

**EVALUACIÓN DEL ESQUEMA “FILTRACIÓN CON MEMBRANA /  
EVAPORACIÓN DE PELÍCULA / SECADO POR ASPERSIÓN” COMO  
ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA LA VALORIZACIÓN DE  
LACTOSUERO ÁCIDO**

**SERGIO ALEJANDRO CÁCERES ROA  
SAID ANDREY MORA GARCÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**EVALUACIÓN DEL ESQUEMA “FILTRACIÓN CON MEMBRANA /  
EVAPORACIÓN DE PELÍCULA / SECADO POR ASPERSIÓN” COMO  
ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA LA VALORIZACIÓN DE  
LACTOSUERO ÁCIDO**

**SERGIO ALEJANDRO CÁCERES ROA**

**SAID ANDREY MORA GARCÍA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Químico**

**Director**

**Prof. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA**

**Ingeniero Químico, M.Sc., Ph. D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios en primera instancia, por sus bendiciones, las cuales hicieron todo esto posible.

A nuestros padres y amigos por su apoyo incondicional y constante en este tramo de nuestras vidas.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química por su orientación en nuestra formación profesional y a todos los profesores que fueron parte del proceso.

Al profesor Carlos Jesús Muvdi Nova, por su dedicación, confianza y enseñanzas para nuestra formación integral.

Al laboratorio CICTA que cuenta con un gran talento humano y que por su disposición y colaboración permitió llevar a cabo este trabajo.

Al SENA C.A.S.A. por permitir este tipo de alianzas con la Universidad Industrial de Santander y el Grupo CICTA para fortalecer el área de investigación y proponer alternativas de solución a problemáticas regionales y nacionales en el sector productivo de alimentos.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	13
1. METODOLOGÍA .....	18
1.1 FASE 1: Evaluación de la temperatura y diámetro de poro en la clarificación del lactosuero con tecnología de membrana .....	18
1.2 FASE 2: Análisis de la filtración con membrana a escala piloto-laboratorio para distintos modos de operación .....	20
1.3 FASE 3: Estudio de la evaporación de película descendente al vacío y secado por aspersion sobre el producto final obtenido. ....	20
2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	24
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LACTOSUERO ÁCIDO NO TRATADO .....	24
2.2 ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA FILTRACIÓN CON MEMBRANA .....	25
2.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DE PORO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA FILTRACIÓN.....	27

2.4 EVALUACIÓN DEL ESCALADO Y EL MODO DE OPERACIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA OPERACIÓN DE FILTRACIÓN CON MEMBRANA.	30
2.5 ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE LA EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE AL VACÍO Y SECADO POR ASPERSIÓN SOBRE EL PRODUCTO FINAL OBTENIDO.....	35
3. CONCLUSIONES .....	40
4. RECOMENDACIONES.....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	63

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Caracterización de lactosuero inicial en base seca. * <i>Desviación media</i> ..	24
<b>Tabla 2.</b> Contenido de proteína, materia seca, °Brix, ceniza y turbidez en permeados y retenidos de los distintos modos de operación evaluados a 70°C, $\Delta$ P <sub>TM</sub> de 200 kPa, Re=25942 y Q <sub>ALIMENTACIÓN</sub> =0,78 L/s. F1 y F2 corresponde a Filtración 1 y 2.....	33
<b>Tabla 3.</b> Caracterización de pulverizados obtenidos en base seca. ....	38

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Filtración por membranas a) monocanal b) multicanal c) módulo o cárter.....	15
<b>Figura 2.</b> Cuadro metodológico del proyecto. ....	19
<b>Figura 3.</b> Permeabilidad de lactosuero ácido utilizando membranas de 0,2 $\mu\text{m}$ , $\Delta\text{PTM}$ de 200 kPa a 50°C y 70°C, $\text{Re}=82958$ y $Q_{\text{ALIMENTACIÓN}}=0,3$ L/s durante 2h de filtración. * <i>Desviaciones estándar</i> .....	25
<b>Figura 4.</b> Contenido de a) Proteínas y b) Turbidez, para retenidos y permeados con membrana de 0,2 $\mu\text{m}$ a $\Delta\text{PTM}$ 200 kPa, 50°C y 70°C, $\text{Re}=82958$ y $Q_{\text{ALIMENTACIÓN}}=0,30$ L/s durante 2 h de filtración. * <i>Desviaciones estándar</i> .....	26
<b>Figura 5.</b> Permeabilidad de lactosuero ácido a distintos diámetros de poro a 70°C, $\Delta\text{PTM}$ de 200 kPa, $\text{Re}=78216$ y $Q_{\text{ALIMENTACIÓN}}=0,27$ L/s durante 2h de filtración. * <i>Desviaciones estándar</i> .....	28
<b>Figura 6.</b> Contenido de a) Proteínas y b) Turbidez, de retenidos y permeados obtenidos a 70°C, $\Delta\text{PTM}$ de 200 kPa, $\text{Re}=78216$ y $Q_{\text{ALIMENTACIÓN}}=0,27$ L/s durante 2h de filtración. * <i>Desviaciones estándar</i> .....	29
<b>Figura 7.</b> Permeabilidad de lactosuero ácido en el tiempo de filtración, a diferentes modos de operación: a) Recirculación total, b) <i>Batch</i> y c) Semicontinuo con membranas de 1 m de longitud y diámetro de poro de 0,2 $\mu\text{m}$ a $\Delta\text{PTM}$ de 200 kPa,	

70 °C,  $Re=25942$  (1 membrana) y  $Q_{ALIMENTACIÓN}=0,78$  L/s. \*Desviaciones estándar.  
.....31

**Figura 8.** Muestras de a) Retenido y b) Permeado obtenidas durante la filtración en modo Batch a 70°C,  $Q_{ALIMENTACIÓN}= 0,78$  L/s,  $Re=25942$  y  $\Delta PTM$  200 kPa. ....34

**Figura 9.** Análisis en función del FCV, a) Ciclos, b) °Brix, Proteínas, Cenizas, c) Turbidez y d) Absorbancia a  $\lambda= 440nm$ , a presión de 200 mbar. \*Desviaciones estándar. ....36

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL ESQUEMA “FILTRACIÓN CON MEMBRANA / EVAPORACIÓN DE PELÍCULA / SECADO POR ASPERSIÓN” COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA LA VALORIZACIÓN DE LACTOSUERO ÁCIDO.\*

**AUTORES:** Sergio Alejandro Cáceres Roa – Said Andrey Mora García\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Retención de proteínas, clarificación, membranas cerámicas, evaporación de película descendente al vacío, secado por aspersión.

### DESCRIPCIÓN:

Se evaluó una ruta de valorización de lactosuero ácido mediante etapas de clarificación con membranas, concentración por evaporación de película descendente al vacío y secado por aspersión. En la primera etapa se evaluó el efecto de la temperatura y diámetro de poro para la filtración de lactosuero ácido, observando permeabilidades casi 3 veces mayores a 70°C que a 50°C ( $163,2 \pm 11,1$  y  $62,4 \pm 9,2$  L/m<sup>2</sup>.h, respectivamente) para membranas con diámetro de poro de 0,2µm. Además, el flux de permeado para este diámetro de poro fue 3, 6 y 10 veces mayor en comparación con los diámetros de 300, 150 y 50kDa a 70°C, respectivamente. En todos los diámetros de poro se obtuvo una reducción en la turbidez >99%. Se escaló la etapa de clarificación con membranas de 0,2 µm logrando filtrar alrededor de 22L de lactosuero para el modo *Batch* hasta un factor de concentración volumétrica (FCV) de 5 con una retención de proteína del 68%. En el modo de operación semicontinuo se logró una retención de proteína del 61%, pero permitió operar por más tiempo, reduciendo el ensuciamiento, filtrando casi el doble de lactosuero en comparación al *Batch*. La turbidez de todos los clarificados fue inferior a 12 NTU, a pesar de lactosueros alimentados que podían estar sobre los 12 000 NTU. Posteriormente se analizaron etapas de concentración por evaporación de película y secado por aspersión. Para la etapa de concentración, el número de ciclos varió considerablemente en cada FCV, pero las características de los concentrados no se vieron afectadas y aumentaron proporcionalmente. Para el secado por aspersión se obtuvieron pulverizados de lactosuero con un contenido de hasta  $75,68 \pm 0,83\%$  p/p de lactosa y  $12,98 \pm 0,20\%$  p/p de sales minerales en base seca (humedad <6%), otorgándole un alto potencial para aplicaciones como bebidas (ej. hidratantes-energizantes), productos de panificación y producción de ácido láctico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova. Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF SCHEME “FILTRATION BY MEMBRANE / EVAPORATION OF FILM / SPRAY DRYING” LIKE AN ALTERNATIVE OF TREATMENT FOR ACID WHEY VALORIZATION.\*

**AUTHORS:** Sergio Alejandro Cáceres Roa – Said Andrey Mora García\*\*

**KEYWORDS:** Protein retention, clarification, ceramic membranes, concentration by vacuum falling film evaporation, spray drying.

### DESCRIPTION:

In this study a valorization route for acid whey through membrane technology clarification, concentration by vacuum falling film evaporation and spray drying was evaluated. In membrane filtration, the effect of temperature and pore diameter was evaluated, observing higher permeabilities at 70°C than 50°C in almost three times ( $163,2 \pm 11,1$  y  $62,4 \pm 9,2$  L/m<sup>2</sup>.h, respectively) using membranes of 0,2µm of pore diameter. The permeate flux with this pore diameter was 3, 6 and 10 times higher than membranes with pore diameter of 300, 150 and 50kDa, respectively. The turbidity reduction was >99% in all cases. The clarification was scaled up with membranes of 0,2 µm allowing the filtration of 22L of whey in Batch mode until a volumetric concentration factor (VFC) of 5 with a 68% of protein retention. In Semi-continuous mode, the protein retention was 61%, but it allowed to operate for a longer time, with less fouling, and filtrating almost twice the volume whey than Batch mode. In all cases, the turbidity in permeates was lower than 12 NTU, despite the turbidity in raw whey was higher than 12 000 NTU. After this, vacuum falling film evaporation and spray drying were analyzed. For the concentration stage, the cycles number varied considerably in each VCF, but the characteristics of concentrates increased proportionally and they were not affected by cycle number. In respect of spray drying, whey powder was obtained with a content in lactose up to  $75,68 \pm 0,83\%$  w/w and in minerals up to  $12,98 \pm 0,20\%$  w/w (dry basis), Moisture < 6%, showing a high potential for applications like drinks (e.g. sport drinks), bakery products and the production of lactic acid.

---

\* Undergraduate Project

\*\* Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Food Science and Technology Research Center. Advisor: Carlos Jesús Muvdi Nova, Chemical Engineer, M.Sc., Ph.D.

## INTRODUCCIÓN

El sector lácteo es uno de los principales sectores económicos del país, promoviendo el uso y consumo tanto de leche, como productos derivados de ésta. Un subproducto de esta industria, como el lactosuero (sustancia líquida de color verde-amarillo), es obtenido de la coagulación de la leche en la elaboración del queso y constituye entre el 85-90% del volumen de la leche [1]. Existen dos tipos de lactosuero, el primero denominado lactosuero dulce; basado en la coagulación de leche fresca a pH 6,5. El segundo, llamado lactosuero ácido resulta de la coagulación de leche ácida [2] y que en Colombia se utiliza para la producción de quesos hilados. El presente estudio se enfoca en el lactosuero ácido, que por su acidez limita la proliferación de microorganismos, favoreciendo su conservación [3], y la poca información que hay en el estado del arte para este tipo de lactosuero.

Las características del lactosuero ácido son: humedad (94-95% p/p), lactosa (4,5-5% p/p), proteínas (0,8-1,0% p/p), lípidos (0,04% p/p), sales minerales (0,4% p/p) y ácido láctico (0,4% p/p) [4] [5]. En cuanto a los minerales, representan un valor equivalente de 8-12% p/p en extracto seco, distribuidos principalmente en: potasio (2,67% p/p), calcio (2% p/p), fósforo (1,1% p/p), sodio (0,83% p/p) y cloruro (1,83% p/p) [6] [7]. También se pueden encontrar vitaminas del grupo B y ácido ascórbico en un 3,30% p/p en base seca [8] [9].

En Colombia para el 2015 la producción de queso fue de 50 000 000kg aprox. sin contar la producción artesanal [10]; considerando que para producir un 1kg de queso se generan 9kg de lactosuero [11], la cantidad de éste último sería de 440 257 110L. Sin embargo, el lactosuero producido en el país no es valorizado verdaderamente, y solo una parte de éste se utiliza para engorde de animales; el resto es vertido en suelos y corrientes de agua [12], ocasionando problemas ambientales debido a la presencia de un alto contenido de materia orgánica [13]

[14]. Con base en esto, surge el interés de estudiar estrategias de procesamiento que permitan agregar valor a este subproducto, teniendo en cuenta su contenido tanto de proteínas, como lactosa y sales minerales; disminuyendo con ello su impacto ambiental negativo.

La filtración a través de membranas, junto con la evaporación de película descendente al vacío y el secado por aspersion, es una alternativa de solución a la problemática mencionada anteriormente [15] [16]. Respecto a la filtración con membranas, hoy en día es una tecnología atractiva para el aprovechamiento del lactosuero, puesto que permite separar y concentrar las proteínas hasta un 35-80% p/p en base seca [17] [18]. Este concentrado puede ser utilizado como aditivo en la industria de alimentos por sus propiedades espumantes, gelificantes y emulsificantes [19] [20]. De otro lado, el permeado rico en lactosa y sales minerales puede ser concentrado mediante evaporación de película descendente al vacío y secado por aspersion para ser empleado en la industria alimenticia, farmacéutica [21] [22] y en procesos biotecnológicos como la producción de ácido cítrico [23], ácido láctico [24] y biocombustibles como etanol [25] y butanol [26].

El proceso de separación por membranas se fundamenta en parámetros como la permeabilidad selectiva de una o más sustancias y un gradiente de presión transmembrana ( $\Delta P_{TM}$ ), definida como la diferencia de presión entre el lado retenido y el lado permeado, la cual fuerza el paso de componentes que tienen un menor tamaño con respecto al diámetro de poro de la membrana [27]. Uno de los tipos de membranas más utilizados para procesos de filtración son las membranas cerámicas, constituidas principalmente por Alúmina ( $Al_2O_3$ ), Zirconia ( $ZrO_2$ ) u óxido de Titanio ( $TiO_2$ ) [28]. Estas membranas se caracterizan por tener mayor estabilidad química, física y térmica, en comparación con las membranas orgánicas, lo que les confiere un mayor tiempo de vida útil, facilidad en la limpieza y gran capacidad de trabajo en entornos químicamente agresivos con altas temperaturas y presiones [29]. Además, son elaboradas en forma tubular [30] y pueden ser monocanal (Figura 1a) o multicanal (Figura 1b), permitiendo que parte

del fluido pase a través de las paredes del mismo [31]. Estas membranas son ubicadas en un módulo o cárter (Figura1c) en donde se lleva a cabo la filtración.

**Figura 1.** Filtración por membranas a) monocanal b) multicanal c) módulo o cárter. Fuente: HiTech [32].



Los procesos de separación a través de membranas se pueden clasificar dependiendo del tamaño de poro de la membrana en: microfiltración (MF) (0,1-10  $\mu\text{m}$ ), ultrafiltración (UF) (1–500kDa), nanofiltración (NF) (0,1-1 kDa) y ósmosis inversa (OI) (<1 kDa) [33]. Para este estudio se utilizaron membranas de MF y UF en vista de que tienen un tamaño de poro inferior al tamaño de algunos sólidos presentes en el lactosuero como lípidos y proteínas, permitiendo así concentrarlos [34] [35], dejando pasar en el permeado, agua, iones, lactosa y componentes de bajo peso molecular [36]; el cual fue el interés de este proyecto debido a sus mayores volúmenes respecto al concentrado [37]. Para la MF, autores como Souza et al. [38] y Camacho [39] reportaron flux promedio de  $118,4 \pm 5,9 \text{L/m}^2 \cdot \text{h}$  a  $25^\circ\text{C}$  y  $\Delta\text{PTM}$  de 100 kPa y  $69,9 \pm 8,1 \text{L/m}^2 \cdot \text{h}$  a  $30^\circ\text{C}$  y  $\Delta\text{PTM}$  de 200 kPa, respectivamente, para membranas cerámicas con diámetro de poro de  $0,2 \mu\text{m}$ , y un %retención de proteínas de 14 y 25%, respectivamente. En cuanto a la UF, Muro et al. [40] y Atra et al. [41] reportaron flux de  $32,9$  y  $30 \text{L/m}^2 \cdot \text{h}$ , respectivamente. El primero empleó una membrana cerámica (Carbosep, Rhodia, Orelis, Francia) con un diámetro de poro 15kDa, a  $30^\circ\text{C}$ ,  $\Delta\text{PTM}$  de 150 kPa y obtuvo un paso de 87% de lactosa a través de la membrana y una retención de proteínas del 80%; resultados favorecidos por la temperatura del proceso. En cuanto al segundo autor, usando una membrana de polivinilo-difluoruro (FS10, Zoltek Rt MAVIBRAN, Hungría) con diámetro de poro 6-8kDa, registró una

retención de proteínas de 92–98% y un paso de lactosa del 80% para 50°C y  $\Delta$ P<sub>TM</sub> de 300 kPa; agregando también que no se presentó desnaturalización de las proteínas. Esta retención de proteínas colmata las membranas (formación de depósitos, adsorción y bloqueo de poros [42]), haciendo que el flux de permeado disminuya en el tiempo [43].

