo de ultrafiltración tipo (FT 30), diseñado y construido con membrana de configuración en espiral por Dow Chemical Company con una capa interna de polisulfona con microporos, una capa de poliamida y una capa de poliéster como refuerzo en el tope de la superficie de la membrana, desde un tanque de acero inoxidable de 25 litros de capacidad; la corriente de concentrado proteico se recirculó al tanque de alimentación y la corriente de permeado rica en lactosa y sales minerales se alimentó a un tanque de PVC de 20 litros de capacidad instalado para ser utilizado como tanque de alimentación en el proceso de nanofiltración.

Las presiones utilizadas fueron: 280,62; 349,56; 418,51; 452,99 y 487,46 kPa. La ultrafiltración se realizó para separar las proteínas del lactosuero, obteniéndose dos corrientes de salida: un concentrado proteico, el cual se recirculó al tanque de alimentación hasta retirar la mayor cantidad de permeado posible (82,50% de la carga), y segunda corriente la cual fue una solución rica en lactosa fue llevada al proceso de nanofiltración. [48]

P. Guerrón realizó una investigación acerca del uso alternativo y aprovechamiento del lactosuero mediante microfiltración y ultrafiltración, donde probó en este último proceso tres membranas con tamaño de poro de 50 kDa, 15 kDa y 4 kDa controlando que la temperatura no pase los 40°C. La experimentación consistió en concentrar las proteínas contenidas en el suero lácteo caprino mediante una secuencia de microfiltración, ultrafiltración y diafiltración.

El proceso de microfiltración lo uso principalmente para retener la grasa, donde en este analisis componentes como la alimentación, el retenido y el permeado, el proceso de ultrafiltración lo uso para concentrar la proteína; el cual consistió en filtrar el permeado de microfiltración con tres membranas tubulares de diferentes tamaño de poro [49], y el proceso de diafiltración se usó para eliminar de los retenidos de la ultrafiltración los componentes sólidos.

Para realizar los proceso de filtración utilizo los siguientes equipos: Microfiltrador tangencial TIA, una membrana tubular de 0,2 μm con área superficial de 0,2 m^2 de cerámica, un ultrafiltrador tangencial "SEMATECH" y membranas de 50kDa y 15kDa tubulares de cerámica con diámetro de 5,85 mm, con área de flujo de 26,87 mm^2 y con área superficial total de 71,49 cm^2 , membranas de 4kDa tubular poliméricas ES404 con diámetro de 12,87mm, con área de flujo total entre las dos de 1,28 cm^2 y con área superficial total de 229,21 cm^2 . Teniendo en cuenta los equipos y procesos mencionados anteriormente el autor habla acerca de la limpieza de estos, posterior y previamente a su uso para alargar la vida útil de la membrana y evitar el taponamiento de la misma, asimismo se hace para mejorar la calidad en el permeado y reducir los tiempos de filtrado para el siguiente proceso.

Para empezar realizo la microfiltración del suero, donde utilizo una cantidad aproximada de 110 kilogramos de lactosuero en total, donde trabajo con una presión de entrada de 4 bar y presión de salida de 2,6 bar; el suero se agrega directo al tanque de alimentación, luego se enciende la bomba de alimentación y la bomba de recirculación, y se comienza a microfiltrar con una membrana cerámica con el uso de un intercambiador de calor, para mantener más o menos una temperatura constante de 40°C, terminada la microfiltración se recoge el permeado en un balde colocado y se pesa para lograr registrar los datos; después de microfiltrar todo el lactosuero se obtuvo un tiempo de operación aproximado de 5 horas y media, teniendo un permeado total de 99,2 kilogramos y 9,3 kilogramos de retenido.

Posterior a la microfiltración se realiza un proceso de ultrafiltrado con membranas de 50, 15 y 4 kDa; primero se colocó el suero microfiltrado en el tanque de alimentación del equipo, luego se enciende el motor que tiene una frecuencia de 10hz, de esta manera se desplazó el flujo a una velocidad de 67,196 mL/s, posteriormente se regula la válvula de aguja hasta obtener una presión de 9 bar, al finalizar el proceso, recolectó la mayor cantidad de retenido y lo mismo con el permeado. Esta ultrafiltración se realiza con membranas de 50kDa y 15kDa con condiciones de temperatura desde los 28°C hasta

los 39°C, en promedio durante todo el proceso realizado con las 2 membranas. Respecto a la ultrafiltración con la membrana de 4kDa se realizó el proceso mencionado anteriormente sin embargo tuvo una presión de 27,57 bar, la frecuencia del motor fue de 47hz, donde se obtuvo un caudal de 321,69 mL/s y una velocidad de 2,5 m/s y sus condiciones de temperatura oscilaron entre 35°C y 39,3°C. Para finalmente realizar un análisis acerca de los valores de permeado y retenido por cada una de las tecnologías de membrana, y de igual manera según las cantidades obtenidas de las variables anteriores lograr proponer los aprovechamientos o usos que pueden obtener.

J. Calderón realiza una investigación para recuperar y aprovechar las proteínas del lactosuero ácido, este proceso se llevará a cabo en la planta de laboratorio del departamento de ingeniería química y nuclear de la universidad Politécnica de valencia, para llevar a cabo este proceso se ha utilizado un sistema de filtración mediante membranas, donde en primer lugar se realiza una filtración y posteriormente una ultrafiltración con membranas de 50 y 15kDa. El autor menciona que, con el fin de minimizar los problemas de ensuciamiento en las membranas de ultrafiltración, al lactosuero procedente, se le realizó un pretratamiento con membranas de microfiltración para eliminar sólidos en suspensión y grasas; esta microfiltración se realizó con una membrana de 10 µm, repitiéndola en tres ocasiones para obtener el mejor resultado posible.

La planta utiliza membranas tubulares de 580mm de longitud y permite su operación tanto para microfiltración como para ultrafiltración debido a sus características; para empezar el proceso de filtrado se introduce en el tanque de alimentación, donde en su interior cuenta con un mezclador y una sonda de temperatura, esta corriente pasa posteriormente a un filtro de cartuchos de 60 µm que evita el paso de objetos grandes que perjudican a la bomba y posteriormente llegaría a la válvula de tres vías. Después de haber pasado a través del tanque de limpieza el cual contiene una solución de NaOH/NaClO, después de la válvula de tres vías, el cual permite la conexión de cualquiera de los tanques, el líquido pasa a través de la bomba regulada y el caudalímetro, a continuación, se encuentra la válvula reguladora, que permite el ajuste de la presión anterior y asimismo se logra registrar la medida de la temperatura. A

continuación, se encuentra la membrana de ultrafiltración, de donde salen sus 2 corrientes de permeado y rechazo, en la que se tiene un medidor de presión. [50] Tras el proceso de ultrafiltración y por razones de higiene y recuperación de las membranas es necesaria una limpieza efectiva, la membrana es llevada a una solución de 250ppm de cloro por un tiempo de 12 horas.

Como se menciona anteriormente el lactosuero es sometido a un pretratamiento, el cual se realiza mediante una microfiltración con una membrana de 10 μm , donde el principal objetivo de esta microfiltración es eliminar materia grasa que contiene el suero, ya que es bastante perjudicial para las membranas de ultrafiltración, pues podría formar colmataciones en la superficie de la membrana disminuyendo drásticamente la densidad de flujo de esta. Posteriormente, al haber realizado el pretratamiento del lactosuero, se realizaron tres ensayos con cada una de las membranas a 1, 1,5 y 2,5 bar. Los resultados obtenidos muestran que la relación entre la densidad de permeado de la membrana de 50kDa y la de 15kDa se ha reducido en comparación con la relación que existía en la permeabilidad del agua, situando el lactosuero en un valor medio para las presiones ensayadas de 3,39 bar. [50]

Después de obtenidos todos los valores experimentales del laboratorio, comenzó a realizar el diseño de la planta piloto para la revalorización del lactosuero, donde usara membranas de ultrafiltración con una longitud de 1.020 mm, área de 0,47m² y un corte molecular de 15kDa, para el cálculo de la cantidad de unidades de ultrafiltración necesarias tomo como referencia un volumen a tratar de 1.500 litros de lactosuero diarios, con un tiempo de trabajo de 14 horas, donde se consideran necesarias 34 membranas.

R. Ibañez propone un proceso de filtración tangencial de alta resolución con proteínas modelo. Para ello, se emplearon tres proteínas con diferente peso molecular y punto isoeléctrico: BSA (PM 69.000), β -lactoglobulina (PM 18.300) y lisozima (PM 14.300). La ultrafiltración fue llevada a cabo a una temperatura de 30°C a través de membranas cerámicas tubulares de un tamaño de corte entre 50 y 300 kDa en el modo de

recirculación total. Para la experimentación se contemplaron variables como: del tamaño de poro, pH, fuerza iónica, velocidad de circulación y presión transmembrana. Para la selección de los tamaños de corte se tuvo en cuenta el peso molecular de las proteínas implicadas (BSA 69 kDa, β -lactoglobulina 18,3 kDa, lisozima 14,3 kDa). [38]

Los experimentos revelaron que la BSA sólo pasaba a través de la membrana de 0,14 μm . En el caso de la β -lactoglobulina, se encontró que únicamente se lograba transportar por la membrana de 300 kDa a pesar de que su peso molecular es de 36,6 kDa (en forma dímera). Finalmente, la lisozima pasó por todos los tamaños de corte, aunque respecto a la membrana de 300 kDa presentó mayor cantidad de proteína. A la vista de los resultados anteriores se seleccionó la membrana de 300 kDa como la más adecuada. [38]

N. Monroy. Desarrolló una propuesta de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero empleando la ultrafiltración, para el procesamiento de un caudal de alimento de 5.280 L/día haciendo uso de dos membranas en paralelo tipo X-Flow AQUAFLEX 20, una bomba tipo HCP SP 65-215, tanques en acero inoxidable para el almacenamiento de lactosuero, reactivos de limpieza y recolección del permeado. [11] Allí establecen que las membranas de cerámica no serían la mejor opción para procesar esta cantidad, puesto que el área de filtración no sería suficiente, considerando el caudal de alimentación, y de emplearse, requiere de dimensiones extensas, por lo que se recomendó el uso de membranas orgánicas, por ejemplo, de polisulfonas, estas presentan amplios rangos en sus propiedades térmicas y mecánicas que les permite ser usadas en diversas aplicaciones, la mejor estructura es en espiral que ayuda a aumentar el área de filtrado. Para su experimentación emplearon un flujo de 0,003 m³/s, presión transmembranaria de 300 KPa, una temperatura de 24°C y el tamaño de poro de 10 kDa, el tiempo de ultrafiltración para este proceso fue de 30 minutos. [11]

Tabla 14.*Condiciones de operación antecedentes.*

Tecnología	Condición	Valor	Autor
Ultrafiltración	Orientación de la corriente	Tangencial	A. Muñi, et al [48]
	Flujo	20 L	
	Temperatura	35°C	
	Membrana	Inorgánica Filmtec, polisulfona	
	Configuración	Espiral	
	PTM	280,62; 349,56; 418,51; 452,99 y 487,46 kPa	
	Lactosuero	Dulce	
Microfiltración	Orientación de la corriente	Tangencial	P. Guerrón. [49]
	Membrana	Cerámica y polimérica, configuración tubular	
	Flujo	1000 L/h	
	Tiempo	5,5 horas	
	Presión entrada	4 bar	
	Presión salida	2,6 bar	
	Temperatura	40°C	
Ultrafiltración	Orientación de la corriente	Tangencial	P. Guerrón. [49]
	Membrana	Cerámica y polimérica, configuración tubular	
	Diámetro de corte	50 kDa, 15 kDa y 4 kDa	
	Flujo	67,196 mL/s	
	Tiempo	5,5 horas	
	Presión (50 y 15KDa)	9 bar	
	Temperatura (50 y 15KDa)	28,6-39°C	
	Temperatura (4KDa)	35-39°C	
Presión (4KDa)	27,57 bar		

Tabla 14. Continuación

Microfiltración	Membrana Tamaño de poro	Tubulares 10 μm	J. Calderón. [50]
Ultrafiltración	PTM Diámetro de corte Flujo	1, 1,5 y 2,5 bar 15kDa 4.000L/h	
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte Flujo pH Temperatura PTM	Membranas de cerámica, configuración tubular 50 kDa y 300kDa 300,400,500 L/h 4,7 y 10 30°C 1 bar	R. Ibáñez. [38]
Ultrafiltración	Diámetro de corte Flujo Temperatura PTM	10kDa 0,003m/s 24°C 3 bar	N. Monroy. [11]
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte Flujo Temperatura PTM	Cerámicas Inside Ceram 50 kDa 400 L/h 30°C 1,5 bar	M. Alméjida [12]
Microfiltración	Orientación de la corriente Tamaño de poro Flujo Temperatura PTM	Tangencial 0,1 y 0,2 μm 1000L/h 20°C 3,5 bar	M. Cáceres, et al [51]

Tabla 14. Continuación

Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte pH Tiempo	Cerámica 300kDa 7 4h	A. Muller, et al. [52]
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte pH Presión Temperatura	Cerámica 300kDa 7 1 bar 50°C	A. Muller, et al. [53]
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte pH pH	Orgánicas 30kDa y 10 kDa 2,8 5,6	S. Bhattacharjee, et al. [54]
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte Temperatura 1 PTM 1 Temperatura 2 PTM 2	Celulosa regenerada 100kDa y 10 kDa 25°C 2 bar 50°C 150 KPa	R. Lu, et al. [55]
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte PTM Temperatura	Polisulfona 150kDa 1 bar 50°C	L. Ricq, et al. [56]
Ultrafiltración	Membrana PTM Diámetro de corte Temperatura	Polietersulfona configuración en espiral 2 bar 10 kDa 50°C	Baldasso et al. [57]

Tabla 14. Continuación

Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte PTM	Polisulfona configuración fibra hueca 10 kDa 0,2 a 0,9 bar	I. Nolasco [58]
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte PTM Temperatura	Polietersulfona Millipore, Bedford. 10 kDa 4,2 bar 11±5°C	Palatnik et al. [46]
Microfiltración	Membrana Tamaño de poro PTM Temperatura	Cerámica configuración tubular 0,2 µm 1 bar 25°C	R. Souza [59]
Microfiltración	Membrana Tamaño de poro PTM Temperatura	Cerámica configuración tubular 0,2 µm 2 bar 30°C	M. Camacho [60]
Ultrafiltración	Membrana Diámetro de corte PTM Temperatura	Cerámicas 50 kDa 3 bar 30°C	
Microfiltración	Membrana Tamaño de Poro PTM	Cerámicas 0,05 a 0,2 µm 1,9 bar	Chacón [61]

Nota. En la presente tabla se exponen las condiciones de operación para la Microfiltración y Ultrafiltración a través de los diferentes autores.

A partir de las diferentes investigaciones para la recuperación de proteínas por medio de tecnologías de membrana como la microfiltración y la ultrafiltración se permitió consolidar los valores registrados en las pruebas experimentales realizadas por los diferentes autores como se muestra en la Tabla 14. Con base a las condiciones registradas se permitió determinar las siguientes condiciones de operación para la propuesta de aprovechamiento por medio tecnologías de membrana.

4.2.2. Condiciones de Microfiltración

La etapa de microfiltración fue propuesta con el fin de retener sólidos en suspensión, por lo tanto, es una etapa de limpieza, de concentración o como pretratamiento[14] para la ultrafiltración, con el fin de minimizar los problemas de ensuciamiento en las membranas de ultrafiltración. [50] De acuerdo con el tamaño de poro para la microfiltración se consigue separar elementos del suero como: residuos de caseínas, fosfolipoproteínas y componentes de la leche descremada tales como: células somáticas, bacterias y esporas que puedan estar presentes en el lactosuero. [49]

Con relación a los antecedentes presentados por los *autores P. Guerrón, J. Calderón, M. Cáceres, et al.* La membrana que se selecciona para el proceso de microfiltración es una membrana cerámica, con configuración de módulo tubular, dado su baja tendencia al ensuciamiento y a su facilidad de limpieza, sobre todo en el caso de las membranas tubulares cerámicas, son la configuración más utilizada en la industria láctea. Al emplear este tipo de membrana representa una gran ventaja con relación a su resistencia térmica y química, considerando que el lactosuero presenta un pH ácido, además tienen una gran durabilidad (aproximadamente 5 años). [16] Adicionalmente, para el tamaño de poro para la membrana seleccionada es de 0,2 μm , tomando como referencia las membranas empleadas por los autores descritos anteriormente.

Respecto a la configuración de la corriente, se decide que la mejor alternativa corresponde al flujo tangencial, con el fin de evitar colmataciones en la superficie de la membrana, y del mismo modo, disminuir el fenómeno de concentración de polarización producido por la acumulación de solutos en la membrana. Considerando que la

alimentación corresponde al lactosuero, este presenta una cantidad de sólidos que pueden bloquear rápidamente la superficie del filtro si se realiza frontalmente. La principal ventaja que presenta la filtración tangencial es que la torta del filtro se va lavando permanentemente mientras el líquido recorre la distancia de la membrana, haciendo que el tiempo de operación de este equipo se alargue, mejorando el rendimiento del proceso y pueda ser continuo, a diferencia de los lotes utilizados en la filtración frontal.[49]

El principio impulsor para la separación en estas tecnologías de membrana es la presión. Para la microfiltración la presión de operación es de 0,5 a 3 bar, como se mencionó en el capítulo de selección de la tecnología. Sin embargo, para las tecnologías de membrana es de suma importancia contemplar el efecto de la presión transmembranaria, conocida como la diferencia de presión que existe entre el lado de la alimentación y el lado del permeado. Al incrementar el flujo aumenta linealmente la presión transmembranaria. [60] Asimismo, la permeabilidad de una membrana varía acorde al flujo de agua y la presión transmembranaria. El rendimiento de la membrana en términos de cantidad de permeado obtenido también se ve influenciada en la velocidad del flujo de alimentación, de la temperatura, la concentración del fluido y de las características fisicoquímicas de la membrana [46]. Adicionalmente, también presenta una variación sobre el efecto de concentración por polarización, al emplear presiones altas implicará mayor cantidad de partículas que se depositan sobre el interior de los poros de la membrana [15], agravando los efectos de polarización, lo que aumentará el porcentaje de rechazo de la membrana, disminuyendo su selectividad. [60] Por lo tanto, la presión transmembranaria seleccionada es de 2 bar, considerando que presiones altas pueden ocasionar el riesgo de descenso del flujo de permeado a causa del ensuciamiento de la membrana. El adecuado manejo de la presión transmembranaria suele ser importante en términos de reducir el impacto de las incrustaciones, pues un efecto de compresión bajo una presión muy acentuada provocaría un agudo incremento en la resistencia hidráulica de la capa colmatante, y una disminución de la selectividad de la membrana. [61]

Para la temperatura de operación de la microfiltración se selecciona un rango en su temperatura de 28 - 30°C, considerando que no se recomienda trabajar a temperaturas ambientales, puesto que podría generar un incremento en la viscosidad del fluido, ocasionando resistencia a la permeación, y por otra parte, emplear temperaturas superiores puede afectar las propiedades del lactosuero, por esta razón se evita emplear proceso térmicos, adicionalmente, podría repercutir en mayores costos energéticos, como menciona *M. Camacho* en su investigación. [60]

4.2.3. Condiciones de Ultrafiltración

La corriente de retenido proveniente de la MF, será llevada a la siguiente etapa de Ultrafiltración. La Ultrafiltración, es una de las tecnologías que se ha empleado con éxito en el fraccionamiento de leche, suero y proteína. [15] El proceso de ultrafiltración permite separar las proteínas del lactosuero, obteniendo dos corrientes de salida: un concentrado proteico y, por otro lado, la corriente de permeado que contiene minerales y un porcentaje de lactosa. Por medio de esta tecnología se han obtenido altos contenidos proteicos en la industria, que han sido aprovechados para enriquecer alimentos como pan, fideos, galletas, salsas, bebidas, guisos, helados, pasteles, alimentos para niños y algunos derivados de la leche. [60]

Por medio de la revisión bibliográfica realizada fue posible determinar las condiciones de operación para esta segunda etapa para la recuperación de proteínas. De acuerdo con diferentes autores como se evidencia en la Tabla 14 las membranas poliméricas y cerámicas son comúnmente empleadas para esta tecnología, sin embargo, cada una de ellas presentan ventajas y desventajas en su implementación. En el caso de las membranas poliméricas u orgánicas (polisulfonas y polietersulfonas) presentan una ventaja con relación a su aplicación en industrias donde el volumen requerido es considerable, requiriendo un tamaño en comparación a las membranas inorgánicas. No obstante, estas membranas presentan una durabilidad de aproximadamente un año, por lo que se debe de disponer de un mantenimiento constante. Por otro lado, se encuentran las membranas cerámicas, estas membranas presentan ventajas considerables a las membranas orgánicas, entre ellas está su resistencia térmica y química, frente a su

alimentación o su método de limpieza, por lo que la hace resistente a diferentes cambios o colmataciones que puedan surgir en el proceso, adicionalmente, su tiempo de vida es superior, alcanzando hasta los 5 años.[16][18] La principal desventaja de este tipo de membrana es su elevado precio.

Con base a lo anterior, se realizó un análisis respecto al tipo de lactosuero, el presupuesto destinado por la empresa, y al volumen de producción del lactosuero, considerando que es una microempresa. Se decide emplear una membrana Cerámica, teniendo en cuenta que el lactosuero presenta un pH ácido, por lo que el uso de una membrana polimérica podría disminuir su tiempo de vida útil, aumentando los costos fijos anualmente, adicionalmente, al manejar un flujo de 400 a 600 litros no se requiere de una membrana de gran tamaño como las de tipo orgánicas como lo describe *M. Camacho*. [60] A pesar de que, las membranas cerámicas puedan repercutir en costos de inversión altos, su durabilidad es mayor, disminuyendo los costos de mantenimiento y limpieza, y los costos de reinversión si se llegara a implementar una membrana polimérica. El diámetro de corte se seleccionó considerando los pesos moleculares para las proteínas de lactosuero que son la β -Lactoglobulina (18kDa), α -Lactoalbúmina (14 kDa) y Seroalbúmina (66 kDa) que serán retenidas por la membrana de ultrafiltración, por lo tanto, el diámetro de corte para la membrana debe ser inferior al peso molecular de las proteínas para lograr su separación, adicionalmente, se tuvo en cuenta los diámetros de corte empleados por los diferentes autores en su experimentación, determinando así que el diámetro de corte para la ultrafiltración será de 10kDa. De esta manera, se logra la recuperación de las proteínas que posteriormente podrán ser aprovechadas, como se definirá en el siguiente capítulo.