Otras de las alternativas utilizadas para el total aprovechamiento de este subproducto son las operaciones de evaporación por película descendente al vacío y el secado por aspersion. La primera permite eliminar el agua presente en la solución, a través del calentamiento de una película de líquido sobre una superficie caliente en presencia de vacío. Esta técnica de concentración permitiría trabajar con altos coeficientes de transferencia de calor (2000-4000W/m<sup>2</sup>.°C), minimizando costos energéticos, degradación térmica, tamaño de equipos y tiempos de residencia en comparación con la evaporación tradicional [44] [45]. Anaya & Bueno [46] reportaron, para la obtención de jarabes de glucosa mediante evaporación de película descendente al vacío, condiciones de entrada de: concentración de entrada (10, 20 y 40°Brix), presión de vacío (200, 250 y 300 mbar) y temperatura de pared (80, 85 y 90°C) logrando factores de concentración entre 1,10 y 1,26, con un ciclo de pasaje y utilizando un evaporador de 1,4m de longitud. Adicionalmente, Harris & Mostyn [47] determinaron que manteniendo altas temperaturas o cierta concentración de lactosa en la solución, se evita la cristalización de ésta en el concentrado. De esta manera, para un concentrado con 40% p/p de sólidos totales con 30% p/p de lactosa a pH de 5-5,6, la temperatura de solubilidad estable para la solución debe ser mínimo 60°C.

Como etapa final se encuentra el secado por aspersion, el cual ha sido utilizado en la industria de alimentos y láctea puesto que permite conservar los nutrientes a un bajo costo y otorga buena estabilidad del producto final [48] [49]. Antury & Cubillos [50] diseñaron un secador por aspersion para jarabes de glucosa y maltodextrinas (20 y 40°Brix) con aire de entrada a 130°C y de salida inferior a 80°C, temperatura de alimentación de maltodextrinas a 24°C y glucosa a 7°C. Esta diferencia en las

temperaturas de alimentación se debe a la temperatura de transición vítrea de la glucosa (62°C) [51], lo cual hace que el material no pulverice correctamente y se adhiera a las paredes del equipo, por lo que fue necesario que la temperatura de entrada de la solución fuera menor. Para las maltodextrinas no hubo inconveniente porque su temperatura de transición vítrea está por encima de la temperatura de operación (141°C) [52] [53]. Mendoza [54] realizó un secado por aspersion para un producto a base de lactosuero dulce y pulpa de mango con aire caliente entre 120–160°C, temperatura de salida entre 65–74°C, velocidad de aspersion entre 20000–28000 rpm, y una concentración de maltodextrinas entre 15-35% p/p, condiciones similares a otros ensayos [55] [56]. De este estudio se concluyó que tanto la humedad como la higroscopicidad del producto disminuyen (de 4,7% a 2,52%, y de 16,83% a 11,58%, respectivamente) si se aumenta la cantidad de maltodextrinas (20 a 30% p/p). Debido a la dificultad para pulverizar el lactosuero (a causa de la lactosa) Nassauer et al. [57] sugieren secar el permeado de suero ácido agregando una sal neutralizante como carbonato cálcico entre 0,5 y 5% p/p del contenido total de producto para temperaturas de alimentación de 24°C, aire de entrada a 130°C y aire de salida a 54°C. Bajo estas condiciones obtuvo un pulverizado cuya composición fue de 97,8% p/p de sólidos totales, lactosa 64,8% p/p, cenizas 13% p/p, proteínas 5,16% p/p, ácido láctico 9,73% p/p, grasas 1,19% p/p, calcio 2,6% p/p.

Con base en lo anterior, el objetivo general de este proyecto fue evaluar el tratamiento de lactosuero ácido utilizando etapas de clarificación con membranas, de concentración por evaporación de película y de secado por aspersion para su valorización. Para llevar a cabo este objetivo, se determinó el efecto de la temperatura y diámetro de poro en la clarificación del lactosuero utilizando tecnología con membranas. También se estudió el efecto del escalado y del modo de operación sobre el proceso de clarificación del lactosuero, y por último, se evaluaron las etapas de concentración por película y secado por aspersion como estrategia para encontrar posibles aplicaciones de los concentrados y pulverizados obtenidos.

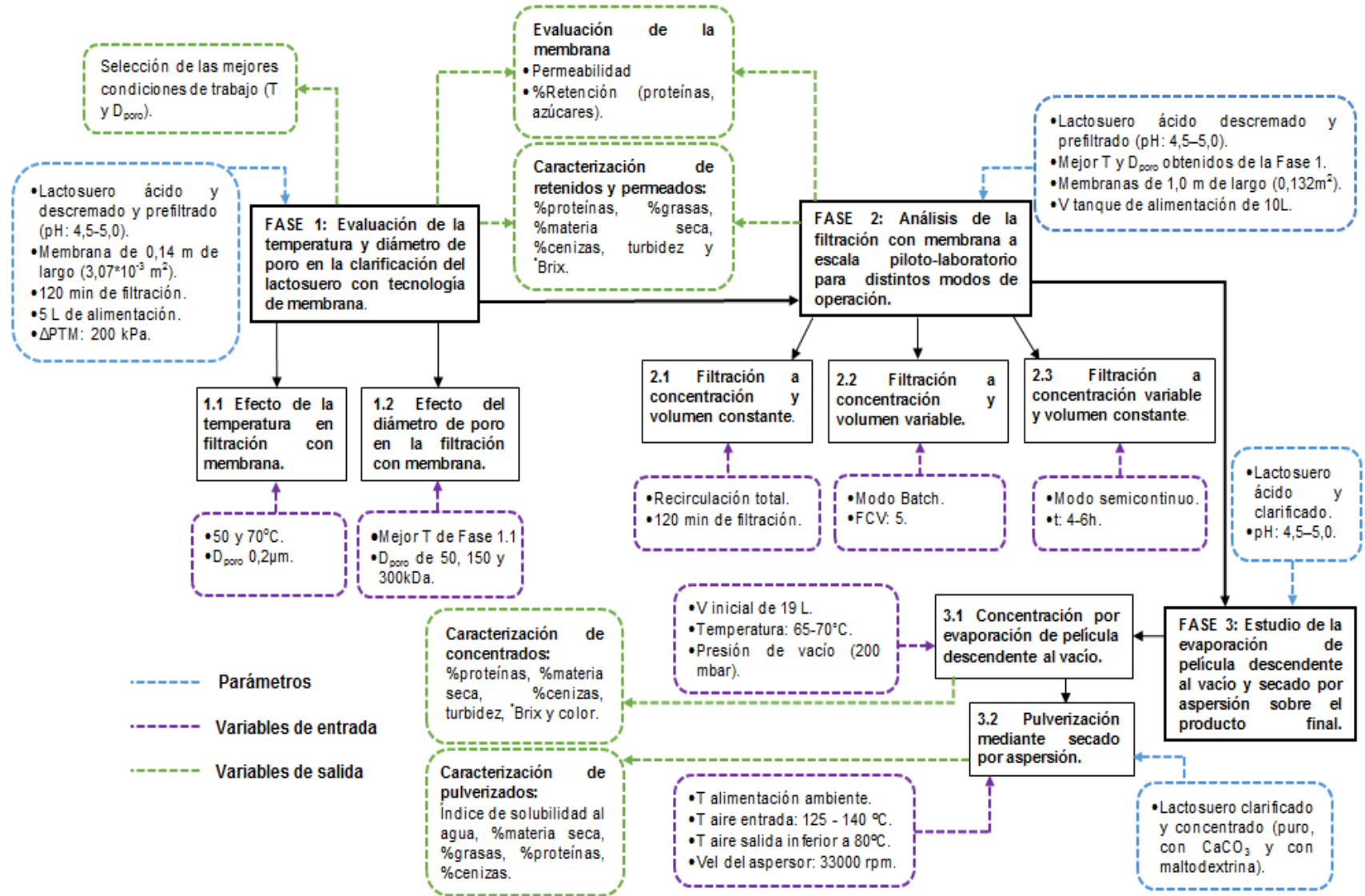
## 1. METODOLOGÍA

En la Figura 2, se presenta el cuadro metodológico de las fases desarrolladas durante este proyecto de investigación.

### 1.1 FASE 1: Evaluación de la temperatura y diámetro de poro en la clarificación del lactosuero con tecnología de membrana

El lactosuero ácido (pH 4,5-5,0) fue proporcionado por el SENA C.A.S.A obtenido durante la elaboración de quesos hilados. El lactosuero utilizado fue descremado (grasa <0,1% p/p) y prefiltrado con lienzo para disminuir la grasa e insolubles presentes, y con ello, reducir el riesgo de ensuciamiento de las membranas. Adicionalmente, fue caracterizado en %proteína, %materia seca, °Brix, %grasa, %cenizas, turbidez, %Ca, %P y %ácido láctico. Se evaluó el efecto de la temperatura (50°C y 70°C) utilizando membranas cerámicas con diámetro de poro de 0,2µm, longitud de 0,14m (superficie membranaria de  $3,07 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$ ) y  $V_{\text{alimentación}}$  de 5L; tiempo de filtración de 120min y  $\Delta \text{PTM}$  de 200 kPa reportada por estudios anteriores [58] [59]. La temperatura de 50°C se escogió debido que se reduce la viscosidad en comparación a temperaturas menores [60] y a 70°C por ser cercana a temperaturas de pasteurización de la leche [61]. Se recirculó tanto retenido como permeado para mantener volumen y concentración constantes (Recirculación total). A partir de estos resultados, se evaluó el efecto del diámetro de poro utilizando membranas de 50, 150 y 300kDa, manteniendo las demás condiciones iguales. La descripción del equipo piloto para realizar esta fase se encuentra en la página 22. Todas las muestras se caracterizaron en %proteína, %materia seca, °Brix, %grasa, %cenizas y turbidez, como también se midió la permeabilidad y %retención de proteína.

**Figura 2.** Cuadro metodológico del proyecto.



## **1.2 FASE 2: Análisis de la filtración con membrana a escala piloto-laboratorio para distintos modos de operación**

De la fase anterior se seleccionó la temperatura y el diámetro de poro con los mejores resultados de permeabilidad y rendimiento para su posterior escalado.

Las membranas cerámicas de esta fase tienen dimensiones de 1,0m de largo y un área de filtración total de  $0,13195\text{m}^2$  (6 membranas). Esta fase se dividió en tres partes, siguiendo tres modos de filtración definidos. En la primera parte se realizaron filtraciones a volumen de 10L y concentración constante (Recirculación total) durante 120min. Esta primera parte tuvo como objetivo filtrar volúmenes más grandes y evaluar la linealidad del proceso al escalarse. En la segunda parte, se filtró lactosuero a volumen variable y concentración variable (*Batch*), con la finalidad de evaluar la permeabilidad de la membrana y las características de los permeados obtenidos en función de la concentración de sólidos en el retenido. Las pruebas se realizaron con volumen inicial de 28L sin recircular el permeado a la alimentación, hasta alcanzar un factor de concentración volumétrica (FCV) de 5 [62] [63] [64]. Como última parte, se llevó a cabo la filtración en modo “semicontinuo”, con el objetivo de evaluar la influencia de la concentración de sólidos en el tiempo sobre la permeabilidad de la membrana (comparación con la configuración *Batch*). Para ello, el permeado obtenido no se recirculó al sistema y se alimentó con lactosuero nuevo, permitiendo de un lado, mantener el volumen de alimentación constante (10L), y del otro, filtrar aproximadamente 50L de lactosuero. Todas las muestras se caracterizaron como en la Fase 1.

## **1.3 FASE 3: Estudio de la evaporación de película descendente al vacío y secado por aspersión sobre el producto final obtenido.**

Los clarificados obtenidos de la Fase 2 fueron almacenados en 5 lotes de 19L aprox., y se concentraron por evaporación de película descendente al vacío. Para

ello se trabajó a 65-70°C (Temperatura de pared) y presión de vacío de 200mbar [65] [66]. A partir de estas condiciones de operación, se evaluó el efecto del número de ciclos de evaporación y el factor de concentración volumétrica (FCV) sobre las características del producto. Posteriormente, los concentrados fueron secados bajo tres esquemas: lactosuero solo, con carbonato de calcio al 5% p/p con respecto a la materia seca, y con maltodextrinas a 74°Brix. Las pruebas se realizaron para asegurar la pulverización del lactosuero clarificado concentrado y disminuir las pérdidas de material dentro del sistema por adhesión [67] [68]. Se trabajó con  $T_{\text{aire entrada}}$  entre 125-160°C,  $T_{\text{alimentación}}$  de 25°C,  $v_{\text{rotación}}$  33000rpm (obtenidos por el Grupo CICTA/UIS para jarabes de glucosa y maltodextrinas) [69]. Los concentrados y pulverizados obtenidos fueron caracterizados igual que en las fases anteriores.

**Materiales e insumos:** Membranas cerámicas tubulares monocanal TAMI<sup>®</sup> de 0,2µm, 300, 150 y 50kDa; 0,14m (0,00307m<sup>2</sup>) y 1,00m de longitud (0,13195m<sup>2</sup>), bomba centrífuga Pedrollo, baño termostático Lauda<sup>®</sup> Alpha RA 12, pH-metro Hanna<sup>®</sup>, maltodextrina de 74°Brix con ED=20% (Promitec), H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> comercial, CaCO<sub>3</sub> comercial, HNO<sub>3</sub> 65% p/p J.T.Baker, NaOCl 5,25% p/v, NaOH en escamas, tabletas Kjeldahl Merck<sup>®</sup>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98% p/p y ácido acético puro Merck<sup>®</sup>.

### **Métodos experimentales y de análisis**

Métodos de caracterización: %materia seca (A.O.A.C 990.19) [70]; %proteína (A.O.A.C 991.20) [71], %ceniza (A.O.A.C. 923.03) [72], %grasa (A.O.A.C 2000.18) [73], determinación de %Ca y %P (servicio contratado) (NTC 479 [74] y NTC 4981 [75]) y acidez (A.O.A.C 16.023) [76]; °Brix con refractómetro portátil Fisher No. 13 964 74C, 0-90%, turbidez con turbidímetro HI 98703 Hanna<sup>®</sup>, el color se relacionó a través de la medición de la absorbancia en un espectrofotómetro de rango visible a 440nm de acuerdo a Rodríguez & Sandoval [77]; índice de solubilidad al agua según protocolo de Antury & Cubillos [78]; permeabilidad midiendo el

volumen recogido entre 20s y 10min para el piloto de la Fase 1, y 20s para la Fase 2 cada 30min de prueba.

Porcentaje de retención: Se determinó el porcentaje de retención mediante la siguiente relación:

$$\%Ret = \frac{C_{0,i} - C_{p,i}}{C_{0,i}} * 100$$

Donde  $C_{0,i}$  es la concentración inicial del componente  $i$  y  $C_{p,i}$  es la concentración del componente  $i$  en el permeado.

Factor de concentración volumétrica (FCV): Se calculó mediante la relación volumétrica entre volumen inicial alimentado y volumen concentrado en cada ciclo.

Piloto de filtración 1: Piloto de membranas de 0,14m de longitud (superficie membranaria 0,00307m<sup>2</sup>), construido por el grupo CICTA para pruebas con hidrolizados de almidón de yuca [79] [80]; sangre de bovino [81] [82] y para leche entera y semidescremada [83].

Piloto de filtración 2 (escalado): Piloto de membranas cerámicas de 1m de longitud (superficie membranaria 0,132m<sup>2</sup>). Este módulo fue diseñado por Díaz & Ramos [84] para hidrolizados de almidón de yuca y utilizado también por González & Molina [85] para la filtración de leche semidescremada.

Procedimiento de limpieza de las membranas. Para la limpieza de las membranas se siguió el protocolo del Grupo CICTA/UIS, el cual consiste en un primer lavado básico con NaOH (1N) y NaOCl (1200 ppm) en 60min y 55°C y un segundo lavado con una solución ácida de HNO<sub>3</sub> (1N) durante 60min y 55°C, con lavados intermedios de agua destilada hasta alcanzar pH neutro. Posteriormente, se midió la permeabilidad de la membrana al agua a los 20min de filtración a 40°C y  $\Delta$ PTM de 200 kPa para determinar el grado de limpieza de las membranas.

Piloto evaporación de película descendente al vacío. Piloto que consta de un tubo de calentamiento en acero inoxidable de 1,4m de longitud, 0,038m de diámetro, con resistencias eléctricas internas en la parte superior e inferior y sistema de

control de temperatura y presión. Este equipo fue diseñado por Muñoz & Solano [86] en el grupo CICTA/UIS.

Piloto de Secado *Spry-dryer*. Secador centrífugo con sistema de calentamiento a través de resistencias eléctricas, motor con capacidad de 33000rpm, aislamiento térmico del equipo en corcho y caucho y sistema de control de temperatura de entrada de aire a la cámara. Este piloto fue diseñado por Antury & Cubillos [87] en el grupo CICTA/UIS.

## 2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LACTOSUERO ÁCIDO NO TRATADO

La Tabla 1 muestra la composición del lactosuero no tratado en el presente estudio, la cual presenta un carácter ácido (pH= 4,86), similar a los caracterizados por autores como Souza et al. [88] y Gösta [89] (Tabla 1) a pH entre 4,5-5,0.