Cabe mencionar que estas membranas cuentan con una eficiencia y un porcentaje de rechazo fijado por el fabricante, por lo tanto, en la corriente de permeado se puede encontrar contenido de proteínas que pasaron a través de la membrana y, asimismo, en el retenido se puede encontrar una cantidad de agua que fue rechazada por la membrana y no logró atravesarla. Hay dos factores que determinan la efectividad de un proceso de filtración de membrana: selectividad y productividad. La selectividad se expresa mediante

un parámetro llamado factor de retención o de separación expresado en L/m^2h . La productividad se expresa mediante un parámetro llamado flujo expresado en L/m^2h . La selectividad y la productividad dependen de la membrana. [46]

Para la configuración de la corriente, se decide nuevamente emplear la configuración de flujo tangencial, con el fin de evitar colmataciones en la superficie de la membrana, como se mencionó anteriormente.

Con respecto a la presión de operación para la ultrafiltración emplea presiones mayores con respecto a la microfiltración, su rango de operación se encuentra entre 2 a 10 bar, y la presión transmembranaria se define un rango de (1 -2 bar) teniendo en cuenta que la presión transmembranaria en lo posible no se debe incrementar, puesto que esto podría ocasionar colmataciones en la membrana, es decir, entre mayor sea la PTM , mayor será la cantidad de partículas que se depositan en el interior de los poros de la membrana.[60][15] Por esta razón, al aumentar la PTM aumenta la tasa de flujo y la resistencia de la membrana, reflejándose en la formación de una torta de partículas colmatantes que reducen la permeabilidad y el rendimiento del sistema.[15]

Uno de los principales componentes que producen mayor colmatación en las membranas es el calcio, es común que en el lactosuero se encuentre contenidos de calcio, por lo tanto, al emplear temperaturas superiores a los $30^{\circ}C$ podría disminuir el riesgo por colmatación. [60] Por esta razón, la temperatura seleccionada para la ultrafiltración es un rango de 30 a $50^{\circ}C$, mejorando de este modo la viscosidad del fluido, y evitando incrustaciones en las membranas.

A continuación, se presentan las condiciones de operación para la microfiltración y la ultrafiltración para el lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta.

Tabla 15.*Selección de condiciones de operación*

Variable	Tecnología	
	Microfiltración	Ultrafiltración (UF)
Membrana	Cerámica	Cerámica
Configuración	Tubular	Tubular
Tamaño de poro/ Diámetro de corte	0,2 µm	10kDa
Presión transmembranaria	2 bar	1-2 bar
Temperatura	28-30 °C	30-50 °C
Orientación de la corriente	Tangencial	Tangencial

Nota. En la tabla se exponen las condiciones que fueron seleccionadas para las tecnologías de membrana planteadas.

4.3. Proyección global teórico

Para determinar un estimado de la cantidad de producto a obtener se realizó una proyección global de la etapa de microfiltración y ultrafiltración, empleando valores de porcentaje de rechazo y eficiencia del sistema según las investigaciones registradas en la bibliografía. A continuación, se describe el procedimiento y las suposiciones pertinentes para el establecimiento de la proyección.

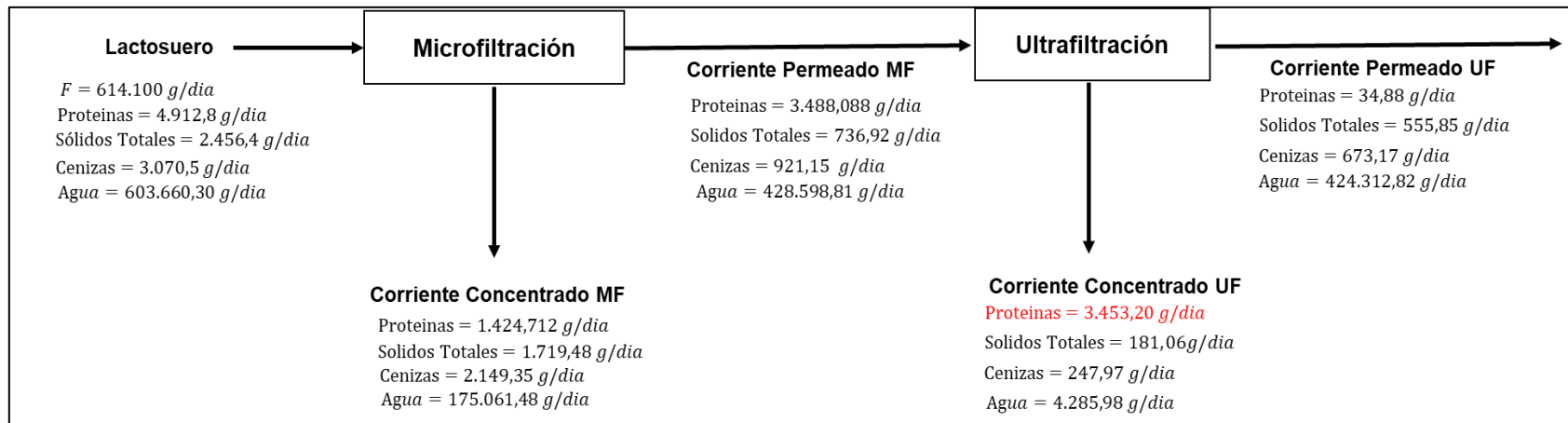
En primer lugar, el nivel de producción que se estableció por La Empresa es de 600L/día de lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta. Este dato fue tomado como base de calculo para la proyección global.

En seguida, por medio de la caracterización realizada se determinó el flujo másico del lactosuero, tomando en cuenta la densidad del lactosuero. Adicionalmente, se consideraron los contenidos de proteína, sólidos totales, cenizas y agua. Como se observa en la Figura 19.

$$\dot{m} = 600 \frac{L}{dia} * 1023,5 \frac{g}{L} = 614.100 \frac{g}{día}$$

Figura 19.

Proyección global del sistema de MF y UF.



Nota. En la figura se representa el diagrama de bloques para el proceso de microfiltración y ultrafiltración, junto a la proyección global teórica del producto deseado.

Para la etapa de microfiltración la eficiencia del sistema según *B. Cuartas* es del 70%. Esto quiere decir que a pesar de que los sólidos totales y el contenido de cenizas deberían concentrarse en su totalidad en la corriente de retenido, debido a la eficiencia del sistema no se cumplirá. Por otro lado, en las tecnologías de membrana se debe considerar el porcentaje de rechazo de la membrana, este puede variar según la especificaciones del proveedor, en la bibliografía se encuentra un valor del 29% de retención.[62] El porcentaje de retención quiere decir que según las características de la membrana no se permitirá el paso de todo el flujo inicial y, por lo tanto, la membrana rechazará una parte del flujo que ingresa.

De la etapa de microfiltración se logra obtener dos corrientes, la corriente de concentrado o retenido, y la corriente de permeado. En la corriente de permeado se encuentran las proteínas del lactosuero y el agua que atraviesa la membrana, debido a la eficiencia del sistema también se encontrará una cantidad de sólidos totales y cenizas, esta última se relaciona con el contenido mineral del lactosuero. Por otra parte, en la corriente de concentrado se encontrará el contenido de sólidos totales y cenizas en mayor proporción, sin embargo, debido al porcentaje de rechazo de la membrana también se encontrará contenido proteico, por lo que se sugiere una recirculación para recuperar el porcentaje de proteínas.

La corriente de permeado de la microfiltración ingresará a la etapa de ultrafiltración, donde se pretende recuperar el mayor contenido de proteínas. El porcentaje de retención para las proteínas según *N. Monroy* es del 99%, permitiendo obtener el producto de interés, que es el concentrado proteico[11]; según *A. Muñi* el porcentaje de retención para el sistema de ultrafiltración para los sólidos totales es del 24.57% y para el contenido mineral es el 26,92% [48]. Para el contenido de agua se asume que se retiene un 1% considerando lo expuesto por *N. Monroy*, de esta manera se logra estimar las cantidades de producto por medio de las tecnologías de membrana como se observa en la Figura 19.

Como resultado del análisis global propuesto se pretende obtener 3.453,20 g/día de proteínas en la corriente de concentrado de la ultrafiltración. Sin embargo, para un mayor

aprovechamiento, se sugiere recircular tanto la corriente de concentrado de la microfiltración, como la corriente de permeado de la ultrafiltración, con el objetivo de recuperar las proteínas que se encuentran presentes en ambas corrientes. Se debe aclarar que los valores obtenidos en la proyección pueden variar acorde a las especificaciones encontradas en las fichas técnicas de las membranas, de las condiciones de operación, nivel de producción y de las proteínas específicas del lactosuero.

5. APROVECHAMIENTOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS EN LA SEPARACIÓN POR MEMBRANA

Con base a las proteínas del lactosuero recuperadas mediante las tecnologías de membrana como la microfiltración y la ultrafiltración, se describen las principales aplicaciones de los concentrados proteicos en las diferentes industrias como se evidencia a continuación.