**Tabla 1.** Caracterización de lactosuero inicial en base seca. \**Desviación media.*

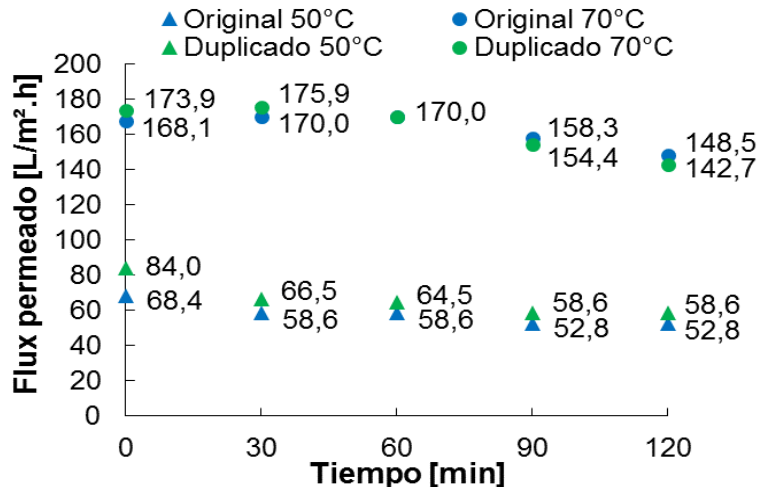
	<b>Estudio actual</b>	<b>Souza et al. [90]</b>	<b>Gösta [91]</b>
pH	4,86	4,5 – 5,0	4,3 – 4,6
°Brix	5,5	6,8	---
Materia Seca [%p/p]	5,83±0,09	6,5±0,15	6,5
Cenizas [%p/p]	8,92±0,14	8,77±0,20	12,31
Proteínas [%p/p]	7,72±0,12	13,08±0,30	8,46
Grasa [%p/p]	<1,7	7,54±0,17	0,62
Lactosa [%p/p]	70,06±1,14	75,87±5,78	75,38
Ácido láctico [%p/p]	5,16±0,07	---	6,15
Calcio [%p/p]	0,86±0,01	0,69±0,02	1,85
Fósforo [%p/p]	0,69±0,01	0,62±0,01	1,00
Turbidez [NTU]	1710 ± 30	---	---

El contenido de proteínas, materia seca y cenizas, mostrados en la Tabla 1, son menores en comparación con Souza et al. [92] y Gösta [93]. El menor contenido de proteína se debe a que el lactosuero suministrado proviene de un proceso de elaboración de requesón, la cual busca la precipitación adicional de proteínas del lactosuero por calentamiento entre 90-100°C; y con ello, disminución de materia seca y cenizas (por los minerales asociados a las proteínas). El menor contenido de grasa se debe a que el lactosuero utilizado fue sometido a una etapa de descremado para evitar mayor ensuciamiento en la etapa de filtración con membranas. Igualmente, estos últimos autores reportan bajo contenido de grasa en lactosueros ácidos.

## 2.2 ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA FILTRACIÓN CON MEMBRANA

La Figura 3 muestra los valores de flux de permeado obtenidos para las pruebas realizadas a  $\Delta P_{TM}$  de 200 kPa y temperatura de 50 y 70°C. En ella se observa que para las dos temperaturas evaluadas la permeabilidad disminuye con el tiempo debido al ensuciamiento de la membrana (formación de depósitos, adsorción y bloqueo de poros por las proteínas), al trabajar bajo presión y en caliente [94] [95] [96]. Sin embargo, para las dos temperaturas el flux de permeado se estabilizó antes de las 2h de filtración (55,7±3,4 L/m<sup>2</sup>.h para 50°C y 151,0±6,8 L/m<sup>2</sup>.h para 70°C) similar a Acosta & Ríos [97] y Díaz & Ramos [98] para el mismo piloto de filtración y membranas ( $D_{poro}$  de 0,2µm), pero con matrices diferentes (sangre de bovino cruda e hidrolizados de almidón de yuca, respectivamente). Esto indica que independiente de la matriz a filtrar a partir de cierto tiempo de filtración (90-120 min), se presenta un fenómeno de estabilización en la membrana [99].

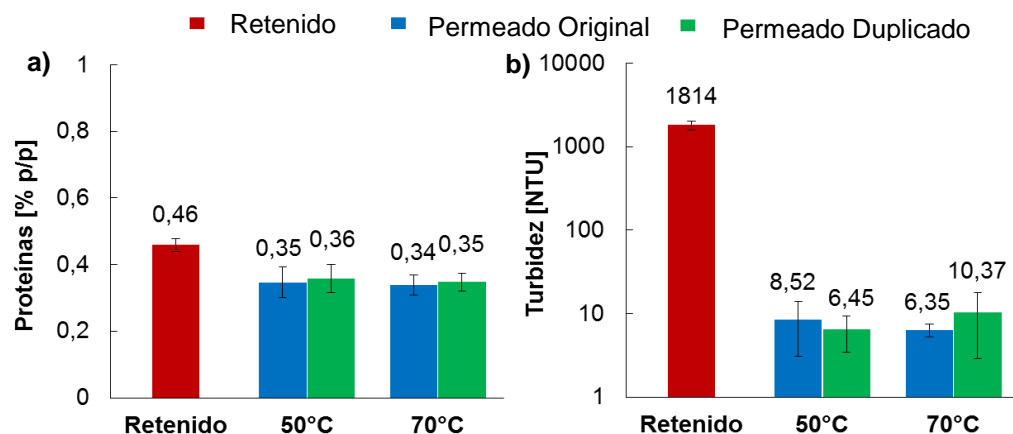
**Figura 3.** Permeabilidad de lactosuero ácido utilizando membranas de 0,2 µm,  $\Delta P_{TM}$  de 200 kPa a 50°C y 70°C,  $Re=82958$  y  $Q_{ALIMENTACIÓN}=0,3$  L/s durante 2h de filtración. \*Desviaciones estándar.



En cuanto a la permeabilidad para 70°C, la literatura no reporta valores, sin embargo, esta fue mayor a la reportada a 50°C en más de 160%, y con respecto a lo reportado por Souza et al. [100] también a 50°C en más de 40%; lo que indica que mayores temperaturas incrementan la permeabilidad [101] [102]. Asimismo, hubo una mayor recuperación de la permeabilidad de la membrana después del lavado en comparación con la temperatura de 50°C.

En la Figura 4 se muestran los valores promedio obtenidos para proteína y turbidez con su respectiva desviación estándar, para las 2h que duró cada prueba; se presenta de esta manera puesto que en el análisis estadístico realizado no hubo diferencias significativas para las muestras en el tiempo. En la Figura 4a se presenta el contenido de proteínas del retenido y los permeados para las filtraciones de 50 y 70°C, donde se puede observar una disminución de ésta en los permeados, logrando un %retención de 24 y 26%, respectivamente. Similar a este estudio, Camacho [103] reportó un %retención del 25% para lactosuero (pH entre 5,55 y 5,9) utilizando membranas cerámicas con un diámetro de poro de 0,2µm, a 30°C y  $\Delta$ P<sub>TM</sub> de 200 kPa. Esta disminución corresponde a la retención de caseínas todavía presentes y proteínas séricas que por efecto de la temperatura precipitan [104].

**Figura 4.** Contenido de a) Proteínas y b) Turbidez, para retenidos y permeados con membrana de 0,2 µm a  $\Delta$ P<sub>TM</sub> 200 kPa, 50°C y 70°C, Re=82958 y Q<sub>ALIMENTACIÓN</sub>=0,30 L/s durante 2 h de filtración. \*Desviaciones estándar.



La Figura 4b, correspondiente a turbidez, muestra un comportamiento similar para permeados y retenidos en las dos temperaturas. Sin embargo, los datos entre retenidos y permeados presentan diferencias notables, con reducción en la turbidez superior al 99%, la cual está asociada a la retención de proteínas insolubles (caseínas y proteínas séricas desnaturalizadas) como se mencionó anteriormente. González & Molina [105] para filtraciones de leche semidescremada afirman que las caseínas son las responsables de los altos valores de turbidez. Los °Brix leídos para retenido y permeado no mostraron diferencias importantes en su valores, que estuvieron siempre entre 5 y 6°Brix (desviación del instrumento de lectura 1°Brix). Para el contenido de cenizas (minerales) en ambos casos, el retenido fue  $0,53 \pm 0,02\%$  y permeado  $0,49 \pm 0,03\%$  (p/p), con %retención <8%. Barukcic et al. [106] para lactosuero dulce (pH de 6,5) reportó para membranas de 0,1, 0,5 y  $0,8 \mu\text{m}$  una retención de sales de calcio <7%, retención debido a minerales asociados a proteínas [107]. En vista de que las características a 50 y 70°C son muy similares, pero la permeabilidad a 70°C fue mayor, se decidió continuar el estudio utilizando esta última temperatura.

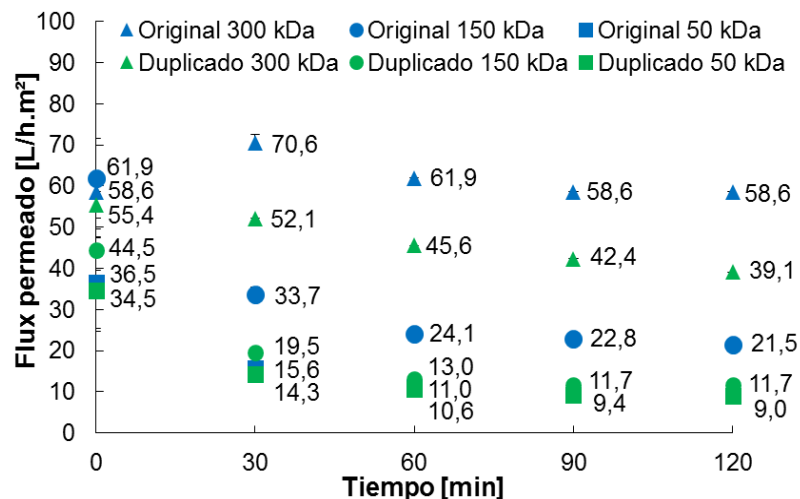
### **2.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DE PORO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA FILTRACIÓN**

En la Figura 5 se muestra el comportamiento del flux de permeado a 70°C, para los distintos diámetros de poro evaluados; igual como ocurrió para la membrana de  $0,2 \mu\text{m}$ , la permeabilidad se estabiliza antes de las 2h de filtración ( $49,7 \pm 10,4$ ;  $16,9 \pm 6,0$  y  $9,2 \pm 0,2 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ , para 300, 150 y 50kDa, respectivamente). Igualmente, se observa que el flux de permeado disminuye con el diámetro de poro, obteniendo reducciones de 10, 62 y 73% en la permeabilidad para 300, 150 y 50kDa, respectivamente. Estos descensos son justificados con las mismas razones que para el diámetro de  $0,2 \mu\text{m}$ , destacando también una mayor pérdida de permeabilidad durante la estabilización, debido a la cercanía en tamaño entre

las proteínas séricas ( $\beta$ -Lactoglobulina, 18 kDa;  $\alpha$ -Lactoalbúmina 14 kDa; BSA 69 kDa; lactoferrina 78 kDa e Inmunoglobulinas, 150-1000 kDa [108]) y los diámetros de poro estudiados. Es así que la membrana con la mayor permeabilidad fue la de diámetro de poro de 0,2  $\mu\text{m}$  ( $163,2 \pm 11,4 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ ), siendo superior en más de 200, 500 y 900% a los flux promedio de permeado de 300, 150 y 50 kDa, respectivamente (valores a  $70^\circ\text{C}$ ).

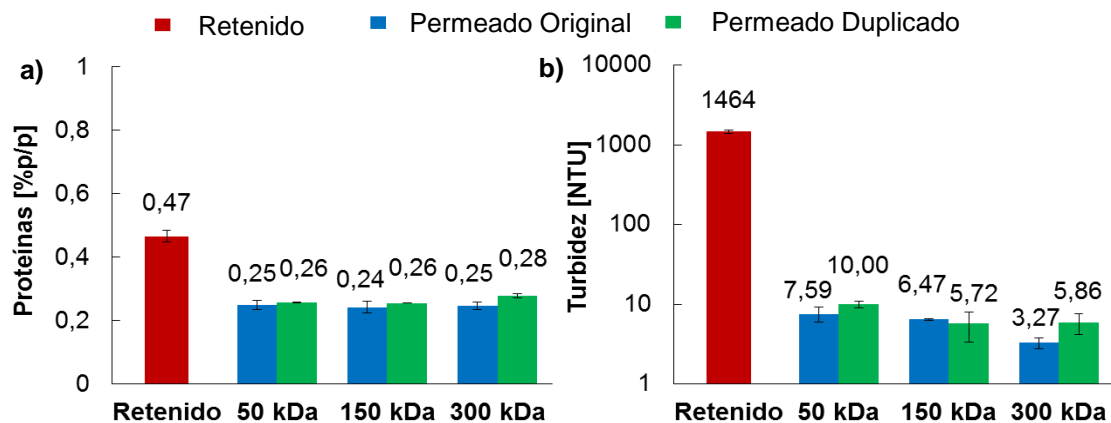
Algunos autores como Almécija et al. [109], Muro et al. [110] y Camacho [111] también reportaron flux de permeado para 300, 150 y 50 kDa, respectivamente, a  $30^\circ\text{C}$  y  $\Delta\text{PTM}$  de 100-300 kPa. Para el primero, el flux fue menor ( $25 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ ) al flux promedio reportado en el presente trabajo ( $54,3 \pm 9,6 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$  para la membrana de 300kDa), esto debido a la menor temperatura utilizada por el autor ( $30^\circ\text{C}$ ). En cuanto a los otros dos autores los flux fueron mayores ( $37,7$  y  $38,5 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ , para 150 y 50 kDa, respectivamente) a los reportados en este estudio ( $26,5 \pm 16,1$  y  $15,9 \pm 10,6 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$  para 150 y 50 kDa, respectivamente), como consecuencia de la precipitación de las proteínas a altas temperaturas [112], las cuales pueden depositarse sobre la membrana y así reducir el flux.

**Figura 5.** Permeabilidad de lactosuero ácido a distintos diámetros de poro a  $70^\circ\text{C}$ ,  $\Delta\text{PTM}$  de 200 kPa,  $\text{Re}=78216$  y  $Q_{\text{ALIMENTACIÓN}}=0,27 \text{ L/s}$  durante 2h de filtración. \*Desviaciones estándar.



Los resultados de proteína y turbidez se muestran en la Figura 6 con su promedio y desviación estándar. Para el contenido de proteína (Figura 6a) las membranas de 300, 150 y 50 kDa presentan un %retención similar entre 40-49%, a diferencia de la membrana de 0,2  $\mu\text{m}$ , la cual presentó una retención entre 24-26%, logrando una retención prácticamente del doble. Este aumento se debe a la reducción del diámetro de poro, pudiendo retener parte de las proteínas séricas de mayor tamaño como Inmunoglobulinas (161 kDa) [113]. A pesar del aumento de retención de proteínas para 300, 150 y 50 kDa con respecto a las membranas de 0,2  $\mu\text{m}$ , aún hay paso de proteína a través de éstas, posiblemente proteínas séricas  $\beta$ -Lactoglobulina y  $\alpha$ -Lactoalbúmina, las cuales tienen un peso molecular inferior a los diámetros de poro utilizados; Almécija et al. [114] reportaron pesos moleculares para estas proteínas de 18 y 14kDa, respectivamente. Steinhauer et al. [115] obtuvieron para membranas cerámicas con diámetro de poro de 0,1  $\mu\text{m}$  (cercano a 300 kDa) a 50°C un %retención cerca al 60%, porcentaje mayor al de este estudio (40-49%). Varias pueden ser las razones, la primera tiene que ver con diferencias en las características físicas de las membranas utilizadas, pero también la temperatura de trabajo (mayor para el presente trabajo), la cual tiene un efecto en la configuración espacial de las proteínas, lo cual pudo favorecer su paso a través de la membrana [116] [117].

**Figura 6.** Contenido de a) Proteínas y b) Turbidez, de retenidos y permeados obtenidos a 70°C,  $\Delta\text{PTM}$  de 200 kPa,  $\text{Re}=78216$  y  $Q_{\text{ALIMENTACIÓN}}=0,27$  L/s durante 2h de filtración. \*Desviaciones estándar.



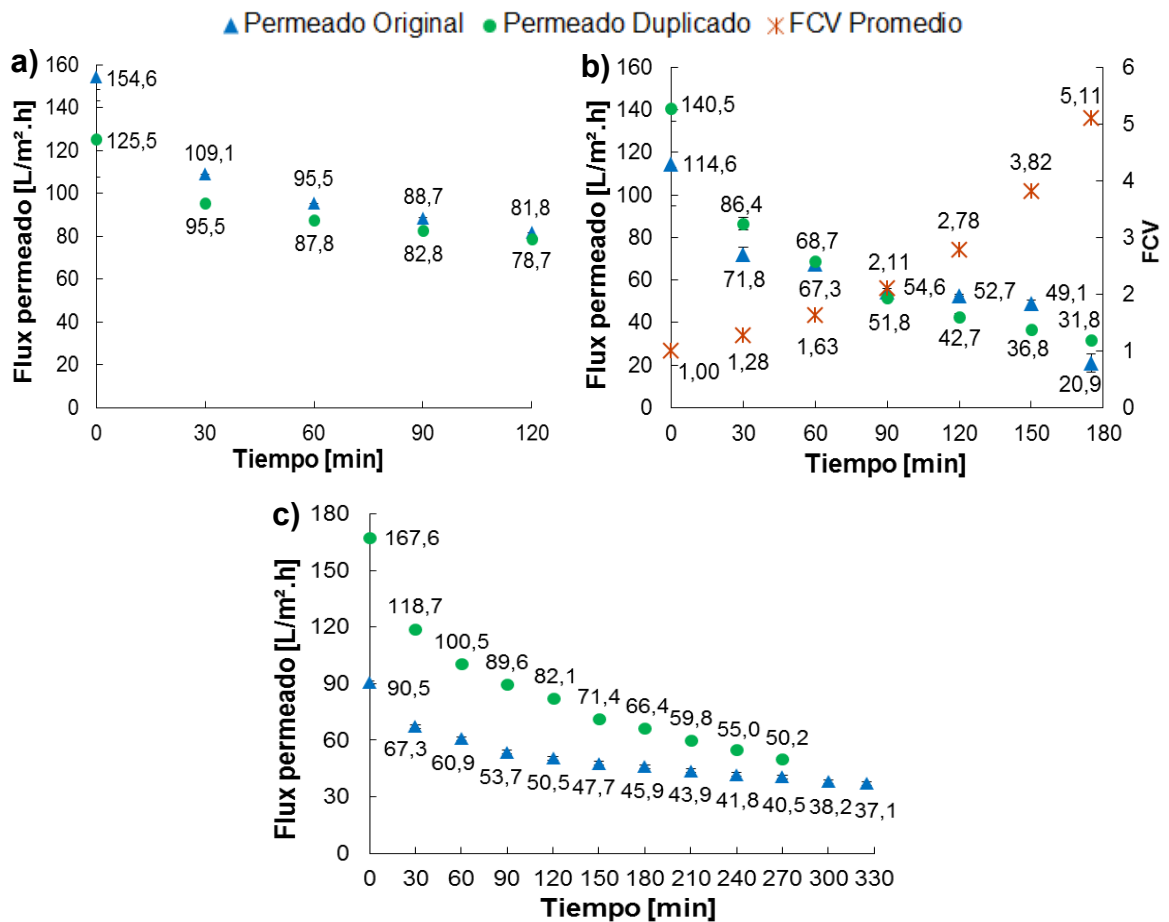
Para membranas cerámicas de 150 y 15 kDa, Muro et al. [118] reportaron %retención de proteína de 55,98% y 63,06%, respectivamente (a 35°C y  $\Delta$ P<sub>TM</sub> de 200 kPa). Esto muestra que entre 150 y 15 kDa la diferencia en la retención no es alta, así como en este estudio, donde la retención para las membranas de 150 y 50 kDa, fue similar. Con respecto a la turbidez para estos 3 diámetros de poro (Figura 6b), se logró reducir en más del 99% en los permeados, así como ocurrió con la membrana de 0,2 $\mu$ m. Como se mencionó anteriormente, las caseínas y proteínas desnaturalizadas son las encargadas de los altos valores de turbidez. Para °Brix, similar a las filtraciones anteriores, el retenido y permeado estuvieron entre 5 y 6°Brix. Como se mencionó anteriormente, este aumento no es concluyente debido a la desviación del instrumento. El contenido de minerales para el retenido fue de 0,56 $\pm$ 0,02% p/p y 0,54 $\pm$ 0,04% p/p para los permeados, mostrando un paso completo de éstos en los tres casos al igual que para 0,2 $\mu$ m. De acuerdo con los análisis anteriores, es preferible escalar el proceso con membranas de diámetro de poro de 0,2  $\mu$ m, porque la permeabilidad en el tiempo fue mayor (más productivo) en comparación con las membranas de 300, 150 y 50kDa. Aunque la retención de proteína fue menor (la mitad) que en los otros diámetros, este factor no es determinante ya que el lactosuero es pobre en proteínas. Además, la reducción de turbidez fue en todos los casos superior al 99%.

## **2.4 EVALUACIÓN DEL ESCALADO Y EL MODO DE OPERACIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA OPERACIÓN DE FILTRACIÓN CON MEMBRANA**

En la Figura 7 se muestra el comportamiento del flux de permeado para el piloto escalado con membranas de 0,2  $\mu$ m bajo los modos de operación: recirculación total (Figura 7a), *Batch* (Figura 7b) y semicontinuo (Figura 7c). Posteriormente, se presenta la Tabla 2 con los resultados de la caracterización fisicoquímica de las muestras obtenidas.

Para el modo recirculación total (Figura 7a), el descenso del flux de permeado fue de 43%, mayor al obtenido en el piloto 1 a 70°C (15%). Este descenso es justificado por cambios en el régimen de turbulencia en el sistema ( $Re_1 = 82958$  y  $Re_2 = 25942$ ), es decir, el  $Re_2$  fue 3,2 veces menor al  $Re_1$ , lo que repercute en un menor arrastre de componentes del lactosuero, aumentando el ensuciamiento de las membranas (menor flux) y con ello la retención de proteínas [119]. Por esta razón, el %retención de proteína para el piloto 2 fue mayor al reportado inicialmente en el piloto 1 (41 y 26%, respectivamente).

**Figura 7.** Permeabilidad de lactosuero ácido en el tiempo de filtración, a diferentes modos de operación: a) Recirculación total, b) *Batch* y c) Semicontinuo con membranas de 1 m de longitud y diámetro de poro de  $0,2 \mu m$  a  $\Delta P_{TM}$  de 200 kPa,  $70^\circ C$ ,  $Re=25942$  (1 membrana) y  $Q_{ALIMENTACIÓN}=0,78 L/s$ . \*Desviaciones estándar.



Para el modo *Batch* (Figura 7b) con un Factor de Concentración Volumétrica (FCV) de 5 se logró un flux promedio de  $56,9 \pm 22,5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$  con un 70% de reducción al final de la filtración. Esta reducción está relacionada a factores como la viscosidad (aumento) y acumulación de moléculas de soluto (proteínas) en la superficie de la membrana, lo que genera mayor resistencia a la filtración y por lo tanto una reducción del flux [120] [121]. Autores como Atrá et al. [122], Steinhauer et al. [123] para el mismo FCV obtuvieron una productividad inferior ( $20\text{-}30 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ ) debido a menores diámetros de poro (8-10 kDa) y caudales de alimentación (0,05-0,11 L/s), pero lograron una mayor retención de proteínas (93-100%) en comparación a este estudio (68%). A pesar de la retención obtenida, el contenido de proteína en el retenido final (Tabla 2) fue de  $1,09 \pm 0,32\% \text{ p/p}$ , cantidad baja en comparación con Atrá et al. [124] que alcanzaron contenidos entre 8 y 10% p/p, debido al proceso de elaboración de requesón previamente señalado para el presente trabajo.

Para semicontinuo (Figura 7c), las permeabilidades disminuyeron 59-70%, menor o igual al modo *Batch* (70%), aun así se filtraron cerca de 50L en aproximadamente 5h (a  $67,2 \pm 31,3 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ ), resultando más productivo que el modo *Batch* (28L en 3h y  $\text{flux} = 56,9 \pm 22,5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ ) e indicando que se podría filtrar incluso durante más tiempo. Esto a causa de la alimentación constante con lactosuero nuevo evitando un rápido aumento en la concentración de sólidos. En cuanto al %retención de proteína fue de 61%, cercana al modo *Batch*, pero alcanzada en un mayor tiempo por la razón mencionada anteriormente. Cabe señalar que, en todos los casos, se recuperó la permeabilidad de las membranas utilizando los protocolos de lavado implementados en el CICTA/UIS.

El contenido de proteína en los permeados a lo largo de las filtraciones en recirculación total, *Batch* y semicontinuo (Tabla 2) se mantuvieron constantes en el tiempo,  $0,25 \pm 0,03$ ,  $0,33 \pm 0,04$  y  $0,36 \pm 0,03\% \text{ p/p}$ , respectivamente. Evidenciando así que el paso de sólidos solubles a través de las membranas (selectividad) no se ve afectado. Para °Brix en modo recirculación total (Tabla 2), se puede observar

que al igual que en el piloto anterior, el contenido de sólidos solubles no cambia, por lo que no se evidencia una retención de éstos. En modo *Batch* y semicontinuo (igualmente Tabla 2) se observa un ligero incremento de °Brix en el retenido, pero como se mencionó anteriormente, este aumento en la lectura no es concluyente, debido a la afectación que puede tener sobre esta medida las proteínas solubles del lactosuero. Con respecto al contenido de cenizas (asociado a minerales), en los tres casos se observa paso completo a través de las membranas.

**Tabla 2.** Contenido de proteína, materia seca, °Brix, ceniza y turbidez en permeados y retenidos de los distintos modos de operación evaluados a 70°C, ΔPTM de 200 kPa, Re=25942 y Q<sub>ALIMENTACIÓN</sub>=0,78 L/s. F1 y F2 corresponde a Filtración 1 y 2.

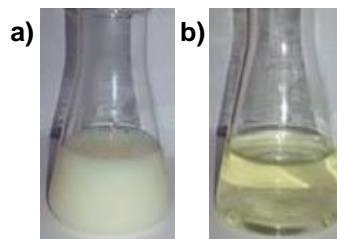
Recirculación total		Proteínas [%p/p]		M. Seca [%p/p]		°Brix		Cenizas [%p/p]		Turbidez [NTU]	
		F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Permeado	Inicial	0,24	0,23	5,21	5,02	5	5	0,43	0,44	3,43	3,26
	Final	0,27	0,26	5,44	5,26	5	5	0,51	0,54	6,05	4,88
Retenido	Inicial	0,43	0,40	5,49	5,28	5	5	0,47	0,51	1515	1500
	Final	0,44	0,44	5,99	5,79	6	6	0,51	0,54	1855	2015

<i>Batch</i>		Proteínas [%p/p]		M. Seca [%p/p]		°Brix		Cenizas [%p/p]		Turbidez [NTU]	
		F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Permeado	Inicial	0,30	0,29	5,26	5,27	5	5	0,49	0,54	7,7	5,84
	Final	0,34	0,37	6,29	6,02	6	6	0,50	0,53	11,3	6,46
Retenido	Inicial	0,41	0,41	5,82	5,50	6	5	0,57	0,47	66	1150
	Final	1,05	1,12	7,28	7,09	7	7	0,60	0,55	560	12550

Semicontinuo		Proteínas [%p/p]		M. Seca [%p/p]		°Brix		Cenizas [%p/p]		Turbidez [NTU]	
		F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Permeado	Inicial	0,36	0,31	5,38	5,62	5	5	0,52	0,55	2,8	4,3
	Final	0,37	0,39	5,98	5,88	6	5	0,58	0,54	8,2	5,5
Retenido	Inicial	0,46	0,42	5,77	5,73	5	5	0,57	0,58	107	598
	Final	0,97	0,98	6,96	6,76	6	7	0,64	0,58	1480	10025

En cuanto a la reducción de turbidez del lactosuero, se obtuvieron reducciones >99% para la recirculación total, 88%-98% en *Batch* y 97%-99% en semicontinuo. Estas diferencias para la configuración en *Batch* y en semicontinuo con la configuración en recirculación total (ambas escalas) se deben a que, para estas dos configuraciones no se pudo mantener la turbidez de los lactosueros alimentados ya que se requerían volúmenes superiores a 28L en cada prueba y era imposible almacenar el volumen total para la fase de experimentación. Sin embargo, se resalta el hecho de que las características de los permeados no se vieron afectadas, como se indicó previamente. Esto es muy positivo puesto que a pesar de que la materia prima pueda tener diferencias (en turbidez y material insoluble), el permeado obtenido posee las mismas características (importante en estandarización de procesos). En la Figura 8 se muestra el ejemplo de un retenido y su permeado obtenidos al final de la prueba.

**Figura 8.** Muestras de a) Retenido y b) Permeado obtenidas durante la filtración en modo *Batch* a 70°C,  $Q_{ALIMENTACION} = 0,78$  L/s,  $Re = 25942$  y  $\Delta P_{TM} = 200$  kPa.



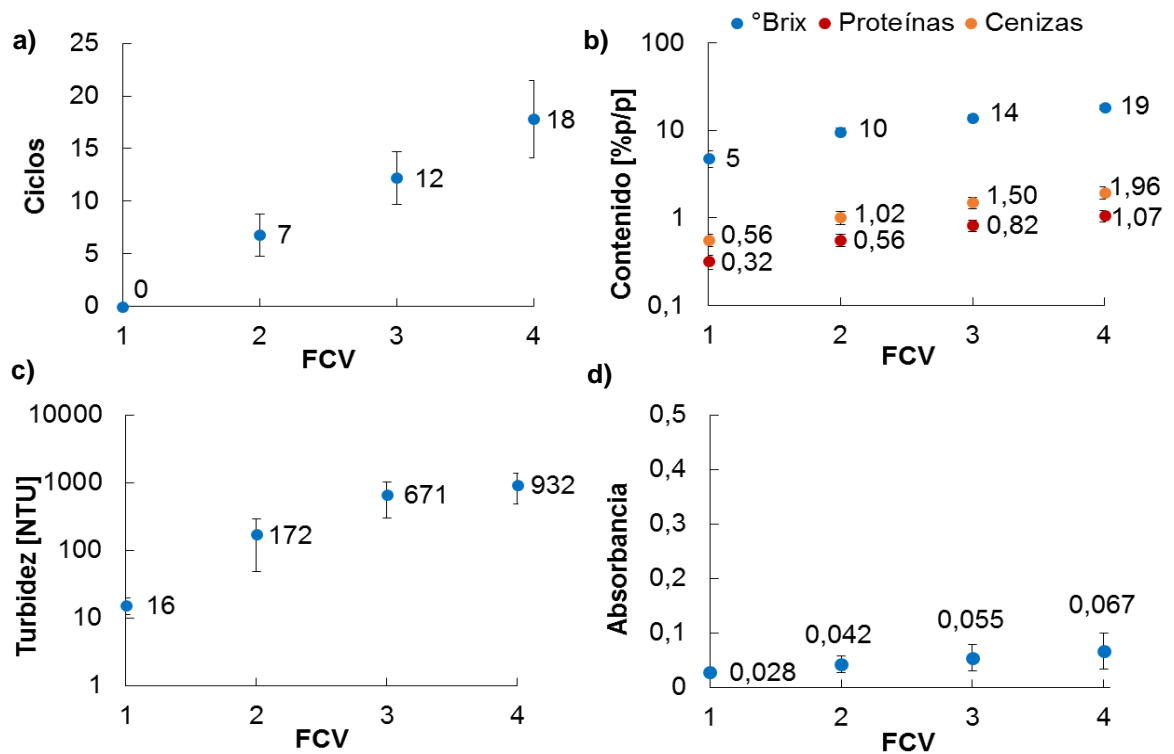
## 2.5 ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE LA EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE AL VACÍO Y SECADO POR ASPERSIÓN SOBRE EL PRODUCTO FINAL OBTENIDO

Los clarificados obtenidos de las filtraciones con membranas de 0,2  $\mu\text{m}$  a escala piloto-laboratorio (entre 4 y 5 °Brix) fueron posteriormente concentrados en el piloto de evaporación de película descendente al vacío. En la Figura 9 se presentan los resultados obtenidos para el efecto del número de ciclos sobre el Factor de Concentración Volumétrica (FCV) y las características de los concentrados. El FCV logrado en esta etapa de concentración fue de 4 (alrededor de 18°Brix), puesto que a partir de este valor el lactosuero presentó espuma bastante estable impidiendo así retirar agua. Esto se debe al aumento de la concentración de proteínas presentes en el lactosuero las cuales tienen propiedades espumantes [125] que pueden intensificarse al ser desnaturalizadas por la temperatura [126]. En la Figura 9a se puede observar que para un determinado FCV, el número de ciclos varía considerablemente (representado en una desviación estándar mayor), debido a inconvenientes en la formación de la película durante el proceso de concentración, lo cual puede alargar el proceso. A pesar que los ciclos variaron bastante entre un lote y otro para lograr el mismo FCV, las características como °Brix, proteína y ceniza (Figura 9b) no se vieron afectadas, ya que para el mismo FCV cada lote reportó aproximadamente el mismo contenido y el aumento estuvo directamente relacionado con el volumen retirado.

En la Figura 9c se muestra la turbidez de los concentrados para cada FCV, todos llevados a la misma concentración inicial (entre 4 y 5°Brix). En esta gráfica se puede ver que la turbidez del lactosuero concentrado y diluido nuevamente, aumenta y tiende a estabilizarse, en lugar de mantenerse en la turbidez inicial (FCV=1). Esto quiere decir, que parte de la proteína sérica que inicialmente era soluble, se volvió insoluble debido al tratamiento térmico (superior a 60°C),

generando desnaturalización irreversible [127], [128]. Caso contrario a los jarabes de glucosa obtenidos a partir de la concentración de hidrolizados de almidón de yuca clarificados de Rodríguez & Sandoval [129], los cuales mantuvieron sus valores de turbidez durante el proceso de concentración mediante película ascendente, o los mismos obtenidos por Anaya & Bueno [130] pero concentrados por evaporación de película descendente al vacío. Con el objetivo de reducir el contenido de insolubles que pueden precipitarse por desnaturalización y afectar la turbidez de los concentrados, se consideraría implementar una etapa de tratamiento térmico posterior a la elaboración de requesón, a temperaturas iguales o superiores a 90°C, para desnaturalizar más proteína, de manera que pueda ser retenida en la etapa de filtración por membranas.