5.1. Aplicaciones de las proteínas del lactosuero

Las proteínas contenidas en el lactosuero son reconocidas a nivel industrial como sustituyentes de la yema de huevo, leche en polvo y leche descremada, para su aplicación en la fabricación de productos de confitería, panadería y la elaboración de alimentos funcionales. Se utilizan frecuentemente en la alimentación infantil, tercera edad y productos para deportistas por sus propiedades nutricionales, así como en la elaboración de barras de cereales, en productos cárnicos como embutidos; y en una gran variedad de sopas y salsas.[2]

5.1.1. Aplicaciones del concentrado proteico (WPC)

El retenido obtenido de la etapa de ultrafiltración corresponde a las proteínas presentes en lactosuero, estas proteínas son denominadas comercialmente como concentrados de proteínas del suero (WPC). Quienes a partir de un proceso de filtración, por medio de una membrana semipermeable, permite separar selectivamente las proteínas de los demás compuestos presentes en el lactosuero.[63] Los concentrados de proteína contienen entre el 20% y 89% de proteína, y a partir de su contenido de proteínas los concentrados proteicos se pueden clasificar en WPC35, WPC50, WPC65, y WPC80, siendo el WPC con 35% de proteína el producto más común en el mercado. [64] [65] Asimismo, otro de los productos que se logra obtener mediante la aplicación de tecnologías de membrana, son los asilados de proteínas (WPI), estos presentan un contenido proteico superior al 90%, el cual sólo puede ser alcanzado con la disminución de la grasa y del contenido de minerales. Sin embargo, para llegar a obtener los WPI es necesario implementar etapas extras a la ultrafiltración, como la microfiltración y la

diafiltración. Por esta razón, dentro de las posibles aplicaciones para las proteínas se tendrán en cuenta exclusivamente los concentrados de proteína. [64]

Tecnológicamente, la β -Lactoglobulina y las subfracciones de α -Lactoalbúmina tienen la capacidad de desarrollarse y formar agregados entre ellas, otorgando importancia en la optimización de las propiedades estructurales en la formulación de nuevos productos. [64] Adicionalmente, por las características de solubilidad en amplios rangos de pH, su capacidad de retención de agua, viscosidad, gelación, emulsificación y espumado, las proteínas séricas presentan gran potencial como ingrediente en la elaboración de yogur, queso para untar, postres de crema, crema batida, flanes, natillas, mousses, pudines, formulaciones para helados y en productos de confitería como caramelos, chocolates, dulces y recubrimientos.[64]

Los concentrados de proteína con contenido del 35% (WPC35) son elaborados como sustitutos de leche descremada, fabricación de embutidos, bebidas no fermentadas, productos de formulaciones infantiles y suplementos alimenticios debido a las propiedades funcionales de sus proteínas y sus beneficios nutricionales. [63] Cabe mencionar, que los concentrados de proteína empleados para las fórmulas infantiles deben contar con un proceso de desnaturalización de la proteína β -lactoglobulina, debido a que ha registrado casos de alergia infantil; por lo cual limita el uso de la leche de bovinos como materia prima para la producción de leche para infantes. [9]

Por otra parte, los concentrados proteicos que presentan un 80% (WPC80), son formulados para aplicaciones como gelificación, dulcificantes y formación de espuma.[63]

Los precios relativos en el mercado para los concentrados proteicos y los aislados proteicos pueden variar acorde a su presentación, sabor y marca. Para un concentrado proteico de 80% proteína, en presentación de 1 kg el valor que registra en el mercado es de \$60.000, para un concentrado con 78% de proteína de una marca diferente en una presentación de 2 kg tiene un valor de \$234.000. Por otro lado, para los aislados de proteína en presentación de 2 kg con 90% de proteína, tiene un valor \$334.000 y en

presentación de 750 g un valor de \$131.000. Como se observa, debido a la complejidad del proceso para la obtención de los concentrados y aislados de proteína, estos presentan un valor superior en el mercado.

Dentro de las aplicaciones para los concentrados proteicos se lograron encontrar diversos usos en la industria alimenticia, los cuales proveen una alternativa económica para su aprovechamiento, reduciendo de esta manera el impacto ambiental generado por los vertimientos del lactosuero, logrando aprovechar este subproducto generando un valor agregado. Como se describen a continuación:

- Sustituto de leche descremada para la fabricación de caramelos. Según *Ahmed et al*, los concentrados proteicos presentaron resultados favorables en la elaboración de caramelos, al sustituir la leche descremada por WPC, permitiendo mantener las condiciones de proceso y la reducción de los costos de materia prima, puesto que estos concentrados presentan un costo inferior a la leche descremada sin afectar la calidad del producto final. En algunos caramelos se agrega una mínima cantidad de caseína (caseinatos hidrolizados) además de las WPC, para evitar la alteración de las propiedades de flujo a baja temperatura. [66] [64]
- Producción de helados. *Alfaiji y Stahopoulos*. Analizaron la sustitución de yema de huevo por WPC. En este estudio emplearon concentrados proteicos del 80% de proteína en proporciones del 20, 50, 80 y 100% en un helado Gelato. Elaboraron muestras con dos niveles de yema de huevo (4,5 y 9%) y estudiaron el efecto del concentrado proteico como sustituto de la yema de huevo. Determinando que, en ambos niveles, a mayor porcentaje de WPC se incrementó el volumen debido al aumento en la formación de células de aire y se mejoraron las características de textura. Para el ensayo con la sustitución del 100% de la yema de huevo se aumentó el número de cristales de hielo en el helado. En los ensayos con 4,5% de yema la viscosidad disminuyó, lo que atribuyeron al menor contenido de grasa en comparación con los ensayos con 9% de yema. [64][67]

La producción de helados a partir de lactosuero es una de las aplicaciones con mayor uso en la industria. La elaboración de helado puede llevar a ser un producto intermedio para La Empresa. Un estudio realizado por *A. Amezquita* propone un diseño de un subproducto a base de lactosuero en la Fábrica de Lácteos Belén, allí evaluaron los diferentes aprovechamientos para el subproducto entre los que se encontraban bebidas energizantes, helados, queso Ricotta y yogures. Por medio de una matriz de priorización y con base a criterios de selección como: Preferencia de la empresa, utilidad, aceptabilidad en el mercado y tiempo de realización evaluaron cada alternativa. Donde la que obtuvo mayor puntuación fue la producción de helados partir de ingredientes bajos en grasa y lactosuero ácido. [68] Para la obtención del producto deseado emplearon 9 litros de lactosuero para la producción de 177 helados.

En esta investigación realizaron la comparación con la competencia, donde consideraron empresas como: Helados San Jerónimo y Frezeen. La comparación en los precios se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16.

Comparación producción de Helados Fábrica Belén vs Competencia

Empresa	Presentación	Composición Nutricional	Precio promedio
San Jerónimo	100g	Calorías Totales: 252g Carbohidratos:34 g Grasa Total: 18 g Proteína: 4 g	\$4.500
Helados Frezeen	100g	Calorías Totales: 28g Carbohidratos:10,4 g Grasa Total: 3,2 g Proteína: 12 g	\$9.000
Lácteos Belén	100g	Calorías Totales: 16.4g Carbohidratos: 16,64 g Grasa Total: 4,8 g Proteína: 3,82 g	\$2.900

Nota. En la tabla se presenta la comparación de la competencia vs la producción de helado de crema de leche con curuba, de bajo contenido calórico de la empresa Lácteos Belén. Tomado de: A. M. Amezquita, A. F. Camargo, y D. M. Guerrero, «Diseño de un subproducto a base de lactosuero en la Fábrica de Lácteos», pp. 1-36, 2012, [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/36471/AmezquitaCoronadoAnaMaria2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Adicionalmente, presentaron el estudio financiero para el proyecto donde la inversión para la Fábrica Lácteos Belén es de \$137.518.235, la relación costo beneficio es de 1,19 y el indicador económico empleado demuestra que es un proyecto viable. Por lo que es una alternativa llamativa para la industria, de este modo, el lactosuero también puede ser aprovechado para la incursión de una nueva línea de producción para La Empresa como se observa en compañías similares como la Fábrica de Lácteos Belén o como insumo para la fabricación de otros productos.

- Sustituto de leche en polvo en confitería. Hideko *et al.* Emplearon concentrados proteicos en proporciones del (1%; 2% y 3%) en un postre lácteo cremoso de chocolate. Determinando la posibilidad de sustituir la leche en polvo por WPC, obteniendo un producto con menos grasa y sólidos totales, y un mayor contenido de proteína. Sensorialmente el producto elaborado con 1% de WPC fue el preferido en el análisis sensorial. [64][69]
- Fabricación de yogur enriquecido con concentrado proteico. Según M.Otal. Hacen uso de un concentrado proteico, para aumentar el contenido de proteínas del yogur el cual puede ser incrementado previamente al proceso fermentativo, mediante la adición de WPC y concentrados de proteína de leche (MPC), obtenidos a través de técnicas de filtración por membrana. [70][71][72] A nivel tecnológico el incremento del nivel de proteínas afecta a la textura del producto final, modificando la consistencia del yogur, es así, como la obtención de una buena textura del yogur se debe a la formación de los complejos de proteínas de suero. [65] A su vez, los yogures con alto contenido proteico resultan especialmente de interés de dietas para bebés, ancianos o deportistas debido a la capacidad de proteínas séricas para aumentar los aminoácidos plasmáticos y fortalecer el desarrollo de la masa muscular.[65][73]

La fabricación de yogures puede realizarse con el objetivo de ofrecer un producto enriquecido con proteínas por medio de los concentrados de proteínas obtenidos del lactosuero por medio de las tecnologías de membrana como se evidencia en la literatura, o también, el lactosuero líquido puede ser empleado como insumo para la producción de yogures comunes. En un artículo publicado por el periódico El Consumo de Ecuador estiman que el 10% del lactosuero generado por el país es empleado como insumo para la producción de bebidas lácteas. [74]

Una investigación realizada por M.Videa, *et al.* realizan un yogurt natural a partir de leche con suero lácteo a escala de laboratorio, allí emplearon tres formulaciones con diferentes proporciones de suero y leche entera 30/70, 50/50 y 70/30, respectivamente. Donde la primera muestra presentó las mejores características organolépticas. El rendimiento obtenido para la fabricación fue del 54% de la producción, con 3,68 kg de

mezcla de lactosuero y leche entera se obtuvo 2,11 kg de yogurt. Adicionalmente, se determinaron los costos de producción para 100 yogures de presentación de 250 ml donde el resultado fue de \$195.008,80 obteniendo un costo por unidad de \$1949,79.[75] En el mercado colombiano, el precio estimado para los yogures se encuentra entre \$3.000 a \$3.500. [76]

- **Suplementos nutricionales.** Una de las aplicaciones más comunes de los concentrados proteicos son la fabricación de suplementos alimenticios para deportistas. Los aminoácidos ramificados básicos y esenciales (BCAA) son importantes para los atletas, puesto que a diferencia de otros aminoácidos esenciales, se metabolizan directamente en el tejido muscular y son los primeros aminoácidos utilizados durante los periodos de ejercicio y de entrenamiento de resistencia.[77] Los concentrados proteicos obtenidos a partir de la proteína de suero contienen todos los aminoácidos esenciales y, por consiguiente, es una fuente de proteínas completa y de alta calidad, haciendo referencia a que la proteína de lactosuero contiene todos los aminoácidos esenciales para el crecimiento de los tejidos corporales. [77] Esta proteína se encuentra disponible en estructuras que contienen poca grasa y carbohidratos, convirtiéndose en una fuente particularmente valiosa de nutrición para atletas y para individuos con necesidades médicas especiales (por ejemplo, individuos que no toleran la lactosa) y puede ser un componente valioso de un programa dietético. Además, como la proteína de suero contiene proteínas biológicamente activas tales como las inmunoglobulinas, lactoperoxidasa y lactoferrina, ésta proporciona ventajas sobre otras fuentes proteicas tal como la proteína de la soja. La proteína de suero tiene además un sabor fresco y neutro y, por consiguiente, puede ser incluida en otros alimentos sin afectar desfavorablemente el sabor.[77]

- **Quesos.** Con los avances en la tecnología de lácteos, se ha permitido obtener nuevos productos como leche en polvo, lactosuero en forma de polvo o concentrados de proteína de lactosuero (WPC) a partir de la fabricación del queso. En un estudio, observaron el comportamiento del queso Cheddar al adicionar proteína coagulada o en forma de concentrado, observando un aumento en el rendimiento, y alteraciones en la textura, cuerpo y contenido de humedad. Por otro lado, en el queso tipo Camembert se