**Figura 9.** Análisis en función del FCV, a) Ciclos, b) °Brix, Proteínas, Cenizas, c) Turbidez y d) Absorbancia a  $\lambda = 440\text{nm}$ , a presión de 200 mbar. \*Desviaciones estándar.



En la Figura 9d se observa la absorbancia ( $\lambda = 440\text{nm}$ ) de los concentrados en función del FCV. Las muestras concentradas fueron, al igual que para turbidez, diluidas y llevadas a la concentración inicial (FCV=1) para estudiar el cambio del color (relacionado con la absorbancia a longitud de onda del espectro visible) a medida que se iba concentrando la solución. La lectura de absorbancia se hizo a 440 nm, similar a Rodríguez & Sandoval [131], puesto que a esta longitud de onda (color azul), el color que se transmite o refleja es el amarillo [132]. En esta figura se puede ver que la absorbancia aumenta a medida que se concentra el lactosuero, pero este aumento sería despreciable teniendo en cuenta la cantidad de ciclos realizados (en promedio 18). Rodríguez & Sandoval [133] para jarabes de glucosa en película ascendente, entre 1 y 3 ciclos, la absorbancia aumentó de 0,5 a 1,3; lo cual muestra el bajo efecto del evaporador de película descendente sobre el color, por pardeamiento térmico del producto. Como observación, se menciona que durante el almacenamiento de los concentrados a  $-20^{\circ}\text{C}$ , se presentó cristalización de una parte de sólidos presentes; según Luquet [134], esto se le atribuye a la formación de  $\alpha$ -lactosa monohidratada (cristales), los cuales se forman a temperaturas inferiores de  $15^{\circ}\text{C}$ , y que facilitarían el proceso de secado.

Se realizaron pruebas de secado para soluciones de lactosuero concentrado sin aditivos ( $18^{\circ}\text{Brix}$ ), lactosuero con  $\text{CaCO}_3$  ( $19^{\circ}\text{Brix}$ ) y lactosuero con maltodextrina ( $40^{\circ}\text{Brix}$ ) mostradas en la Tabla 3, obteniendo rendimientos de  $14,89 \pm 10,42\%$ ,  $22,53 \pm 1,66\%$  y  $40,83 \pm 10,41\%$ , respectivamente. Estos bajos rendimientos se deben a que las pruebas de secado se realizaron bajo condiciones tomadas de Antury & Cubillos [135], propuestas para hidrolizados de almidón clarificados; su optimización no se consideró dentro del alcance de este proyecto. Sin embargo, se obtuvieron pulverizados que bajo las mismas condiciones de operación que para glucosa no son posibles [136], mostrando la capacidad del piloto para secar lactosuero.

**Tabla 3.** Caracterización de pulverizados obtenidos en base seca.

Característica	Lactosuero	Lactosuero + CaCO <sub>3</sub> (5%)	Lactosuero + maltodextrina
<b>Materia seca %p/p*</b>	94,43±0,83	94,5±0,19	94,16±1,03
<b>Proteínas %p/p*</b>	5,61±0,09	5,43±0,09	2,21±0,09
<b>Cenizas %p/p*</b>	10,22±0,03	12,98±0,20	3,01±0,03
<b>Grasa %p/p*</b>	0,32±0,04	0,33±0,04	0,34±0,04
<b>Lactosa %p/p*</b>	75,68±0,83	70,73±0,14	32,57±0,29
<b>% ISA*</b>	89,53±1,31	86,50±0,42	95,61±1,36

ISA: Índice de solubilidad al agua. \*Desviación Media.

De la Tabla 3 se puede observar que el contenido de materia seca fue similar para los pulverizados obtenidos, es decir, %humedad <6%. En cuanto a los contenidos de proteínas, cenizas y grasas, éstos aumentaron en comparación con los concentrados, lo que era de esperarse por la reducción de la humedad en el proceso de secado. Cabe señalar, que los bajos contenidos de proteínas, cenizas y lactosa para la solución de lactosuero con maltodextrina se deben al aumento de sólidos al preparar la mezcla lactosuero/maltodextrina en una relación 1:1. El contenido de lactosa para lactosuero puro y con CaCO<sub>3</sub> fue similar al reportado en la Tabla 1 para el lactosuero inicial (70,06±1,14 % p/p) corroborando así, el alto contenido de ésta. Para el Índice de Solubilidad (%ISA) de las 3 soluciones ninguna fue 100%. Esto se debe a la presencia de insolubles (proteínas desnaturalizadas), también asociados a la turbidez, generados tanto en la etapa de concentración como la de secado, resultando así en %ISA inferiores al 90% para lactosuero sin aditivos y con CaCO<sub>3</sub>. Para el caso de la solución con maltodextrina, la buena solubilidad y estabilidad aportada por esta última [137] [138], al adicionarse al lactosuero en la misma proporción, contribuyó a un mayor %ISA (95,61±1,36) y una baja turbidez (170±11NTU). La turbidez para los dos primeros pulverizados (reintegrados nuevamente con agua) fueron respectivamente, 1038±142 NTU y 3378±133 NTU.

Con base en las características de los clarificados, concentrados y pulverizados obtenidos, uno de los posibles usos son las bebidas hidratantes-energizantes,

debido al contenido de minerales y azúcares (lactosa), las cuales tienen como finalidad recuperar los electrolitos y la energía perdida después de una actividad física. Según la norma colombiana para bebidas hidratantes-energizantes [139], la relación de azúcar(g)/minerales(g) debe estar entre 0,66 – 2,67. Para el lactosuero puro fue alrededor de 7,5, lactosuero con  $\text{CaCO}_3$  fue 5 y para lactosuero con maltodextrinas fue de 21. En todos los casos, según la norma, sería necesaria la adición de electrolitos,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  en forma de sales. El SENA C.A.S.A. realizó formulaciones preliminares para una bebida de lactosuero con pulpa de fruta utilizando muestras obtenidas en el presente trabajo, encontrando los mejores resultados para el mango. Otras aplicaciones como pan y galletas se beneficiarían del bronceado y caramelizado que los azúcares del producto aportarían [140] y de los ácidos orgánicos que son precursores de aromas durante el proceso de horneado. Igualmente, podrían utilizarse en procesos biotecnológicos como en la producción de ácido láctico y etanol [141] [142].

### 3. CONCLUSIONES

- Se evaluó el tratamiento de lactosuero ácido a partir de la ruta de clarificación con membranas, concentración por película descendente al vacío y secado por aspersión, permitiendo obtener un producto rico en minerales y lactosa, bajo en proteína, que debido a sus características fisicoquímicas tiene potencial para ser utilizado en la industria de alimentos (ej. bebidas hidratantes-energizantes, productos de panificación), y biotecnológica (ej. para la producción de ácido láctico).
- Se evaluó el efecto de la temperatura y el diámetro de poro para la filtración de lactosuero ácido, observando permeabilidades casi 3 veces mayores a 70°C que a 50°C ( $163,2 \pm 11,1$  y  $62,4 \pm 9,2$  L/m<sup>2</sup>.h, respectivamente), sin que esto afecte el ensuciamiento y la recuperación de la membrana. Por otro lado, al disminuir el diámetro de poro, de 0,2  $\mu$ m a 300, 150 y 50 kDa, aumentó la retención de proteína (de 26 a 45%, respectivamente), debido a restricciones generadas por el tamaño de los poros de la membrana. Sin embargo, esto ocasionó que la permeabilidad disminuyera en 3, 6 y 10 veces, respectivamente, en comparación con las membranas de 0,2 $\mu$ m. Para todos los casos se logró una reducción de turbidez superior al 99% (Re= 82958).
- Se estudió el efecto del escalado, observando que la turbulencia influye de manera importante en el desempeño del proceso, que está relacionado con la formación de una capa sobre la superficie de la membrana, que define la permeabilidad y la retención de proteínas por parte de ella. Adicionalmente, se trabajó en modo *Batch*, logrando alcanzar un FCV de 5, en menos de 3h, con un %retención de proteína del 68%, pero con una reducción en la permeabilidad considerable (70%). En cambio, el proceso en semicontinuo

pudo ser operado por 5,5h, debido a un menor ensuciamiento de las membranas, permitiendo procesar mayores volúmenes de lactosuero (1,8 veces más que el modo *Batch*). En todos los casos se obtuvieron permeados con baja turbidez (<12 NTU) a pesar de lactosueros alimentados cuyos valores podían llegar a ser superiores a 12 000 NTU.

- Se analizó el efecto de la evaporación de película descendente al vacío y del secado por aspersión. Para la primera operación se observó que a medida que aumentaba el FCV, el número de ciclos varió considerablemente debido a la dificultad en la formación de la película, sin embargo, las otras características (proteínas, °Brix y cenizas) no se vieron afectadas en sus contenidos y fueron directamente proporcionales al FCV. En cuanto al secado por aspersión, para todas las pruebas realizadas se pudieron obtener pulverizados de lactosuero, mostrando la posibilidad de su aplicación para el secado de este material, pero que aun así necesita de estudios más profundos para mejorar en cuanto a sus rendimientos, que llegaron a ser inferiores al 50%.

#### 4. RECOMENDACIONES

- Considerar una etapa térmica previa a la filtración con membranas para desnaturalizar y precipitar proteína remanente, retirándolas posteriormente en la etapa de filtración. Con ello se evitaría su insolubilización en etapas posteriores, afectando al producto. Para ello, se recomienda evaluar el impacto de trabajar a temperaturas superiores a 90°C (temperatura para la obtención del quesón), en función del tiempo.
- Introducir al piloto de filtración con membranas un sistema de recirculación adicional para aumentar la turbulencia dentro de éste y reducir el ensuciamiento de las membranas, y así poder filtrar más volúmenes de lactosuero a mayores  $\Delta$ PTM's.
- Profundizar en el estudio de posibles aplicaciones que puedan tener el lactosuero clarificado, concentrado y pulverizado, y llevar a cabo la formulación de productos específicos.
- Determinar las mejores condiciones de operación en el proceso de secado para lactosueros ácidos y así aumentar el rendimiento del proceso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GUERRERO, Windy; CASTILLA, Patricia; CÁRDENAS, Karen; GÓMEZ, Carlos y CASTRO, Javier. Degradación anaerobia de dos tipos de lactosuero en reactores UASB. *Tecnología Química*. 2012, vol. 32, nro 1. pp. 99-106. ISSN 2224-6185.
- [2] JELEN, P. Whey processing. Utilization and Products. En: ROGINSKI, H. FUQUAY, J. and FOX, P., eds. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. London: Academic Press, 2003. pp. 2739-2745.
- [3] SIMANCA, Monica; ARTEAGA, Margarita; PÉREZ, Yulieth; SOTO, María y SALCEDO, Jairo. Caracterización y estudio de la fermentación espontánea del suero costeño producido en Montería. *Revista MVZ Córdoba*. 2010, vol. 15, nro. 1. pp. 1944-1953. ISSN 0122-0268.
- [4] MADRID, Antonio. *Curso de Industrias Lácteas*. España: Mundi-Prensa Libros S.A., 1996. 600p. ISBN 8487440827.
- [5] VAN DER SCHANS, A. *Valorisation of whey*. Holanda: Haute école valaisanne, 2002.
- [6] GÖSTA, Bylund. *Manual de Industrias lácteas*. Traducido por Antonio López Gómez y Antonio Madrid Vicente. 3<sup>ra</sup> ed. España: Ediciones Mundi-Prensa, 2002. 436 p. ISBN: 978-84-89922-81-5.
- [7] FEDNA - Fundación Española para el Desarrollo de Nutrición Animal. [Sitio web]. *Ingredientes para piensos: Lactosuero ácido*. 2010. Disponible en: [http://www.fundacionfedna.org/ingredientes\\_para\\_piensos/lactosuero%C3%A1cido](http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/lactosuero%C3%A1cido)
- [8] LONDOÑO, Margarita; SEPÚLVEDA, José; HERNÁNDEZ, Aldo y PARRA, Jaime. Bebida fermentada de suero de queso fresco inoculada con *lactobacillus casei*. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín*. 2008, vol. 61, nro. 1. pp. 4409-4421. ISSN 0304-2847.
- [9] TENIZA, Ogilver. *Estudio Del suero de queso de leche de vaca y propuesta para el reuso del mismo*. Trabajo de maestría en Tecnología Avanzada

Tlaxcala: Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, 2008. 137 p.

- [10] UNIMEDIOS - UNIDAD DE MEDIOS DE COMUNICACIÓN. Fabricación de quesos como para récord Guinness [sitio web]. Medellín: Unimedios. 7, marzo, 2015 [consultado: 24 abril 2017]. Disponible en: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/fabricacion-de-quesos-como-para-record-guinness.html>
- [11] LIU, Xia; CHUNG, Yoon-Kyung; YANG, Shang-Tian y YOUSEF, Ahmed. Continuous nisin production in laboratory media and whey permeate by immobilized *Lactococcus lactis*. *Journal Process Biochemistry*. 2005, vol 40, pp. 13-24. ISSN 1359-5113.
- [12] LONDOÑO, Margarita; SEPÚLVEDA, José; HERNÁNDEZ, Aldo y PARRA, Jaime. Bebida fermentada de suero de queso fresco inoculada con *Lactobacillus casei*. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín*. 2008, vol. 61, nro. 1. pp. 4409-4421. ISSN 0304-2847.
- [13] GHALY, Abdel y KAMAL, M. Submerged yeast fermentation of acid cheese whey for protein production and pollution potential reduction. *Water Research*. 2004, vol. 38, nro. 3. pp. 631-644. ISSN 0043-1354.
- [14] MUKHOPADHYAY, R.; CHATTERJEE, S.; CHATTERJEE, B.; BANERJEE, P. y GUHA, A. Production of gluconic acid from whey by free and immobilized *Aspergillus niger*. *International Dairy Journal*. 2005, vol. 15, nro. 3. pp. 299-303.
- [15] KRAFT JACOBS SUCHARD R & D, INC. Procedimiento mejorado para secar un suero lácteo ácido y/o permeado de suero lácteo ácido. Inventor: NASSAUER, J.; FRITSCH, R.; GOTZMANN, A. y DOLLMANN, J. Int. Cl.: A23C 21/10. Fecha de solicitud: 31, marzo, 1994. España. ES 2097001 T3. 16 Marzo 1997.
- [16] MUJUMDAR, Arun; HUANG, Li-Xin y DONG CHEN, Xiao. An overview of the recent advances in spray-drying. *Dairy Science Technology*. 2010, vol. 90, nro. 2-3. pp. 211-224. ISSN 1958-5594. ISSN 0958-6946.

- [17] FOEGEDING, Allen; DAVIS, Jack; DOUCET, Dany y MCGUFFEY, Matthew. Advances in modifying and understanding whey protein functionality. *Food Science and Technology*. 2002, vol. 13, pp. 151-159. ISSN 0924- 2244.
- [18] BARUKCIC, Irena; BOZANIC, Rajka y KULOZIK, Ulrich. Effect of pore size and process temperature on flux, microbial reduction and fouling mechanisms during sweet whey cross-flow microfiltration by ceramic membranes. *International Dairy Journal*. 2014, vol. 39, pp. 8-15. ISSN 0958-6946.
- [19] AKHTAR, Mahmood y DICKINSON, Eric. Whey protein-maltodextrin conjugates as emulsifying agents: An alternative to gum arabic. *Journal Food Hydrocolloids*. 2007, vol. 21, nro. 4. pp. 607-616. ISSN 0268-005X.
- [20] SPAHN, G.; BAEZA, R.; SANTIAGO, L. y PILOSO, A. Whey protein concentrate/ $\lambda$ -carrageenan systems: Effect of processing parameters on the dynamics of gelation and gel properties. *Food Hydrocolloids*. 2008, vol. 22, nro. 8. pp.1504–1512. ISSN 0268-005X.
- [21] KRECZMANN, Braulio; ALONSO, Alba; LILOIA, Matías; ZAMBONI, Enzo; CERUTTI, Raul; BARONI, Dante y POLUJÁN, Dianela. Procesamiento del lactosuero: elaboración de lactosa y aprovechamiento de proteínas. *Tecnología Láctea Latinoamericana*. 2015, vol. 87, pp. 44-49. ISSN 0328-4158.
- [22] GUTIÉRREZ, Himar. Obtención de derivados lácteos por ultrafiltración. *Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos*. 2013, vol. 440, pp. 51-54. ISSN 0300-5755.
- [23] SÁNCHEZ, Óscar; ORTÍZ, María y BETANCOURT, Adriana. Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus spp.* *Revista Colombiana de Biotecnología*. 2004, vol. 6, nro. 1. pp. 43-54. ISSN 1909-8758.
- [24] URRIBARRÍ, Lauris; VIELMA, Alex; PÁEZ, Gisela; FERRER, José; MÁRMOL, Zulay y RAMONES, Eduardo. Producción de ácido láctico a partir de suero de leche, utilizando *Lactobacillus helveticus* en cultivo continuo. *Revista Científica*. 2004, vol. 14, nro. 4. pp. 297-302. ISSN 0798-2259.