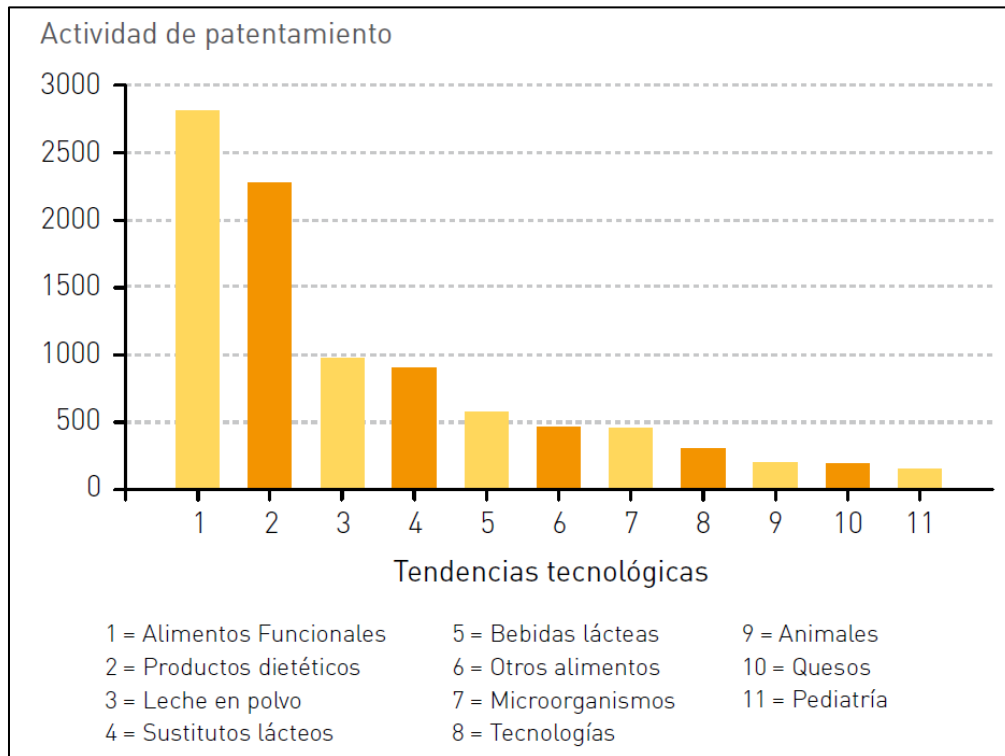
ha obtenido un rendimiento de 30% al añadirse 1% de WPC, para el queso Saint-Paulin al cual se le añadió 5,56% de proteína se obtuvo 12% de rendimiento. Observando que el mayor rendimiento se obtuvo para el queso Cammebert. [9]

- Alimentos funcionales y dietéticos. Los alimentos funcionales son aquellos que cumplen una función específica, adicional a sus características nutricionales, con el fin de mejorar la salud y reducir el riesgo de enfermedad.[78] Los escenarios en Colombia frente a los alimentos funcionales han presentado un reciente interés; las universidades y centros de investigación, comienzan a consolidar grupos de trabajo en el tema, en vista de la problemática actual con la comida chatarra.[79] En consecuencia, enfermedades como la obesidad, se ha buscado desarrollar y fortalecer los hábitos saludables desde la infancia, por esta razón, el cambio en los hábitos alimenticios es determinante para reducir las tasas de obesidad infantil.[80] Por medio de los alimentos funcionales se permite dar un nuevo enfoque a la nutrición y salud mundial permitiendo mejorar la calidad de vida, disminuyendo los costos en problemas de salud pública. [79] Por medio de los concentrados de proteínas del suero se pretenden incrementar la concentración de macronutrientes, esta operación de fortificación o adición del componente activo hace que las dosis diarias del alimento logre acercarse a las recomendaciones de los organismos reguladores, brindando de esta manera un producto de calidad y que cumpla con los parámetros nutricionales, evitando información engañosa.[46]

Basados en el estudio de patentes presentados por la superintendencia de Industria y comercio para el uso del suero de leche en alimentos y sus sustitutos, se logra observar que la mayor cantidad de patentes correspondientes a la valorización del lactosuero a nivel mundial para el año 2013 corresponden a la producción de alimentos funcionales, seguidos por alimentos dietéticos. Los alimentos funcionales, cuentan con aproximadamente 2.800 patentes, de las cuales 208 corresponden a patentes con proteínas lácteas; por otro lado, la tecnología que se encuentra en segundo lugar corresponde a los productos dietéticos con un total de 2.277 patentes de las cuales 1.690 corresponde a alimentos dietéticos con proteínas lácteas. [59] Como se muestra la Figura 20.

Figura 20.

Actividad de patentamiento de las principales tendencias tecnológicas.

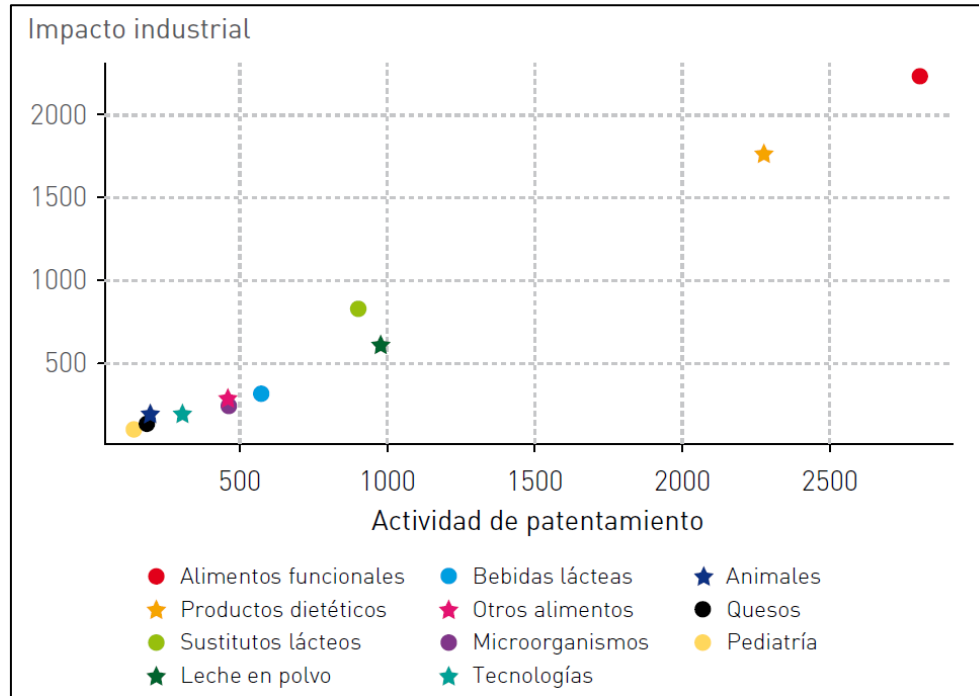


Nota. En la gráfica se presentan las tendencia tecnológicas en la valorización del suero de leche a nivel internacional. Tomado de: Uso del suero de leche en alimentos y sus sustitutos. Superintendencia de Industria y comercio. (2013) [En línea] Disponible en: https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines_Tecnologicos/Boletin_Suero.pdf

Dentro de las patentes de productos dietéticos se encuentran formulaciones para mejorar el sistema inmunológico, conocidos como suplementos alimenticios, estos son ricos en proteínas como las leguminosas, proteínas de suero, proteínas de clara de huevo y caseinato de calcio, adicionadas con leche en polvo descremada. Se utiliza para el control de peso por reducción del apetito.[78] Estos productos dietéticos presentan una actividad de patentamiento e impacto alto a nivel industrial comparado a las demás alternativas de aprovechamiento como se muestra en la Figura 21.

Figura 21.

Impacto industrial de las principales tendencias tecnológicas de aprovechamiento.



Nota. En la gráfica se evidencia la actividad e impacto de los principales aprovechamientos del suero de leche. Tomado de: Uso del suero de leche en alimentos y sus sustitutos. Superintendencia de Industria y comercio. (2013) [En línea] Disponible en: https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines_Tecnologicos/Boletin_Suero.pdf

Según la regulación colombiana, un suplemento dietario es aquel producto cuyo propósito es adicionar a la dieta normal, que puede contener vitaminas, minerales, proteínas, aminoácidos, otros nutrientes y derivados de nutrientes, plantas, concentrados y extractos de plantas solas o en combinación; y según el estudio, para los usuarios es claro que los suplementos dietarios sirven para complementar la alimentación y no para reemplazar las comidas o tratar enfermedades. Uno de los estudios de mercado realizado por Euromonitor reflejan que los suplementos dietarios presentan un

crecimiento significativo, en su proyección para el año 2019 se estimaban \$274.300.000.000 en Colombia, para el año 2024 se proyecta un crecimiento en el mercado del 22,2% en el país, examinando los múltiples beneficios nutricionales que estos productos complementan la alimentación, la firma estima que para el año 2024 alcanzarían los \$ 335.200.000.000.[81]

En América latina también se evidencia un incremento en el mercado para el año 2019 las ventas al consumidor finales fueron de U\$2.748.000.000, lo cual representa una variación de 50,7% comparado con datos de años anteriores. Un estudio realizado por Nielsen para la cámara farmacéutica de la Asociación Nacional de Industriales (ANDI) relaciona los complementos dietarios y la práctica de hábitos de vida saludable observando un interés significativo en los últimos años para los colombianos. El análisis se llevó a cabo por medio de una encuesta, donde participaron 806 personas entre 18 y 64 años en seis regiones del país, arrojando que el 66% de la población ha consumido suplementos dietarios en los últimos seis meses. Los principales tipos de suplementos dietarios que utilizan los encuestados son: vitaminas 45%, proteínas y aminoácidos 17%, suplementos botánicos o bioactivos 16% y minerales 15%. [81]

Con relación a la proyección de mercado para los productos dietarios, se observa una buena alternativa de aprovechamiento para los concentrados de proteínas del lactosuero. Adicionalmente, fuentes como *El Tiempo* en colaboración con la Alianza Latinoamericana de Nutrición Responsable (ALANUR) reportaron el pasado mes de abril del 2021 en su convención, a Colombia como uno de los países con mayor consumo de suplementos alimenticios, para ser exactos, el segundo país de Latinoamérica después de Brasil, superando el 40% de la población. [82] Según las cifras expuestas en la convención, el 45% de la población colombiana (veintidós millones y medio) conforme a las proyecciones del Dane consumen estos productos, especialmente la clase media.[83] Ahora bien, conforme a la situación sanitaria actual, los productos dietarios y vitaminas se convierten en un producto de especial interés con el fin de potencializar el sistema inmune frente a la realidad del COVID-19.

El precio en el mercado de los alimentos funcionales y productos dietéticos puede variar acorde a las características del producto, su función, marca, y presentación. Uno de los productos que se tomaron como referente es el Ensure en presentación de 850 g registra un precio en el mercado de \$95.150. De esta manera, los alimentos dietéticos se seleccionan como principal aplicación para las proteínas del lactosuero recuperadas de la ultrafiltración. Sin embargo, en relación a los anteriores aprovechamientos mencionados se recomienda realizar un estudio de mercado donde se evalué la viabilidad de los aprovechamientos propuestos, con el fin de emplear el lactosuero ya sea como insumo, o para la incursión de una nueva línea de productos para La Empresa.