- [25] ARAUJO, Karelen; ROMERO, Alejandra; CHIRINOS, Patricia; PÁEZ, Gisela; MÁRMOL, Zulay y RINCÓN, Marisela. Producción de etanol a partir de suero de leche en cultivo por lote alimentado con ciclos repetidos. *Interciencia*. 2015, vol. 40, nro. 5. pp. 305-310. ISSN 0378-1844.
- [26] DURÁN, Victoria. Producción de biobutanol a partir de suero de quesería usando una cepa mutante de *Clostridium acetobutylicum*. Tesis de doctorado en Ciencias Biológicas. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes. Centro de Ciencias Básicas. Departamento de Ingeniería Bioquímica, 2015. 216 p.
- [27] DUARTE, Sonia y RAVENTÓS, Mercè. Tecnología de membranas. Universidad Politécnica de Catalunya [en línea]. 2005, [consultado: 25 abril 2016] Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211616/Articulos/Materialex\\_tendido/11\\_Tecnologiademembranas.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211616/Articulos/Materialex_tendido/11_Tecnologiademembranas.pdf)
- [28] MULDER, Marcel. Basic principles of membrane technology. 2<sup>a</sup> ed. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 1996. 564 p. ISBN 0-7923-4247-X.
- [29] BENITO, J.; CONESA, A. y RODRÍGUEZ, M. Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. 2004, vol. 43, nro. 5. pp 829-842.
- [30] DAUFIN, G.; ESCUDIER, J.; CARRÈRE, H.; BÉROT, S; FILLAUDEAU, L. y DECLoux, M. Recent and emerging applications of membrane processes in the food and dairy industry. *Food and Bioproducts Processing*. 2001, vol. 79, nro. 2. pp. 89-102. ISSN 0960-3085.
- [31] GOFF, Douglas. Hardware Design. En: The Dairy Science and Technology Education Series [en línea]. Canadá: University of Guelph, 2005. Última actualización: 16 abril 2014. [Fecha de consulta: 26 abril 2016]. Disponible en: <https://www.uoguelph.ca/foodscience/book-page/hardware-design>
- [32] JIANGSU JIUWU HITECH CO., LTDA. [sitio web]. Nanjing: HITECH, The Filtration and Separation Portal. 2007. [Consulta: 12 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.filtraguide.com/en/379/ext/104730/jiangsu\\_jiuwu\\_hitech\\_co\\_ltd/](http://www.filtraguide.com/en/379/ext/104730/jiangsu_jiuwu_hitech_co_ltd/)

- [33] SANTAMARÍA, Mercé. *Indústria alimentària, tecnologies emergents*. 1<sup>a</sup> edició. Barcelona: Edicions UPC, 2003. 208 p. ISBN 978-84-8301-561-2.
- [34] TWIFORD, R. Membrane filtration offers a variety of applications for dairy. *Dairy Foods*. 2004, vol. 105, nro. 3. pp. 76-78. ISSN 1558-142X.
- [35] VAILANT, Fabrice.; PÉREZ, Ana y VIQUEZ, Floribeth. Microfiltración tangencial: una alternativa innovadora para la transformación de frutas tropicales. *La alimentación Latinoamericana*. 2004, vol. 232, pp. 38-45. ISSN 0325-0164.
- [36] BALDASSO, C.; BARROS, T. y TESSARO, I. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination*. 2011, vol. 278, pp. 381-386. ISSN 0011-9164.
- [37] PARASHAR, A.; JIN, Y.; MASON, B.; CHAE, M. y BRESSLER, D. Incorporation of whey permeate, a dairy effluent, in ethanol fermentation to provide a zero waste solution for the dairy industry. *Journal of Dairy Science*. 2016, vol. 99, nro. 3. pp. 1859–1867. ISSN 0022-0302.
- [38] SOUZA, Rosane; GIMENES, Marcelino; COSTA, Sílvio y MÜLLER, Carmen. Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteína y lactosa. *Información tecnológica*. 2008, vol. 19, nro. 2. pp. 41-50. ISSN 0718-0764.
- [39] CAMACHO, Margarita. Obtención de un concentrado proteico del suero de la leche de vaca utilizando tecnología de membranas. Trabajo de grado en Ingeniería Agroindustrial. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, 2009. 157 p.
- [40] MURO, Claudia; DÍAZ, Carmen; GARCÍA, Beatriz; ZAVALA, Rosa; ORTEGA, Rosa; ÁLVAREZ, Ricardo y RIERA, Francisco. Recuperación de los componentes del lactosuero residual de una industria elaborada de queso utilizando membranas. *AFINIDAD*. 2010, vol. 67, nro. 547. pp. 212-220. ISSN 0001-9704
- [41] ATRA, Ramadan; VATAI, Gyula; BEKASSY-MOLNAR, Erika y BALINT, Agnes. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein

- and lactose. *Journal of Food Engineering*. 2005, vol. 67, nro. 3. pp. 325-332. ISSN 0260-8774.
- [42] BRANS, G.; SCHROËN, C.; VAN DER SMAN, R. y BOOM, R. Membrane fractionation of milk: state of the art and challenges. *Journal of Membrane Science*. 2004, vol. 243, nro. 1-2, pp. 263–272. ISSN 0376-7388.
- [43] STEINHAUER, Tim; MARX, Melanie; BOGENDÖRFER, Kerstin y KULOZIK, Ulrich. Membrane fouling during ultra- and microfiltration of whey and whey proteins at different environmental conditions: The role of aggregated whey proteins as fouling initiators. *Journal of Membrane Science*. 2015b, vol. 489, pp. 20–27. ISSN 0376-7388.
- [44] CHEN, H. y JEBSON, R. Factors affecting heat transfer in falling film evaporators. *Food and Bioproducts Processing*. 1997, vol 75, nro. 2. pp. 111-116. ISSN 0960-3085.
- [45] LI, Wei; WU, Xiao-Yu; LUO, Zhong y WEBB, Ralph. Falling water film evaporation on newly-designed enhanced tube bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011, vol 54. pp. 2990-2997. ISSN 0017-9310.
- [46] ANAYA, Camilo y BUENO, Paula. Simulación de la evaporación de película descendente al vacío y con gas de arrastre utilizando redes neuronales. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 56 p.
- [47] WESTWAY FEED PRODUCTS, INC. Methods for improving the storage and handling characteristics of condensed whey permeate. Inventor: J. HARRIS y P. MOSTYN. Int. Cl.:A23C 21/00. Fecha de solicitud: 3, marzo, 2006. USA. US 7927641 B2. 19, abril, 2011.
- [48] MURÚA, B.; BERISTAÍN, C. y MARTÍNEZ, F. Preparation of starch derivatives using reactive extrusion and evaluation of modified starches as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *Journal of Food Engineering*. 2009, vol. 91, nro. 3. pp. 380-386. ISSN 0260-8774.

- [49] PARRA, Ricardo. Revisión: Microencapsulación de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 2010, vol. 63, nro. 2. pp. 5669-5684. ISSN 0304-2847.
- [50] ANTURY, John y CUBILLOS, Andrea. Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de maltodextrinas y glucosa producidas a partir de almidón de yuca. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 54 p.
- [51] CEDEÑO, María de los Ángeles. Determinación de la temperatura vítrea de transición en caramelos duros. Trabajo de grado en Ingeniería de Alimentos. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción, 2009. 66 p.
- [52] LOZANO, B. Obtención de microencapsulados funcionales de zumo *Opuntia stricta* mediante secado por atomización. Trabajo de grado en Ingeniería Técnica Industrial. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2009. 69 p.
- [53] GONZÁLEZ, Alejandra. Caracterización de las propiedades funcionales de fructanos de agave para su uso como sustitutos de grasa en alimentos. Trabajo de maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos. Yautepec: Instituto Politécnico Nacional. Departamento de Biotecnología, 2012. 60 p.
- [54] MENDOZA, Fernando. Evaluación de las condiciones de secado por aspersión de un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad Magdalena river (*Mangífera indica*) adicionado con *Bifidobacterium difidum*. Trabajo de maestría en Ciencias Agroalimentarias. Montería: Universidad de Córdoba. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería de Alimentos, 2015. 206 p.
- [55] GUEVARA, Arely; LÓPEZ, Aurelio y JIMÉNEZ, Teresa. Optimización de la encapsulación de *L. casei* y *L. reuteri* con maltodextrina en un secador por atomización. En: Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería (13: 21-26, junio, 2009: Acapulco, Guerrero).

- [56] CORTÉS, Coral. Encapsulación de *Lactobacillus casei* mediante secado por atomización utilizando aguamiel como agente encapsulante. Trabajo de grado en Ingeniería de Alimentos. Puebla de Zaragoza: Universidad de las Américas Puebla. Escuela de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, 2009. 48 p.
- [57] KRAFT JACOBS SUCHARD R & D, INC. Op cit. Procedimiento mejorado para secar un suero lácteo ácido y/o permeado de suero lácteo ácido. Inventor: NASSAUER, J.; FRITSCH, R.; GOTZMANN, A. y DOLLMANN, J. Int. Cl.: A23C 21/10. Fecha de solicitud: 31, marzo, 1994. España. ES 2097001 T3. 16 Marzo 1997.
- [58] STEINHAUER, Tim; SCHWING, Julia; KRAUß, Sandra y KULOZIK, Ulrich. Enhancement of ultrafiltration-performance and improvement of hygienic quality during the production of whey concentrates. *International Dairy Journal*. 2015a, vol. 45, pp. 8-14. ISSN 0958-6946.
- [59] BARUKCIC, Irena, BOZANIC, Rajka y KULOZIK, Ulrich. Influence of process temperature and microfiltration pre-treatment on flux and fouling intensity during cross-flow ultrafiltration of sweet whey using ceramic membranes. *International Dairy Journal*. 2015, vol. 51, pp 1-7. ISSN 0958-6946.
- [60] STEINHAUER, Tim; SCHWING, Julia; KRAUß, Sandra y KULOZIK, Ulrich. Enhancement of ultrafiltration-performance and improvement of hygienic quality during the production of whey concentrates. *International Dairy Journal*. 2015a, vol. 45, pp. 8-14. ISSN 0958-6946.
- [61] BARUKCIC, Irena; BOZANIC, Rajka y KULOZIK, Ulrich. Effect of pore size and process temperature on flux, microbial reduction and fouling mechanisms during sweet whey cross-flow microfiltration by ceramic membranes. *International Dairy Journal*. 2014, vol. 39, pp. 8-15. ISSN 0958-6946.
- [62] BALDASSO, C.; BARROS, T. y TESSARO, I. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination*. 2011, vol. 278, pp. 381-386. ISSN 0011-9164.

- [63] ATRA, Ramadan; VATAI, Gyula; BEKASSY-MOLNAR, Erika y BALINT, Agnes. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of Food Engineering*. 2005, vol. 67, nro. 3. pp. 325-332. ISSN 0260-8774.
- [64] STEINHAEUER, Tim; SCHWING, Julia; KRAUß, Sandra y KULOZIK, Ulrich. Enhancement of ultrafiltration-performance and improvement of hygienic quality during the production of whey concentrates. *International Dairy Journal*. 2015a, vol. 45, pp. 8-14. ISSN 0958-6946.
- [65] MUÑOZ, Carlos y SOLANO, Richard. Construcción e implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 44 p.
- [66] ANAYA, Camilo y BUENO, Paula. Simulación de la evaporación de película descendente al vacío y con gas de arrastre utilizando redes neuronales. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 56 p.
- [67] KRAFT JACOBS SUCHARD R & D, INC. Procedimiento mejorado para secar un suero lácteo ácido y/o permeado de suero lácteo ácido. Inventor: NASSAUER, J.; FRITSCH, R.; GOTZMANN, A. y DOLLMANN, J. Int. Cl.: A23C 21/10. Fecha de solicitud: 31, marzo, 1994. España. ES 2097001 T3. 16 Marzo 1997.
- [68] MENDOZA, Fernando. Evaluación de las condiciones de secado por aspersión de un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad Magdalena river (*Mangífera indica*) adicionado con *Bifidobacterium difidum*. Trabajo de maestría en Ciencias Agroalimentarias. Montería: Universidad de Córdoba. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería de Alimentos, 2015. 206 p.

- [69] ANTURY, John y CUBILLOS, Andrea. Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de maltodextrinas y glucosa producidas a partir de almidón de yuca. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 54 p.
- [70] ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 990.19: 2005 Solids (Total) in Milk. By Forced Air Oven Drying after Steam Table Predry
- [71] ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 991.20: 2005, Nitrogen (Total) in Milk. Kjeldahl Methods.
- [72] ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 923.03: 2005, Ash (Total) in Foods.
- [73] ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 2000.18: 2005, Fat Content of Raw and Pasteurized Whole Milk. Gerber Method by Weight.
- [74] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Industria Agrícola. Alimentos para animales. Fuentes de calcio y fósforo. NTC 479. Bogotá D.C: El Instituto, 2005, 12 p.
- [75] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Determinación del contenido de fósforo por método espectrofotómetro. Alimentos para animales. NTC 4981. Bogotá D.C: El Instituto, 2001, 12 p.
- [76] ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 16.023: 1984, Titratable acidity in Milk.
- [77] RODRÍGUEZ, Sonia y SANDOVAL, Julie. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis de jarabes del almidón de yuca: etapas de preconcentración y concentración. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2011. 42 p.

- [78] ANTURY, John y CUBILLOS, Andrea. Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de maltodextrinas y glucosa producidas a partir de almidón de yuca. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 54 p.
- [79] DÍAZ, Gloria y RAMOS, Dietmar. Estudio del proceso de producción en continuo de hidrolizados de almidón de yuca integrando hidrólisis enzimática y clarificación con tecnología de membranas. Tesis de pregrado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 50 p.
- [80] ACEVEDO, María Victoria y PARRA, Carlos. Estudio del proceso de clarificación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando membranas cerámicas. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 51p.
- [81] MONROY, Rafael. Valorización de residuos de sangre de bovino mediante hidrólisis enzimática integrando procesos con membranas. Trabajo de maestría en Química Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2013. 58 p.
- [82] ACOSTA, Julieth y RÍOS, Silvia. Aplicación de las técnicas con membranas de microfiltración y ultrafiltración para la clarificación y fraccionamiento de sangre de bovino cruda e hidrolizada. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 49 p.
- [83] GONZÁLEZ, Juan Carlos y MOLINA, Gustavo. Evaluación de la concentración de leche fresca por filtración con membranas como estrategia para el mejoramiento en el esquema de producción de quesos hilados. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 46 p.

- [84] DÍAZ, Gloria y RAMOS, Dietmar. Estudio del proceso de producción en continuo de hidrolizados de almidón de yuca integrando hidrólisis enzimática y clarificación con tecnología de membranas. Tesis de pregrado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 50 p.
- [85] GONZÁLEZ, Juan Carlos y MOLINA, Gustavo. Evaluación de la concentración de leche fresca por filtración con membranas como estrategia para el mejoramiento en el esquema de producción de quesos hilados. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 46 p.
- [86] MUÑOZ, Carlos y SOLANO, Richard. Construcción e implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 44 p.
- [87] ANTURY, John y CUBILLOS, Andrea. Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de maltodextrinas y glucosa producidas a partir de almidón de yuca. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 54 p.
- [88] SOUZA, Rosane; GIMENES, Marcelino; COSTA, Sílvio y MÜLLER, Carmen. Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteína y lactosa. *Información tecnológica*. 2008, vol. 19, nro. 2. pp. 41-50. ISSN 0718-0764.
- [89] GÖSTA, Bylund. Manual de Industrias lácteas. Traducido por Antonio López Gómez y Antonio Madrid Vicente. 3<sup>ra</sup> ed. España: Ediciones Mundi-Prensa, 2002. 436 p. ISBN: 978-84-89922-81-5.
- [90] SOUZA, Rosane; GIMENES, Marcelino; COSTA, Sílvio y MÜLLER, Carmen. Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteína y

- lactosa. *Información tecnológica*. 2008, vol. 19, nro. 2. pp. 41-50. ISSN 0718-0764.
- [91] GÖSTA, Bylund. Manual de Industrias lácteas. Traducido por Antonio López Gómez y Antonio Madrid Vicente. 3<sup>ra</sup> ed. España: Ediciones Mundi-Prensa, 2002. 436 p. ISBN: 978-84-89922-81-5.
- [92] SOUZA, Rosane; GIMENES, Marcelino; COSTA, Sílvio y MÜLLER, Carmen. Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteína y lactosa. *Información tecnológica*. 2008, vol. 19, nro. 2. pp. 41-50. ISSN 0718-0764.
- [93] GÖSTA, Bylund. Manual de Industrias lácteas. Traducido por Antonio López Gómez y Antonio Madrid Vicente. 3<sup>ra</sup> ed. España: Ediciones Mundi-Prensa, 2002. 436 p. ISBN: 978-84-89922-81-5.
- [94] GOULAS, Athanasios y GRANDISON, Alistair. *Applications of Membrane Separation*. En: BRITZ, T. y ROBINSON, R., ed. *Advanced Dairy Science and Technology*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008, pp 312. ISBN 9780470697634.
- [95] LABBE, J.; QUEMERIAS, A.; MICHEL, F. y DAUFIN, G. Fouling of inorganic membranes during whey ultrafiltration: analytical methodology. *Journal of Membrane Science*. 1990, vol. 51, nro 3. pp. 293-307. ISSN 0376-7388.
- [96] D'SOUZA, N. y MAWSON, A. Membrane Cleaning in the Dairy Industry: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2005, vol. 45, nro. 2. pp. 125-134. ISSN 1040-8398.
- [97] ACOSTA, Julieth y RÍOS, Silvia. Aplicación de las técnicas con membranas de microfiltración y ultrafiltración para la clarificación y fraccionamiento de sangre de bovino cruda e hidrolizada. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 49 p.
- [98] DÍAZ, Gloria y RAMOS, Dietmar. Estudio del proceso de producción en continuo de hidrolizados de almidón de yuca integrando hidrólisis enzimática y clarificación con tecnología de membranas. Tesis de pregrado en Ingeniería

- Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 50 p.
- [99] PRIETO, Isabel; CARRILLO, Isabel y RODRÍGUEZ, Manuel. Ensayos preliminares de microfiltración directa para potabilización de aguas superficiales en la Sabana de Bogotá. *Revista de Ingeniería*. 2005, nro. 22. pp. 133-141. ISSN 0121-4993.
- [100] SOUZA, Rosane; GIMENES, Marcelino; COSTA, Sílvio y MÜLLER, Carmen. Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteína y lactosa. *Información tecnológica*. 2008, vol. 19, nro. 2. pp. 41-50. ISSN 0718-0764.
- [101] SOUZA, Rosane; GIMENES, Marcelino; COSTA, Sílvio y MÜLLER, Carmen. Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteína y lactosa. *Información tecnológica*. 2008, vol. 19, nro. 2. pp. 41-50. ISSN 0718-0764.
- [102] ATRA, Ramadan; VATAI, Gyula; BEKASSY-MOLNAR, Erika y BALINT, Agnes. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of Food Engineering*. 2005, vol. 67, nro. 3. pp. 325-332. ISSN 0260-8774.
- [103] CAMACHO, Margarita. Obtención de un concentrado proteico del suero de la leche de vaca utilizando tecnología de membranas. Trabajo de grado en Ingeniería Agroindustrial. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, 2009. 157 p.
- [104] STEINHAEUER, Tim; HÁNELY, Sabrina; BOGENDÖRFER, Kerstin y KULOZIK, Ulrich. Temperature dependent membrane fouling during filtration of whey and whey proteins. *Journal of Membrane Science*. 2015c, vol. 492, pp. 364-370. ISSN 0376-7388.
- [105] GONZÁLEZ, Juan Carlos y MOLINA, Gustavo. Evaluación de la concentración de leche fresca por filtración con membranas como estrategia para el mejoramiento en el esquema de producción de quesos hilados. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de

Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 46 p.