5.2. Aplicaciones del permeado de ultrafiltración

El permeado obtenido de la ultrafiltración presenta características que también pueden ser aprovechadas; por medio de la etapa de microfiltración se permitió reducir la carga microbiológica, por lo tanto, es una corriente que cuenta con las características apropiadas para emplearse en la fabricación de bebidas no fermentadas, teniendo en cuenta que el tipo de lactosuero empleado para la fabricación de este tipo de bebidas es un lactosuero ácido.

Generalmente, el sabor del suero ácido es más compatible con los jugos y/o pulpas de frutas cítricas; principalmente naranja, limón, pomelo, mango, maracuyá, pera, durazno y manzana [9]. Por esta razón, se emplean los sueros ácidos en forma de acidificantes en la elaboración de algunas bebidas, a las cuales se les añade entre un 4 y un 5% de jugos cítricos, proporcionando así una bebida rica en nutrientes, con un pH estable, y un alto valor nutritivo, el cual rehidrata y es menos ácido que los jugos de frutas [2].

En la elaboración de algunas bebidas a base de lactosuero se suele presentar problemáticas con la presencia de proteínas y componentes grasos. Sin embargo, al aprovechar la corriente de permeado esta presentara bajo contenido de grasas debido a la etapa de microfiltración y bajo contenido en proteínas por la etapa de ultrafiltración, debido a la eficiencia de la membrana.

Después de la segunda guerra mundial, este problema se solucionó al utilizar lactosuero desproteinizado y sin grasa. Un ejemplo bien conocido de bebida refrescante es “Rivella” producida en Suiza desde 1950 y hoy en día consumida en Canadá y Holanda. Rivella es una bebida de lactosuero pasteurizada, carbonatada, con un sabor de fruta agrídulce y un pH de 3,7. En 1970 la compañía Coca-Cola seleccionó WPC como nutrientes para mejorar la calidad nutricional de sus bebidas. Las bebidas pudieron ser fortificadas con un 1% de proteínas derivadas de la elaboración de queso sin que se detectaran cambios en el sabor y apariencia. [9]

El desarrollo de las bebidas a base de lactosuero puede representar un mercado prometedor en los países de América del Sur, debido a la producción de productos lácteos, su demanda ha incrementado en las últimas décadas, principalmente por el aumento de la capacidad de compra de los consumidores [2]. En países de Latinoamérica como en Colombia y Brasil, estos productos han alcanzado un posicionamiento en el mercado con una gran aceptación entre los consumidores. A modo de ejemplo, en Brasil, más del 40% de la población consume semanalmente bebidas a base de lactosuero y existe una gran diversidad de productos disponibles en el mercado. [2]

En vista de la tendencia en el mercado de los alimentos funcionales este tipo de bebida ha presentado una imagen positiva frente al consumidor por su valor nutricional. A diferencia de los jugos de frutas estas bebidas cuentan con un contenido adicional de proteína, carbohidratos, vitaminas y minerales. Adicionalmente, atiende a las exigencias de los nuevos mercados, haciendo de este producto una buena alternativa para la valorización del permeado obtenido de la ultrafiltración[2].

Por medio del análisis de las diferentes aplicaciones del lactosuero para la incursión de nuevos productos, se evidencia las tendencias nacionales e internacionales para lograr la valorización de este subproducto. Enfrentando los prejuicios que se tienen acerca del lactosuero, ya que normalmente es conocido en la industria láctea como elemento generador de “rendimientos”, sin embargo, esto no quiere decir que disminuye la calidad de los productos, sino que aporta un valor agregado en cuanto a su contenido

nutricional y contribuye a la reducción de su impacto ambiental. Esta práctica ha estigmatizado su uso en la industria, lo que ha generado resistencia en algunas empresas para contemplar otro tipo de aplicaciones de este subproducto. El cambio cultural que representa se convierte en un reto importante para masificar y potencializar el aprovechamiento del subproducto en la industria láctea [78].

6. CONCLUSIONES

Por medio de la caracterización realizada al lactosuero proveniente de la elaboración de queso Ricotta a partir de leche de búfala, se identificaron las siguientes propiedades fisicoquímicas: pH de 4,61, proteína 0,8g/100g, densidad 1,0235 g/ml, acidez 0,33 g/100g, humedad 93,7 g/100g, sólidos totales 6,3 g/100g, cenizas 0,5 g/100g y grasa 0,4 g/100g. Determinando, así las proteínas como componente de interés la recuperación, teniendo en cuenta el valor agregado de las proteínas séricas en la industria. Asimismo, se permite clasificar el lactosuero como un lactosuero ácido, que influirá en la selección de las tecnologías de membrana y sus condiciones.

Para la selección de las tecnologías de membrana se empleó el método de análisis jerárquico; por medio de una matriz de selección se evaluó la ponderación de cada uno de los criterios técnicos a contemplar en cada una de las tecnologías como: temperatura, diámetro de corte y presión de operación; priorizando las tecnologías que permitieran la recuperación de proteínas séricas y su gasto energético. Adicionalmente, se tuvo en cuenta el volumen de producción por la empresa, que se encuentra entre 400 a 600 L/día; junto a su presupuesto de inversión para el presente proyecto, considerando el elevado costo de las tecnologías. De esta manera, se seleccionaron dos tecnologías de membrana, la microfiltración como etapa de pretratamiento y la ultrafiltración para la recuperación de proteínas.

Teniendo en cuenta las tecnologías de membrana seleccionadas, se determinan los parámetros y condiciones para la recuperación de proteínas mediante la revisión bibliográfica expuesta por diferentes autores para la obtención de proteínas contenidas en el lactosuero. Permitiendo así, analizar las condiciones que presentaron un mejor desempeño y la influencia de las variables con respecto al resultado, determinando el comportamiento de la presión transmembranaria, tamaño de poro, temperatura, orientación de la corriente, material y configuración de la membrana. Considerando que estas tecnologías requieren de un mantenimiento constante y a partir de las condiciones fijadas pueden repercutir en la vida útil de la membrana. Las condiciones seleccionadas para las tecnologías fueron:

- Microfiltración: PTM 2 bar, temperatura 28°C a 30°C, tamaño de poro 0,2 micras material membrana cerámica, configuración tubular y orientación de la corriente tangencial.
- Ultrafiltración: PTM 1 a 2 bar, temperatura 30°C a 50°C, diámetro de corte 10kDa, material membrana cerámica, configuración tubular y orientación de la corriente tangencial.

Se determinaron los posibles aprovechamientos de los concentrados de proteína de lactosuero y la corriente de permeado de la ultrafiltración. De esta manera, por medio de la revisión bibliográfica se analizaron las tendencias en la valorización del lactosuero, observando un incremento significativo en la actividad de alimentos funcionales y productos dietéticos, seleccionando que la mejor alternativa para el aprovechamiento de concentrados proteicos corresponde a suplementos dietéticos, según la proyección realizada por Euromonitor refleja el crecimiento de este producto en el mercado colombiano. Por otro lado, para las aplicaciones del permeado de ultrafiltración se evidenció que la alternativa más frecuente para este tipo de lactosuero ácido es la aplicación en bebidas carbonatadas no fermentadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. R. Gallego, «Producción más Limpia en la Industria Alimentaria», *Ebsco*, vol. 1, n.º 1909-0455, p. 16, 2006.
- [2] M. González, M. L. Castells, J. Di Risio, P. Juliano, y R. Garcia, *Valorización del lactosuero*. 2017.
- [3] O. A. Sbodio y G. R. Revelli, «Coagulación de la leche. Desarrollo de un dispositivo para el “monitoreo” online del proceso. Avances en la Argentina», *RIA. Rev. Investig. Agropecu.*, vol. 38, n.º 3, pp. 236-246, 2012.
- [4] J. S. Ramírez Navas, «Aprovechamiento Industrial de Lactosuero Mediante Procesos Fermentativos», *Publicaciones e Investig.*, vol. 6, p. 69, 2012, doi: 10.22490/25394088.1100.
- [5] G. Keifer y F. Effenberger, «Suero de leche», *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 6, n.º 11, pp. 951-952, 1967.
- [6] J. S. Ramírez-Navas, C. A. Solís-Carvajal, y C. A. Vélez, «Tecnología de membranas: Obtención de proteínas de lactosuero», *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 12, n.º 24, p. 52, 2018, doi: 10.31908/19098367.3815.
- [7] P. R. Santagapita, *Aprovechamiento de subproductos y valorización de recursos autóctonos: interrelación investigación-producción-desarrollo y sociedad*, vol. 1. 2016.
- [8] Y. Motta-correa y M. Mosquera, «Aprovechamiento del lactosuero y sus componentes como materia prima en la industria de alimentos», *Cienc. y Tecnol. Aliment.*, vol. 13, n.º 1, pp. 81-91, 2015.
- [9] R. A. Parra Huertas, «Lactosuero: importancia en la industria de alimentos.», *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 62, n.º 1, pp. 4967-4982, 2009, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472009000100021&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- [10] J. S. Nafar Rodríguez y A. M. Galeano Ortiz, «Determinación de una alternativa viable para el aprovechamiento del lactosuero generado por la empresa quesillos armero guayabal.», 2020.
- [11] N. Monroy Pedraza, «Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración», 2020.

- [12] M. Almecija, «Obtención de lactoferrina bovina mediante ultrafiltración del lactosuero», 2007.
- [13] Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL), «Prevención de la contaminación en la Industir Láctea», *Plan Acción para el Mediterráneo*, pp. 5-164, 2002.
- [14] J. S. Solís, C.A. Vélez, C.A. Ramírez, «Tecnología de membranas: desenvolvimiento histórico», *Entre Cienc. e Ing.*, n.º 19, pp. 89-98, 2016.
- [15] C. A. Solís Carvajal, C. A. Vélez Pasos, y J. S. Ramírez-Navas, «Tecnología de membranas: Ultrafiltración», *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 11, n.º 22, p. 26, 2017, doi: 10.31908/19098367.3546.
- [16] M. . Corbatón, «Limpieza De Membranas De Ultrafiltración Aplicadas En La Industria Alimentaria Por Medio De Disoluciones Salinas Y Caracterización Del Ensuciamiento De Las Membranas», p. 395, 2011.
- [17] L. R. Posada David, «Nanofiltración en el manejo del lactosuero», *J. Eng. Technol.*, vol. 5, n.º 2, pp. 10-25, 2016, doi: 10.22507/jet.v5n2a4.
- [18] Á. F. Ruiz, «Caracterización de membranas de ultrafiltración. Estudio comparativo mediante porosimetría LLDP y análisis de imágenes SEM.»
- [19] M. A. Gaitán Moreno, «Estudio de una linea de elaboración de queso Mozzarella ecológico a partir de leche de búfala y de vaca», Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
- [20] E. M. Patiño, «Producción y calidad de la leche bubalina», *Tecnol. en Marcha*, vol. 24, n.º 5, pp. 25-35, 2011.
- [21] M. Artega, I. Soto, J. Soto, L. Therán, y G. Vélez, «Evaluación fisicoquímica de la leche de búfala producida en el departamento de Córdoba».
- [22] C. A. Bustamante Hinojosa, «Evaluación de la suplementación alimenticia en Bufalas (*Bubalus bubalis*), durante el primer tercio de la lactancia, en un sistema de producción en trópico húmedo, en zona ecología interandina en Colombia.», 2011.
- [23] O. A. Aguilar Guerra, «Comparación química y sensorial de quesos frescos elaborados a base de leche entera de vaca y leche entera de búfala», *Vetzoo.Umich.Mx*, pp. 0-55, 2014, [En línea]. Disponible en:

- [http://www.vetzoo.umich.mx/phocadownload/Tesis/2008/Febrero/prevencion y tratamiento del distemper canino.pdf](http://www.vetzoo.umich.mx/phocadownload/Tesis/2008/Febrero/prevencion_y_tratamiento_del_distemper_canino.pdf).
- [24] G. D. Byczko y N. A. Bycko, «Leche de Bufála en polvo», *Invenio*, vol. 14, 2011.
- [25] R. Colombiana y D. E. C. Animal, «Estudio comparativo de parámetros composicionales y nutricionales en leche de vaca , cabra y búfala , Antioquia , Comparative study of compositional and nutritional parameters in», vol. 8, n.º 2, pp. 177-186, 2016.
- [26] J. Callejas, F. Prieto, V. Reyes, Y. Marmolejo, y M. Méndez, «Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo», *Acta Univ.*, vol. 22, n.º 1, pp. 11-18, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/304>.
- [27] G. R. W. J, G. A. C. A, C. R. J, G. Ramírez, C. A. Santos, y E. M. López, «Caracterización fisicoquímica del lactosuero en el valle de Tulancingo», *Cent. Investig. Químicas, ICBI, Univ. Autónoma del Estado Hidalgo, Carret.*, pp. 321-328, 2010.
- [28] Y. Campos Bautista, «Formulación y elaboración de una bebida nutritiva a base de lactosuero con jugo de naranja», 2019.
- [29]; Erika Rojasc Angélica Salazara; Jimy Oblitasb, «Reutilización del lactosuero ácido y dulce de las queserías de cajamarca en la elaboración de una bebida con sabor a poroporo (*Passiflora Mollisima*) y sauco (*Sambucus Peruviana*)», vol. 2, pp. 147-154, 2013.
- [30] R. González, «Módulo IV: Principios de Ingeniería de los Bioprocesos», *Introd. a los bioprocesos*, n.º Actualizada, p. 45, 2018, [En línea]. Disponible en: [file:///C:/Users/delia/Downloads/Introducción a Bioprocesos \(act. 09-06-2018\).pdf](file:///C:/Users/delia/Downloads/Introducción a Bioprocesos (act. 09-06-2018).pdf).
- [31] B. E. Cuartas Uribe, D. M. I. A. Miranda, y D. E. S. Costa, «Estudio del proceso de nanofiltración para la desminerlización de lactosuero dulce», *Dep. Ing. química y Nucl.*, vol. Doctor, p. 322, 2005, [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1878/tesisUPV2361.pdf>.
- [32] R. Kreczmann, Braulio; Alonso, Alba; Liloia, Matías; Zamboni, Enzo; Cerutti y D. y P. D. Baroni, «Procesamiento del lactosuero elaborado de lactosa y aprovechamiento de proteínas», pp. 44-49, 2015.

- [33] A. R. Guastalli, «Estudio sobre la aplicación de la tecnología de membranas para la recuperación del ácido fosfórico de las aguas de lavado en el proceso de anodizado de aluminio», pp. 1-293, 2006.
- [34] M. L. Castells *et al.*, *Valorización del lactosuero*. 2017.
- [35] Universidad de Murcia, *IV Jornadas de inicio a la investigación de estudiantes de la Facultad de Biología. Libro de Actas*. 2016.
- [36] M. A. Yam, «Membranas basada en polisulfona para ultrafiltración y ósmosis inversa», *Cent. Investig. científica Yucatán, A.C.*, 2016.
- [37] L. P. Martínez, «Caracterización Estructural y Superficial de Membranas Microscópicas», pp. 3-15, 1998.
- [38] R. Ibañez Lorente, «Estudio de la ultrafiltración de proteínas modelo con membranas cerámicas.», *Univ. Granada*, pp. 1-259, 2007, [En línea]. Disponible en: <http://digibug.ugr.es/bitstream/10481/1534/1/16712183.pdf>.
- [39] A. Sotto, «Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos», p. 258, 2008, [En línea]. Disponible en: [http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/4605/1/Tesis ARCADIO SOTTO DÍAZ.pdf](http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/4605/1/Tesis%20ARCADIO%20SOTTO%20DÍAZ.pdf).
- [40] M. C. Feijó, «Microfiltración tangencial», *Enfoque UTE*, vol. 3, n.º 1, pp. 01-07, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/index.php/revista/article/view/5>.
- [41] J. Osorio y J. Orejuela, «El proceso de análisis jerárquico y la toma de decisiones multicriterio», *Red Rev. Científicas América Lat. el Caribe, España y Port.*, vol. XIV, n.º 39, pp. 247-252, 2008, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84920503044.pdf>.
- [42] M. Arias y A. Espinel, «Evaluación de la utilización de la microfiltración tangencial (MFT) para la fabricación de queso y aprovechamiento del lactosuero», 2006.
- [43] C. Andres y O. Sanchez, «Evaluación técnica y financiera sobre la producción de suero en polvo partiendo lactosuero generado en el proceso fabricación de quesos de leche de búfala», p. 101, 2019.
- [44] J. Moreno, «El Proceso Análítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodologías y aplicaciones.», *Recta monográfico*, vol. 1, pp. 21-53, 2002.

- [45] D. Lucas, M. Rabiller-Baudry, L. Millesime, B. Chaufer, y G. Daufin, «Extraction of α -lactalbumin from whey protein concentrate with modified inorganic membranes», *J. Memb. Sci.*, vol. 148, n.º 1, pp. 1-12, 1998, doi: 10.1016/S0376-7388(98)00157-4.
- [46] D. R. Palatnik, «Desarrollo de quesos funcionales y aprovechamiento de proteínas de lactosuero», Universidad Nacional de la Plata, 2019.
- [47] M. A. Revelo Cadena, «Ultrafiltración del suero de queso y evaluación química y microbiológica del concentrado proteico», p. 42, 1998.
- [48] A. Muñi, G. Páez, J. Faría, J. Ferrer, y E. Ramones, «Evaluation of efficiency of a tangential ultrafiltration/nanofiltration on series system to fractionation and concentration of whey», *Rev. Cient. la Fac. Ciencias Vet. la Univ. del Zulia*, vol. 15, n.º 4, pp. 361-367, 2005.
- [49] P. A. Guerrón López, «Obtención de concentrado proteico mediante tecnología de membranas a partir de suero lacteo de cabra», *Nhk技研*, vol. 151, n.º 1, pp. 10-17, 2015.
- [50] J. J. C. Bayona, «Diseño de una planta piloto para la revalorización de lactosuero mediante tecnología de membranas», p. 58, 2015.
- [51] M. L. García, E. Cáceres, y M. D. Selgas, «Effect of inulin on the textural and sensory properties of mortadella, a Spanish cooked meat product», *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 41, n.º 10, pp. 1207-1215, 2006, doi: 10.1111/j.1365-2621.2006.01186.x.
- [52] N. Belletti, M. Gatti, B. Bottari, E. Neviani, G. Tabanelli, y F. Gardini, «Prepurification of α -lactalbumin with ultrafiltration ceramic membranes from acid casein whey: study of operating conditions», *J. Food Prot.*, vol. 72, n.º 10, pp. 2162-2169, 2009, doi: 10.1051/lait.
- [53] A. Muller y G. Chaufer, Bernard Merin, Uzi Daufin, «Purification of α -lactalbumin from a prepurified acid whey: Ultrafiltration or precipitation», *J. Food Prot.*, vol. 72, n.º 10, pp. 2162-2169, 2009, doi: 10.1051/lait.
- [54] S. Bhattacharjee, C. Bhattacharjee, y S. Datta, «Studies on the fractionation of β -lactoglobulin from casein whey using ultrafiltration and ion-exchange membrane chromatography», *J. Memb. Sci.*, vol. 275, n.º 1-2, pp. 141-150, 2006, doi:

- 10.1016/j.memsci.2005.09.013.
- [55] R. R. Lu, S. Y. Xu, Z. Wang, y R. J. Yang, «Isolation of lactoferrin from bovine colostrum by ultrafiltration coupled with strong cation exchange chromatography on a production scale», *J. Memb. Sci.*, vol. 297, n.º 1-2, pp. 152-161, 2007, doi: 10.1016/j.memsci.2007.03.039.
- [56] L. Ricq, S. Narçon, J. C. Reggiani, y J. Pagetti, «Streaming potential and protein transmission ultrafiltration of single proteins and proteins in mixture: β -lactoglobulin and lysozyme», *J. Memb. Sci.*, vol. 156, n.º 1, pp. 81-96, 1999, doi: 10.1016/S0376-7388(98)00341-X.
- [57] C. Baldasso, T. C. Barros, y I. C. Tessaro, «Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration», *Desalination*, vol. 278, n.º 1-3, pp. 381-386, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.05.055.
- [58] I. Nolasco, «Estudio del efecto de la velocidad y la presión transmembrana en el Flux másico en la ultrafiltración de suero de leche», 2019.
- [59] R. R. Souza, M. L. Gimenes, S. C. Costa, y C. M. O. Müller, «Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteínas y lactosa», *Inf. Tecnol.*, vol. 19, n.º 2, pp. 41-50, 2008, doi: 10.4067/s0718-07642008000200006.
- [60] M. Camacho, «Obtención de un concentrado proteico del suero de leche de vaca utilizando tecnología de membranas», 2009.
- [61] A. Chacón-Villalobos, «Tecnologías de Membranas en la Agroindustria Alimentaria», *Univ. Costa Rica Agron. Mesoam.*, vol. 17, n.º 2, pp. 243-264, 2006, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/437/43717211.pdf>.
- [62] B. Cuartas-Uribe, M. I. Alcaina-Miranda, E. Soriano-Costa, J. A. Mendoza-Roca, M. I. Iborra-Clar, y J. Lora-García, «A study of the separation of lactose from whey ultrafiltration permeate using nanofiltration», *Dep. of Chemical Nucl. Eng. Polytech. Univ. of Valencia*, vol. 241, n.º 1-3, pp. 244-255, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2007.11.086.
- [63] E. D. Guamán y L. M. Velásquez Fustillos, «Simulación de una planta de concentrados de proteína a partir del lactosuero en la industria Aprodemag», *Univ. Técnica Cotopaxi Fac.*, vol. 1, p. 101, 2018, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>.

- [64] K. Posada, D. M. Terán, y J. S. Ramírez-Navas, «Empleo de lactosuero y sus componentes en la elaboración de postres y productos de confitería», *La Aliment. Latinoam.*, vol. 292, n.º 1, pp. 66-76, 2011.
- [65] N. Ingeniaritzako, E. T. A. Biozientzietako, y M. E. Teknikoa, «Estudio de la utilización de concentrados proteicos en la fabricación de yogures», 2020.
- [66] J. Ahmed, H. S. Ramaswamy, y P. K. Pandey, «Dynamic rheological and thermal characteristics of caramels», *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 39, n.º 3, pp. 216-224, 2006, doi: 10.1016/j.lwt.2005.01.012.
- [67] M. S. Alfaifi y C. E. Stathopoulos, «Effect of egg yolk substitution by sweet whey protein isolate (WPI), on physical properties of Gelato vanilla ice cream», *Milchwissenschaft*, vol. 65, n.º 4, pp. 404-407, 2010.
- [68] A. M. Amezcuita, A. F. Camargo, y D. M. Guerrero, «Diseño de un subproducto a base de lactosuero en la Fábrica de Lácteos», pp. 1-36, 2012, [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/36471/AmezquitaCoronadoAnaMaria2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [69] P. H. L. Nikaedo, F. F. Amaral, y A. L. B. Penna, «Caracterização tecnológica de sobremesas lácteas achocolatadas cremosas elaboradas com concentrado protéico de soro e misturas de gomas carragena e guar», *Rev. Bras. Ciências Farm.*, vol. 40, n.º 3, pp. 397-404, 2004, doi: 10.1590/s1516-93322004000300016.
- [70] D. D. Bong y C. I. Moraru, «Use of micellar casein concentrate for Greek-style yogurt manufacturing: Effects on processing and product properties», *J. Dairy Sci.*, vol. 97, n.º 3, pp. 1259-1269, 2014, doi: 10.3168/jds.2013-7488.
- [71] V. V. Mistry y H. N. Hassan, «Manufacture of Nonfat Yogurt from a High Milk Protein Powder», *J. Dairy Sci.*, vol. 75, n.º 4, pp. 947-957, 1992, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(92)77835-7.
- [72] H. W. Modler, M. E. Larmond, C. S. Lin, D. Froehlich, y D. B. Emmons, «Physical and Sensory Properties of Yogurt Stabilized with Milk Proteins», *J. Dairy Sci.*, vol. 66, n.º 3, pp. 422-429, 1983, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(83)81809-8.
- [73] P. J. Garlick, «4th Amino Acid Assessment Workshop The Role of Leucine in the Regulation of Protein Metabolism 1 , 2», *Society*, n.º February, pp. 1553-1556,

2005.

- [74] M. Mendoza, «Industria usa el 10% del suero de la leche que se produce en el país - El Comercio». <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/industria-suero-leche-produccion-ecuador.html> (accedido jul. 28, 2021).
- [75] M. Videa Bustillo y M. V. Videa Zelaya, «Yogurt natural a partir de leche con suero lácteo a escala de laboratorio, Universidad Nacional de Ingeniería, Sede Regional del Norte, Estelí Nicaragua», *Rev. Cienc. y Tecnol. El Higo*, vol. 9, n.º 1, pp. 59-68, 2019, doi: 10.5377/elhigo.v9i1.8997.
- [76] «Yogurt Griego Alpina Mora y Arándanos paq x 4 und (va - exito.com)». <https://www.exito.com/yogurt-griego-mora-arandanos-pack-x-4und-150g-cu-575572/p> (accedido jul. 28, 2021).
- [77] S. Sherwood y D. Jenkins, «Bebida de proteína carbonatada y procedimiento de preparación», 2010.
- [78] R. Aermúdez Huertas, Andrea Betancourt Ortiz, *Uso del suero de leche en alimentos y sus sustitutos*. 2013.
- [79] L. A. Rubiano, «Alimentos funcionales, una nueva alternativa de alimentación Funcional», *Univ. Politécnica Val.*, vol. 10, 2006.
- [80] R. Oliva Rodríguez, M. Tous Romero, B. Gil Barcenilla, G. Longo Abril, J. L. Pereira Cunill, y P. P. García Luna, «Impacto de una intervención educativa breve a escolares sobre nutrición y hábitos saludables impartida por un profesional sanitario», *Nutr. Hosp.*, vol. 28, n.º 5, pp. 1567-1573, 2013, doi: 10.3305/nh.2013.28.5.6746.
- [81] J. P. Rodríguez Beltran, «Efficient nutrition».
- [82] Tendencias el Tiempo, «Colombia es de los países que más consume suplementos alimenticios - Sectores - Economía - ELTIEMPO.COM», *El Tiempo*, may 16, 2021. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/colombia-es-de-los-paises-que-mas-consume-suplementos-alimenticios-581274> (accedido jun. 25, 2021).
- [83] E. Díaz, «Alianza Latinoamericana de Nutrición Responsable (Alanur)», 2021. <https://alanurla.org/suplementos-alimenticios-latam/#colombia> (accedido jun. 25, 2021).

ANEXOS

ANEXO 1.

RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DE LACTOSUERO LABORATORIO BIOTRENDS S.A.S.

IDENTIFICACION DEL ITEM DE ENSAYO							
ITEM DE ENSAYO NO.	IDENTIFICACION			FABRICANTE Y/O PROVEEDOR			
21-8058	LACTOSUERO						
PRESENTACION DURANTE LA RECEPCION	CANT.ENTREG.(UN)	FECHA DE PROD	FECHA VENC	LOTE	T. MUESTREO	T. RECEPCION	
FRASCO PLASTICO X 500 ml	1	2021-02-17	2021-02-22	17/02/2021	2.1°C	4.0°C	
OBSERVACIONES							
TABLA DE RESULTADOS							
PARAMETRO	METODO UTILIZADO	RESULTADOS	U	REGLA	UNIDADES	ESPECIFICACION	CUMPLIMIENTO
Densidad	AOAC 925.22 Ed 20:2016 (Picnometría)	1,0235	NO APLICA	NO APLICA	g/mL	*	NO APLICA
Acidez expresada como ácido láctico	AOAC 947.05. Ed.20:2016.	0,33	NO APLICA	NO APLICA	g/100g	*	NO APLICA
pH a 20°C	Electrometría	4,61	NO APLICA	NO APLICA	Unidades de pH	*	NO APLICA
Proteína Total (N x 6,38)	(ALIMENTOS PARA CONSUMO HUMANO Y ANIMAL) ISO 1871:2009 (Kjeldahl) Acreditado.	0,8	+/- 0,07	NO APLICA	g/100g	*	NO APLICA
Humedad	(Derivados lácteos líquidos) P-LF-008 Revisión 3 (Gravimetría, Secado en estufa a 105°C)	93,7	NO APLICA	NO APLICA	g/100g	*	NO APLICA
Grasa	(Derivados lácteos líquidos) AOAC 989.05. Ed.21: 2019. (Gravimetría - Roesse-Gottlieb)	0,4	NO APLICA	NO APLICA	g/100g	*	NO APLICA
BIOTRENDS LABORATORIOS S.A.S.							
REVISO: DIRECTOR TECNICO				APROBO: GERENTE			
Informe de analisis No. F-218058-0 Pagina 1 de 2							
Bogota - Av Boyaca No 64F-68. Tels: (571) 4758383 - 7022799 - 2527231 - 2516237. Web. www.biotrendslab.com							

F-EC-001 REVISION 05		INFORME DE ANALISIS				 		
FECHA DE ACTUALIZACION 17-ABRIL-2020								
Sólidos Totales		Cálculo por diferencia	6,3	NO APLICA	NO APLICA	g/100g	*	NO APLICA
Cenizas		(Derivados lácteos líquidos) P-LF-001 Revisión 5 (Gravimetría, Calcinación a 600°C)	0,5	NO APLICA	NO APLICA	g/100g	*	NO APLICA
COPIA NO CONTROLADA UNA VEZ IMPRESA INTERPRETACION DE RESULTADO "PARA LOS PARAMETROS SOLICITADOS NO EXISTE NORMA DE COMPARACION"								
Observaciones -Los resultados son validos unicamente para el item analizado. -Este certificado de analisis solo puede ser reproducido integramente y con autorizacion escrita de BIOTRENDS LABORATORIOS S.A.S - U = incertidumbre expandida al valor reportado con un factor de cobertura de k=2, para un intervalo de confianza de aproximadamente el 95% -Regla de decisión 1= El resultado obtenido frente a los límites de especificación para dar cumplimiento, NO está influenciado por la incertidumbre del ensayo. -Regla de decisión 2= El resultado obtenido frente a los límites de especificación para dar cumplimiento, está influenciado por la incertidumbre del ensayos. -* Parametro no requerido en especificacion -** Parametro no solicitado por el cliente Autorizan:								
BIOTRENDS LABORATORIOS S.A.S								
 OLGA LUCIA ÁVILA GUZMÁN JEFE DE LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA			 FERNANDO MURCIA Director Técnico FIN DEL INFORME					
BIOTRENDS LABORATORIOS S.A.S.								
REVISO: DIRECTOR TECNICO					APROBO: GERENTE			

ANEXO 2.

RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar una caracterización específica de las proteínas contenidas en el lactosuero y contenido de minerales, para determinar una proyección global del proceso de microfiltración y ultrafiltración, comparando los valores obtenidos con caracterizaciones de leche de vaca. Teniendo en cuenta que en la revisión bibliográfica no se encuentra gran evidencia de las proteínas presentes en el lactosuero proveniente de leche de búfala. Dentro de la caracterización se debe contemplar la temporada en que se realizará el muestreo, ya que según la estacionalidad o factores ambientales pueden influenciar en las propiedades fisicoquímicas del lactosuero y de este modo, en el producto deseado. Lo recomendable es realizar un plan de muestreo en función del tiempo.

Para futuras investigaciones se recomienda realizar una proyección global del proceso de separación por membranas para el lactosuero considerando el contenido de proteínas específicas presentes en el lactosuero, y de esta manera, determinar la cantidad de producto a obtener en función del volumen de producción manejado por La Empresa para las corrientes de concentrado y permeado del proceso.

Se recomienda realizar el diseño del proceso de separación por membranas para la recuperación de proteínas, junto al estudio de mercado y financiero donde se determine la viabilidad del proyecto; estableciendo costos de operación, costos administrativos y la utilidad para la producción de subproductos y derivados del lactosuero propuestos durante el desarrollo del documento, con el fin de validar la mejor alternativa que represente un valor agregado real para La Empresa, en lo posible seleccionar una aplicación que permita emplear el lactosuero bien sea como insumo, o como nueva línea de producción para la organización.

Con el fin de aumentar la vida útil de las membranas de microfiltración y ultrafiltración, se propone implementar una etapa de filtración del lactosuero previo a las tecnologías

de membrana, donde en esta se remueva la mayor cantidad de solidos de gran tamaño, debido a que estos podrían generar un taponamiento de los poros de las membranas de microfiltración y ultrafiltración.

Se recomienda tener en cuenta la etapa de almacenamiento del concentrado proteico, ya que por las características microbiológicas resulta ser de durabilidad media; al no almacenarse en las condiciones adecuadas podría afectar la calidad del producto.

Otra alternativa para la corriente de permeado obtenida de la ultrafiltración, es la implementación de una nueva membrana de diámetro de corte menor con el fin de retener las proteínas presentes que no fueron filtradas en la membrana inicial. Retirando la membrana original e implementado la nueva membrana utilizando el mismo módulo de ultrafiltración, con el fin de aprovechar todas las proteínas presentes.