- [106] BARUKCIC, Irena; BOZANIC, Rajka y KULOZIK, Ulrich. Effect of pore size and process temperature on flux, microbial reduction and fouling mechanisms during sweet whey cross-flow microfiltration by ceramic membranes. *International Dairy Journal*. 2014, vol. 39, pp. 8-15. ISSN 0958-6946.
- [107] STEINHAUER, Tim; HÁNELY, Sabrina; BOGENDÖRFER, Kerstin y KULOZIK, Ulrich. Temperature dependent membrane fouling during filtration of whey and whey proteins. *Journal of Membrane Science*. 2015c, vol. 492, pp. 364-370. ISSN 0376-7388.
- [108] ALMÉCIJA, Carmen; IBÁÑEZ, Rubén; GUADIX, Antonio y GUADIX, Emilia. Effect of pH on the fractionation of whey proteins with a ceramic ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science*. 2007, vol. 288, nro. 1-2. pp. 28-35. ISSN 0376-7388.
- [109] ALMÉCIJA, Carmen; IBÁÑEZ, Rubén; GUADIX, Antonio y GUADIX, Emilia. Effect of pH on the fractionation of whey proteins with a ceramic ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science*. 2007, vol. 288, nro. 1-2. pp. 28-35. ISSN 0376-7388.
- [110] MURO, Claudia; DÍAZ, Carmen; GARCÍA, Beatriz; ZAVALA, Rosa; ORTEGA, Rosa; ÁLVAREZ, Ricardo y RIERA, Francisco. Recuperación de los componentes del lactosuero residual de una industria elaborada de queso utilizando membranas. *AFINIDAD*. 2010, vol. 67, nro. 547. pp. 212-220. ISSN 0001-9704.
- [111] CAMACHO, Margarita. Obtención de un concentrado proteico del suero de la leche de vaca utilizando tecnología de membranas. Trabajo de grado en Ingeniería Agroindustrial. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, 2009. 157 p.
- [112] STEINHAUER, Tim; HÁNELY, Sabrina; BOGENDÖRFER, Kerstin y KULOZIK, Ulrich. Temperature dependent membrane fouling during filtration of

- whey and whey proteins. *Journal of Membrane Science*. 2015c, vol. 492, pp. 364-370. ISSN 0376-7388.
- [113] FARRELL, H.; JIMÉNEZ, R.; BLECK, G.; BROWN, E.; BUTLER, J.; CREAMER, L.; HICKS, C.; HOLLAR, C.; NG-KWAI-HANG, K. y SWAISGOOD, H. Nomenclature of the proteins of cows' milk—sixth revision, *Journal Dairy Science*. 2004, vol. 87, nro. 6. pp. 1641–1674. ISSN 0022-0302.
- [114] ALMÉCIJA, Carmen; IBÁÑEZ, Rubén; GUADIX, Antonio y GUADIX, Emilia. Effect of pH on the fractionation of whey proteins with a ceramic ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science*. 2007, vol. 288, nro. 1-2. pp. 28-35. ISSN 0376-7388.
- [115] STEINHAEUER, Tim; SCHWING, Julia; KRAUß, Sandra y KULOZIK, Ulrich. Enhancement of ultrafiltration-performance and improvement of hygienic quality during the production of whey concentrates. *International Dairy Journal*. 2015a, vol. 45, pp. 8-14. ISSN 0958-6946.
- [116] STEINHAEUER, Tim; MARX, Melanie; BOGENDÖRFER, Kerstin y KULOZIK, Ulrich. Membrane fouling during ultra- and microfiltration of whey and whey proteins at different environmental conditions: The role of aggregated whey proteins as fouling initiators. *Journal of Membrane Science*. 2015b, vol. 489, pp. 20–27. ISSN 0376-7388.
- [117] MURO, Claudia; DÍAZ, Carmen; GARCÍA, Beatriz; ZAVALA, Rosa; ORTEGA, Rosa; ÁLVAREZ, Ricardo y RIERA, Francisco. Recuperación de los componentes del lactosuero residual de una industria elaboradora de queso utilizando membranas. *AFINIDAD*. 2010, vol. 67, nro. 547. pp. 212-220. ISSN 0001-9704.
- [118] MURO, Claudia; DÍAZ, Carmen; GARCÍA, Beatriz; ZAVALA, Rosa; ORTEGA, Rosa; ÁLVAREZ, Ricardo y RIERA, Francisco. Recuperación de los componentes del lactosuero residual de una industria elaboradora de queso utilizando membranas. *AFINIDAD*. 2010, vol. 67, nro. 547. pp. 212-220. ISSN 0001-9704.

- [119] GONZÁLEZ, Juan Carlos y MOLINA, Gustavo. Evaluación de la concentración de leche fresca por filtración con membranas como estrategia para el mejoramiento en el esquema de producción de quesos hilados. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 46 p.
- [120] ATRA, Ramadan; VATAI, Gyula; BEKASSY-MOLNAR, Erika y BALINT, Agnes. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of Food Engineering*. 2005, vol. 67, nro. 3. pp. 325-332. ISSN 0260-8774.
- [121] BALDASSO, C.; BARROS, T. y TESSARO, I. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination*. 2011, vol. 278, pp. 381-386. ISSN 0011-9164.
- [122] ATRA, Ramadan; VATAI, Gyula; BEKASSY-MOLNAR, Erika y BALINT, Agnes. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of Food Engineering*. 2005, vol. 67, nro. 3. pp. 325-332. ISSN 0260-8774.
- [123] STEINHAEUER, Tim; SCHWING, Julia; KRAUß, Sandra y KULOZIK, Ulrich. Enhancement of ultrafiltration-performance and improvement of hygienic quality during the production of whey concentrates. *International Dairy Journal*. 2015a, vol. 45, pp. 8-14. ISSN 0958-6946.
- [124] ATRA, Ramadan; VATAI, Gyula; BEKASSY-MOLNAR, Erika y BALINT, Agnes. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of Food Engineering*. 2005, vol. 67, nro. 3. pp. 325-332. ISSN 0260-8774.
- [125] NICORESCU, I.; LOISEL, C.; RIAUBLANC, A.; VIAL, C.; DJELVEH, G.; CUVÉLIER, G. y LEGRAND, J. Effect of dynamic heat treatment on the physical properties of whey protein foams. *Food Hydrocolloids*. 2009, vol. 23, nro. 4. pp. 1209-1219. ISSN 0268-005X.

- [126] HUI, Y. Dairy Science & Technology Handbook. New York: Wiley, 1993. 442 p. ISBN 0470127082.
- [127] ÁLVAREZ, María Clara. Caracterización fisicoquímica de los diferentes tipos de lactosueros producidos en la Cooperativa Colanta LTDA. Trabajo de grado en Ingeniería de Alimentos. Caldas: Corporación Universitaria Lasallista. Facultad de Ingeniería. Ingeniería de Alimentos, 2013. 42 p.
- [128] PARRIS, Nicholas; PURCELL, James y PTASHKIN, Steven. Thermal denaturation of whey proteins in skim milk. *Journal of Agricultural and Food Science*. 1991, vol. 39, nro. 12. pp. 2167-2170. ISSN 1520-5118.
- [129] RODRÍGUEZ, Sonia y SANDOVAL, Julie. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis de jarabes del almidón de yuca: etapas de preconcentración y concentración. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2011. 42 p.
- [130] ANAYA, Camilo y BUENO, Paula. Simulación de la evaporación de película descendente al vacío y con gas de arrastre utilizando redes neuronales. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 56 p.
- [131] RODRÍGUEZ, Sonia y SANDOVAL, Julie. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis de jarabes del almidón de yuca: etapas de preconcentración y concentración. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2011. 42 p.
- [132] HARRIS, Daniel. Análisis Químico Cuantitativo. 6<sup>a</sup> ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2007. 924 p. ISBN 8429172246
- [133] RODRÍGUEZ, Sonia y SANDOVAL, Julie. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis de jarabes del almidón de yuca: etapas de preconcentración y concentración. Trabajo de grado en Ingeniería Química.

- Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2011. 42 p.
- [134] LUQUET, Maurice. Leche y productos lácteos transformación y tecnología. Zaragoza: Editorial ACRIBIA S.A., 1993. 540 p. ISBN 8420007412.
- [135] ANTURY, John y CUBILLOS, Andrea. Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de maltodextrinas y glucosa producidas a partir de almidón de yuca. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 54 p.
- [136] ANTURY, John y CUBILLOS, Andrea. Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de maltodextrinas y glucosa producidas a partir de almidón de yuca. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 54 p.
- [137] LOPERA, Seneida; GUZMÁN, Cielo; CATAÑO, Carlos y GALLARDO, Cecilia. Desarrollo y caracterización de micropartículas de ácido fólico formadas por secado por aspersion, utilizando goma arábica y maltodextrina como materiales de pared. *Vitae*. 2009, vol. 16, nro. 1. pp. 55-65. ISSN 0121-4004.
- [138] GABAS, A.; TELIS, V.; SOBRAL, P. y TELIS-ROMERO, J. Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *Journal of Food Engineering*. 2007, vol. 82, nro. 2. pp. 246-252. ISSN 0260-8774.
- [139] COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. Decreto 2229 (12, abril, 1994). Por el cual se dictan normas referentes a la composición, requisitos y comercialización de las bebidas Hidratantes-Energéticas para Deportistas. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1994. 4 p.
- [140] BURRINGTON, Kimberlee. Food Applications for Whey Permeate. *DAIRY PIPELINE*. 2005, vol. 17, nro. 2. pp 1-5.

- [141] URRIBARRÍ, Lauris; VIELMA, Alex; PÁEZ, Gisela; FERRER, José; MÁRMOL, Zulay y RAMONES, Eduardo. Producción de ácido láctico a partir de suero de leche, utilizando *Lactobacillus helveticus* en cultivo continuo. *Revista Científica*. 2004, vol. 14, nro. 4. pp. 297-302. ISSN 0798-2259.
- [142] ARAUJO, Karelen; ROMERO, Alejandra; CHIRINOS, Patricia; PÁEZ, Gisela; MÁRMOL, Zulay y RINCÓN, Marisela. Producción de etanol a partir de suero de leche en cultivo por lote alimentado con ciclos repetidos. *Interciencia*. 2015, vol. 40, nro. 5. pp. 305-310. ISSN 0378-1844.

## BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, María Victoria y PARRA, Carlos. Estudio del proceso de clarificación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando membranas cerámicas. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 51p.

ACOSTA, Julieth y RÍOS, Silvia. Aplicación de las técnicas con membranas de microfiltración y ultrafiltración para la clarificación y fraccionamiento de sangre de bovino cruda e hidrolizada. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 49 p.

AKHTAR, Mahmood y DICKINSON, Eric. Whey protein-maltodextrin conjugates as emulsifying agents: An alternative to gum arabic. *Journal Food Hydrocolloids*. 2007, vol. 21, nro. 4. pp. 607-616. ISSN 0268-005X.

ALMÉCIJA, Carmen; IBÁÑEZ, Rubén; GUADIX, Antonio y GUADIX, Emilia. Effect of pH on the fractionation of whey proteins with a ceramic ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science*. 2007, vol. 288, nro. 1-2. pp. 28-35. ISSN 0376-7388.

ÁLVAREZ, María Clara. Caracterización físicoquímica de los diferentes tipos de lactosueros producidos en la Cooperativa Colanta LTDA. Trabajo de grado en Ingeniería de Alimentos. Caldas: Corporación Universitaria Lasallista. Facultad de Ingeniería. Ingeniería de Alimentos, 2013. 42 p.

ANAYA, Camilo y BUENO, Paula. Simulación de la evaporación de película descendente al vacío y con gas de arrastre utilizando redes neuronales. Trabajo

de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 56 p.

ANTURY, John y CUBILLOS, Andrea. Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de maltodextrinas y glucosa producidas a partir de almidón de yuca. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 54 p.

ARAUJO, Karelen; ROMERO, Alejandra; CHIRINOS, Patricia; PÁEZ, Gisela; MÁRMOL, Zulay y RINCÓN, Marisela. Producción de etanol a partir de suero de leche en cultivo por lote alimentado con ciclos repetidos. *Interciencia*. 2015, vol. 40, nro. 5. pp. 305-310. ISSN 0378-1844.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 923.03: 2005, Ash (Total) in Foods.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 2000.18: 2005, Fat Content of Raw and Pasteurized Whole Milk. Gerber Method by Weight.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 991.20: 2005, Nitrogen (Total) in Milk. Kjeldahl Methods.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 990.19: 2005 Solids (Total) in Milk. By Forced Air Oven Drying after Steam Table Predry

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST (A.O.A.C). Official Method 16.023: 1984, Titratable acidity in Milk.

ATRA, Ramadan; VATAI, Gyula; BEKASSY-MOLNAR, Erika y BALINT, Agnes. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of Food Engineering*. 2005, vol. 67, nro. 3. pp. 325-332. ISSN 0260-8774.

BALDASSO, C.; BARROS, T. y TESSARO, I. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination*. 2011, vol. 278, pp. 381-386. ISSN 0011-9164.

BARUKCIC, Irena; BOZANIC, Rajka y KULOZIK, Ulrich. Effect of pore size and process temperature on flux, microbial reduction and fouling mechanisms during sweet whey cross-flow microfiltration by ceramic membranes. *International Dairy Journal*. 2014, vol. 39, pp. 8-15. ISSN 0958-6946.

BARUKCIC, Irena, BOZANIC, Rajka y KULOZIK, Ulrich. Influence of process temperature and microfiltration pre-treatment on flux and fouling intensity during cross-flow ultrafiltration of sweet whey using ceramic membranes. *International Dairy Journal*. 2015, vol. 51, pp 1-7. ISSN 0958-6946.

BENITO, J.; CONESA, A. y RODRÍGUEZ, M. Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. 2004, vol. 43, nro. 5. pp 829-842.

BRANS, G.; SCHROËN, C.; VAN DER SMAN, R. y BOOM, R. Membrane fractionation of milk: state of the art and challenges. *Journal of Membrane Science*. 2004, vol. 243, nro. 1-2, pp. 263–272. ISSN 0376-7388.

BURRINGTON, Kimberlee. Food Applications for Whey Permeate. *DAIRY PIPELINE*. 2005, vol. 17, nro. 2. pp 1-5.

CAMACHO, Margarita. Obtención de un concentrado proteico del suero de la leche de vaca utilizando tecnología de membranas. Trabajo de grado en Ingeniería Agroindustrial. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, 2009. 157 p.

CEDEÑO, María de los Ángeles. Determinación de la temperatura vítreo de transición en caramelos duros. Trabajo de grado en Ingeniería de Alimentos. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción, 2009. 66 p.

CHEN, H. y JEBSON, R. Factors affecting heat transfer in falling film evaporators. *Food and Bioproducts Processing*. 1997, vol 75, nro. 2. pp. 111-116. ISSN 0960-3085.

COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. Decreto 2229 (12, abril, 1994). Por el cual se dictan normas referentes a la composición, requisitos y comercialización de las bebidas Hidratantes-Energéticas para Deportistas. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1994. 4 p.

CORTÉS, Coral. Encapsulación de *Lactobacillus casei* mediante secado por atomización utilizando aguamiel como agente encapsulante. Trabajo de grado en Ingeniería de Alimentos. Puebla de Zaragoza: Universidad de las Américas Puebla. Escuela de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, 2009. 48 p.

DAUFIN, G.; ESCUDIER, J.; CARRÈRE, H.; BÉROT, S; FILLAUDEAU, L. y DECLoux, M. Recent and emerging applications of membrane processes in the

food and dairy industry. *Food and Bioproducts Processing*. 2001, vol. 79, nro. 2. pp. 89-102. ISSN 0960-3085.

DÍAZ, Gloria y RAMOS, Dietmar. Estudio del proceso de producción en continuo de hidrolizados de almidón de yuca integrando hidrólisis enzimática y clarificación con tecnología de membranas. Tesis de pregrado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 50 p.

D'SOUZA, N. y MAWSON, A. Membrane Cleaning in the Dairy Industry: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2005, vol. 45, nro. 2. pp. 125-134. ISSN 1040-8398.

DUARTE, Sonia y RAVENTÓS, Mercè. Tecnología de membranas. Universidad Politécnica de Catalunya [en línea]. 2005, [consultado: 25 abril 2016] Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211616/Articulos/Materialex tendido/11 Tecnologiademembranas.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211616/Articulos/Materialex%20tendido/11%20Tecnologiademembranas.pdf)

DURÁN, Victoria. Producción de biobutanol a partir de suero de quesería usando una cepa mutante de *Clostridium acetobutylicum*. Tesis de doctorado en Ciencias Biológicas. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes. Centro de Ciencias Básicas. Departamento de Ingeniería Bioquímica, 2015. 216 p.

FARRELL, H.; JIMÉNEZ, R.; BLECK, G.; BROWN, E.; BUTLER, J.; CREAMER, L.; HICKS, C.; HOLLAR, C.; NG-KWAI-HANG, K. y SWAISGOOD, H. Nomenclature of the proteins of cows' milk—sixth revision, *Journal Dairy Science*. 2004, vol. 87, nro. 6. pp. 1641–1674. ISSN 0022-0302.

FEDNA - Fundación Española para el Desarrollo de Nutrición Animal. [Sitio web]. Ingredientes para piensos: Lactosuero ácido. 2010. Disponible en: [http://www.fundacionfedna.org/ingredientes\\_para\\_piensos/lactosuero%C3%A1cido](http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/lactosuero%C3%A1cido)

FOEGEDING, Allen; DAVIS, Jack; DOUCET, Dany y MCGUFFEY, Matthew. Advances in modifying and understanding whey protein functionality. *Food Science and Technology*. 2002, vol. 13, pp. 151-159. ISSN 0924- 2244.

GABAS, A.; TELIS, V.; SOBRAL, P. y TELIS-ROMERO, J. Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *Journal of Food Engineering*. 2007, vol. 82, nro. 2. pp. 246-252. ISSN 0260-8774.

GHALY, Abdel y KAMAL, M. Submerged yeast fermentation of acid cheese whey for protein production and pollution potential reduction. *Water Research*. 2004, vol. 38, nro. 3. pp. 631-644. ISSN 0043-1354.

GOFF, Douglas. Hardware Design. En: The Dairy Science and Technology Education Series [en línea]. Canadá: University of Guelph, 2005. Última actualización: 16 abril 2014. [Fecha de consulta: 26 abril 2016]. Disponible en: <https://www.uoguelph.ca/foodscience/book-page/hardware-design>

GONZÁLEZ, Alejandra. Caracterización de las propiedades funcionales de fructanos de agave para su uso como sustitutos de grasa en alimentos. Trabajo de maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos. Yautepec: Instituto Politécnico Nacional. Departamento de Biotecnología, 2012. 60 p.

GONZÁLEZ, Juan Carlos y MOLINA, Gustavo. Evaluación de la concentración de leche fresca por filtración con membranas como estrategia para el mejoramiento en el esquema de producción de quesos hilados. Trabajo de grado en Ingeniería

Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 46 p.

GÖSTA, Bylund. Manual de Industrias lácteas. Traducido por Antonio López Gómez y Antonio Madrid Vicente. 3<sup>ra</sup> ed. España: Ediciones Mundi-Prensa, 2002. 436 p. ISBN: 978-84-89922-81-5.

GOULAS, Athanasios y GRANDISON, Alistair. *Applications of Membrane Separation*. En: BRITZ, T. y ROBINSON, R., ed. *Advanced Dairy Science and Technology*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008, pp 312. ISBN 9780470697634.

GUERRERO, Windy; CASTILLA, Patricia; CÁRDENAS, Karen; GÓMEZ, Carlos y CASTRO, Javier. Degradación anaerobia de dos tipos de lactosuero en reactores UASB. *Tecnología Química*. 2012, vol. 32, nro 1. pp. 99-106. ISSN 2224-6185.

GUEVARA, Arely; LÓPEZ, Aurelio y JIMÉNEZ, Teresa. Optimización de la encapsulación de *L. casei* y *L. reuteri* con maltodextrina en un secador por atomización. En: Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería (13: 21-26, junio, 2009: Acapulco, Guerrero).

GUTIÉRREZ, Himar. Obtención de derivados lácteos por ultrafiltración. *Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos*. 2013, vol. 440, pp. 51-54. ISSN 0300-5755.

HARRIS, Daniel. Análisis Químico Cuantitativo. 6<sup>a</sup> ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2007. 924 p. ISBN 8429172246

HUI, Y. Dairy Science & Technology Handbook. New York: Wiley, 1993. 442 p. ISBN 0470127082.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Determinación del contenido de fósforo por método espectrofotómetro. Alimentos para animales. NTC 4981. Bogotá D.C: El Instituto, 2001, 12 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Industria Agrícola. Alimentos para animales. Fuentes de calcio y fósforo. NTC 479. Bogotá D.C: El Instituto, 2005, 12 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 6166. Bogotá D.C: El Instituto, 2016, 60 p.

JELEN, P. Whey processing. Utilization and Products. En: ROGINSKI, H. FUQUAY, J. and FOX, P., eds. Encyclopedia of Dairy Sciences. London: Academic Press, 2003. pp. 2739-2745.

JIANGSU JIUWU HITECH CO., LTDA. [sitio web]. Nanjing: HITECH, The Filtration and Separation Portal. 2007. [Consulta: 12 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.filtraguide.com/en/379/ext/104730/jiangsu\\_jiuwu\\_hitech\\_co\\_ltd/](http://www.filtraguide.com/en/379/ext/104730/jiangsu_jiuwu_hitech_co_ltd/)

KRAFT JACOBS SUCHARD R & D, INC. Procedimiento mejorado para secar un suero lácteo ácido y/o permeado de suero lácteo ácido. Inventor: NASSAUER, J.; FRITSCH, R.; GOTZMANN, A. y DOLLMANN, J. Int. Cl.: A23C 21/10. Fecha de solicitud: 31, marzo, 1994. España. ES 2097001 T3. 16 Marzo 1997.

KRECZMANN, Braulio; ALONSO, Alba; LILOIA, Matías; ZAMBONI, Enzo; CERUTTI, Raul; BARONI, Dante y POLUJÁN, Dianela. Procesamiento del

lactosuero: elaboración de lactosa y aprovechamiento de proteínas. *Tecnología Láctea Latinoamericana*. 2015, vol. 87, pp. 44-49. ISSN 0328-4158

LABBE, J.; QUEMERIAS, A.; MICHEL, F. y DAUFIN, G. Fouling of inorganic membranes during whey ultrafiltration: analytical methodology. *Journal of Membrane Science*. 1990, vol. 51, nro 3. pp. 293-307. ISSN 0376-7388.

LI, Wei; WU, Xiao-Yu; LUO, Zhong y WEBB, Ralph. Falling water film evaporation on newly-designed enhanced tube bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011, vol 54. pp. 2990-2997. ISSN 0017-9310.

LIU, Xia; CHUNG, Yoon-Kyung; YANG, Shang-Tian y YOUSEF, Ahmed. Continuous nisin production in laboratory media and whey permeate by immobilized *Lactococcus lactis*. *Journal Process Biochemistry*. 2005, vol 40, pp. 13-24. ISSN 1359-5113.

LONDOÑO, Margarita; SEPÚLVEDA, José; HERNÁNDEZ, Aldo y PARRA, Jaime. Bebida fermentada de suero de queso fresco inoculada con *Lactobacillus casei*. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín*. 2008, vol. 61, nro. 1. pp. 4409-4421. ISSN 0304-2847.

LOPERA, Seneida; GUZMÁN, Cielo; CATAÑO, Carlos y GALLARDO, Cecilia. Desarrollo y caracterización de micropartículas de ácido fólico formadas por secado por aspersión, utilizando goma arábica y maltodextrina como materiales de pared. *Vitae*. 2009, vol. 16, nro. 1. pp. 55-65. ISSN 0121-4004.

LOZANO, B. Obtención de microencapsulados funcionales de zumo *Opuntia stricta* mediante secado por atomización. Trabajo de grado en Ingeniería Técnica Industrial. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2009. 69 p.

LUQUET, Maurice. Leche y productos lácteos transformación y tecnología. Zaragoza: Editorial ACRIBIA S.A., 1993. 540 p. ISBN 8420007412.

MADRID, Antonio. Curso de Industrias Lácteas. España: Mundi-Prensa Libros S.A., 1996. 600p. ISBN 8487440827.

MENDOZA, Fernando. Evaluación de las condiciones de secado por aspersion de un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad Magdalena river (*Mangifera indica*) adicionado con *Bifidobacterium difidum*. Trabajo de maestría en Ciencias Agroalimentarias. Montería: Universidad de Córdoba. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería de Alimentos, 2015. 206 p.

MONROY, Rafael. Valorización de residuos de sangre de bovino mediante hidrólisis enzimática integrando procesos con membranas. Trabajo de maestría en Química Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2013. 58 p.

MUJUMDAR, Arun; HUANG, Li-Xin y DONG CHEN, Xiao. An overview of the recent advances in spray-drying. *Dairy Science Technology*. 2010, vol. 90, nro. 2-3. pp. 211-224. ISSN 1958-5594. ISSN 0958-6946.

MUKHOPADHYAY, R.; CHATTERJEE, S.; CHATTERJEE, B.; BANERJEE, P. y GUHA, A. Production of gluconic acid from whey by free and immobilized *Aspergillus niger*. *International Dairy Journal*. 2005, vol. 15, nro. 3. pp. 299-303.

MULDER, Marcel. Basic principles of membrane technology. 2<sup>a</sup> ed. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 1996. 564 p. ISBN 0-7923-4247-X.

MUÑOZ, Carlos y SOLANO, Richard. Construcción e implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 44 p.

MURO, Claudia; DÍAZ, Carmen; GARCÍA, Beatriz; ZAVALA, Rosa; ORTEGA, Rosa; ÁLVAREZ, Ricardo y RIERA, Francisco. Recuperación de los componentes del lactosuero residual de una industria elaborada de queso utilizando membranas. *AFINIDAD*. 2010, vol. 67, nro. 547. pp. 212-220. ISSN 0001-9704.

MURÚA, B.; BERISTAÍN, C. y MARTÍNEZ, F. Preparation of starch derivates using reactive extrusion and evaluation of modified starches as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *Journal of Food Engineering*. 2009, vol. 91, nro. 3. pp. 380-386. ISSN 0260-8774.

NICORESCU, I.; LOISEL, C.; RIAUBLANC, A.; VIAL, C.; DJELVEH, G.; CUVELIER, G. y LEGRAND, J. Effect of dynamic heat treatment on the physical properties of whey protein foams. *Food Hydrocolloids*. 2009, vol. 23, nro. 4. pp. 1209-1219. ISSN 0268-005X.

PARASHAR, A.; JIN, Y.; MASON, B.; CHAE, M. y BRESSLER, D. Incorporation of whey permeate, a dairy effluent, in ethanol fermentation to provide a zero waste solution for the dairy industry. *Journal of Dairy Science*. 2016, vol. 99, nro. 3. pp. 1859–1867. ISSN 0022-0302.

PARRA, Ricardo. Revisión: Microencapsulación de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 2010, vol. 63, nro. 2. pp. 5669-5684. ISSN 0304-2847.

PARRIS, Nicholas; PURCELL, James y PTASHKIN, Steven. Thermal denaturation of whey proteins in skim milk. *Journal of Agricultural and Food Science*. 1991, vol. 39, nro. 12. pp. 2167-2170. ISSN 1520-5118.

PRIETO, Isabel; CARRILLO, Isabel y RODRÍGUEZ, Manuel. Ensayos preliminares de microfiltración directa para potabilización de aguas superficiales en la Sabana de Bogotá. *Revista de Ingeniería*. 2005, nro. 22. pp. 133-141. ISSN 0121-4993.

RODRÍGUEZ, Sonia y SANDOVAL, Julie. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis de jarabes del almidón de yuca: etapas de preconcentración y concentración. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2011. 42 p.

SÁNCHEZ, Óscar; ORTÍZ, María y BETANCOURT, Adriana. Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus spp.* *Revista Colombiana de Biotecnología*. 2004, vol. 6, nro. 1. pp. 43-54. ISSN 1909-8758.

SANTAMARÍA, Mercé. *Indústria alimentària, tecnologies emergents*. 1<sup>a</sup> edición. Barcelona: Ediciones UPC, 2003. 208 p. ISBN 978-84-8301-561-2.

SIMANCA, Monica; ARTEAGA, Margarita; PÉREZ, Yulieth; SOTO, María y SALCEDO, Jairo. Caracterización y estudio de la fermentación espontánea del suero costeño producido en Montería. *Revista MVZ Córdoba*. 2010, vol. 15, nro. 1. pp. 1944-1953. ISSN 0122-0268.

SOUZA, Rosane; GIMENES, Marcelino; COSTA, Sílvio y MÜLLER, Carmen. Eliminación de grasas del suero de queso para obtener proteína y lactosa. *Información tecnológica*. 2008, vol. 19, nro. 2. pp. 41-50. ISSN 0718-0764.

SPAHN, G.; BAEZA, R.; SANTIAGO, L. y PILOSOF, A. Whey protein concentrate/ $\lambda$ -carrageenan systems: Effect of processing parameters on the dynamics of gelation and gel properties. *Food Hydrocolloids*. 2008, vol. 22, nro. 8. pp.1504–1512. ISSN 0268-005X.

STEINHAUER, Tim; SCHWING, Julia; KRAUß, Sandra y KULOZIK, Ulrich. Enhancement of ultrafiltration-performance and improvement of hygienic quality during the production of whey concentrates. *International Dairy Journal*. 2015a, vol. 45, pp. 8-14. ISSN 0958-6946.

STEINHAUER, Tim; MARX, Melanie; BOGENDÖRFER, Kerstin y KULOZIK, Ulrich. Membrane fouling during ultra- and microfiltration of whey and whey proteins at different environmental conditions: The role of aggregated whey proteins as fouling initiators. *Journal of Membrane Science*. 2015b, vol. 489, pp. 20–27. ISSN 0376-7388.

STEINHAUER, Tim; HÁNELY, Sabrina; BOGENDÖRFER, Kerstin y KULOZIK, Ulrich. Temperature dependent membrane fouling during filtration of whey and whey proteins. *Journal of Membrane Science*. 2015c, vol. 492, pp. 364-370. ISSN 0376-7388.

TENIZA, Ogilver. Estudio Del suero de queso de leche de vaca y propuesta para el reuso del mismo. Trabajo de maestría en Tecnología Avanzada Tlaxcala: Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, 2008. 137 p.

TWIFORD, R. Membrane filtration offers a variety of applications for dairy. *Dairy Foods*. 2004, vol. 105, nro. 3. pp. 76-78. ISSN 1558-142X.

UNIMEDIOS - UNIDAD DE MEDIOS DE COMUNICACIÓN. Fabricación de quesos como para récord Guinness [sitio web]. Medellín: Unimedios. 7, marzo, 2015 [consultado: 24 abril 2017]. Disponible en: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/fabricacion-de-quesos-como-para-record-guinness.html>

URRIBARRÍ, Lauris; VIELMA, Alex; PÁEZ, Gisela; FERRER, José; MÁRMOL, Zulay y RAMONES, Eduardo. Producción de ácido láctico a partir de suero de leche, utilizando *Lactobacillus helveticus* en cultivo continuo. *Revista Científica*. 2004, vol. 14, nro. 4. pp. 297-302. ISSN 0798-2259.

VAILANT, Fabrice.; PÉREZ, Ana y VIQUEZ, Floribeth. Microfiltración tangencial: una alternativa innovadora para la transformación de frutas tropicales. *La alimentación Latinoamericana*. 2004, vol. 232, pp. 38-45. ISSN 0325-0164.

VAN DER SCHANS, A. Valorisation of whey. Holanda: Haute école valaisanne, 2002.

WESTWAY FEED PRODUCTS, INC. Methods for improving the storage and handling characteristics of condensed whey permeate. Inventor: J. HARRIS y P. MOSTYN. Int. Cl.:A23C 21/00. Fecha de solicitud: 3, marzo, 2006. USA. US 7927641 B2. 19, abril, 2011.