

Nanofiltración en el manejo del lactosuero

Liliana Rigey Posada David¹.

Artículo recibido: 26 de septiembre de 2016 / Artículo aceptado: 12 de diciembre de 2016

RESUMEN

El lactosuero es un subproducto de la industria láctea, resultante de la coagulación de diferentes tipos de quesos, se define como la fracción de la leche, que no precipita por la acción del cuajo o por los ácidos, durante el proceso de elaboración. Constituye el 90% de la leche que ingresa al proceso y este compuesto por sustancias como proteínas solubles, lactosa, vitaminas y sales minerales que son de uso y aplicación en la industria alimentaria. El lactosuero es una sustancia de alto valor nutritivo, pero muy contaminante al contacto con el agua y costoso de procesar. Una inadecuada gestión del lactosuero trae asociado un alto impacto medioambiental. Este factor hace relevante implementar diferentes procesos que faciliten esta recuperación. En esta vía toma fuerza la aplicación de tecnologías emergentes de membrana específicamente la nanofiltración, profundizando en sus características, usos, aplicaciones, tipos de membranas y factores fisicoquímicos a tener en cuenta en el lactosuero a tratar. Se estudia entonces el aprovechamiento y tratamiento de lactosueros a través del uso de la NF en la concentración y desmineralización de estos, la recuperación de lactosa y de otros componentes importantes por su alto valor nutritivo.

Palabras clave: nanofiltración, membranas, presión, filtración, productos lácteos, lactosuero, proteína.

¹ Zootecnista, Profesional en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Agropecuarias -Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Docente, Corporación Universitaria Lasallista, Carrera 51 #118 sur 57 Caldas-Antioquia (e-mail: liposada@lasallista.edu.co). Autor encargado de correspondencia.

Nanofiltration in the management of Dairy serum

▣ ABSTRACT

Whey is a by-product of the dairy industry, resulting from the coagulation of different types of cheese, is defined as the fraction of milk, which does not precipitate by the action of rennet or acids, during the processing. It constitutes 90% of the milk that enters the process and is composed of substances such as soluble proteins, lactose, vitamins and mineral salts that are of use and application in the food industry. Whey is a substance of high nutritional value, but very contaminating on contact with water and costly to process. An inadequate management of whey has associated a high environmental impact. This factor makes it relevant to implement different processes that facilitate this recovery. In this way, the application of emerging membrane technologies specifically nanofiltration is strengthened, deepening its characteristics, uses, applications, types of membranes and physicochemical factors to take into account in the whey to be treated. The use and treatment of whey is then studied through the use of NF in the concentration and demineralization of these, the recovery of lactose and other important components because of its high nutritional value.

Keywords: nanofiltration, membranes, pressure, filtration, dairy products, whey, protein.

Nanofiltração no manejo do soro do leite.

▣ RESUMO

O soro do leite é um subproduto da indústria láctea, resultante da coagulação de diferentes tipos de queijos, se define como a fração do leite, que não precipita pela ação de coalho ou pelos ácidos, durante o processo de elaboração. Constitui 90% do leite que ingressa ao processo e este composto por substâncias como proteínas solúveis, lactose, vitaminas e sais minerais que são de uso e aplicação na indústria alimentícia. O soro do leite é uma substância de alto valor nutritivo, porém muito contaminante ao contato com a água e caro de processar. Uma inadequada gestão do soro do leite traz associado um alto impacto meio-ambiental. Este fator faz relevante implementar diferentes processos que facilitem esta recuperação. Nesta via toma força a aplicação de tecnologias emergentes de membrana especificamente a nanofiltração, aprofundando nas suas características, usos, aplicações, tipos de membranas e fatores físico-químicos para ter em conta no soro do leite a ser tratado. Se estuda então o aproveitamento e tratamento do soro do leite a través do uso da NF na concentração e desmineralização destes, a recuperação de lactose e de outros componentes importantes pelo seu alto valor nutritivo.

Palavras chave: nanofiltração, membranas, pressão, filtração, produtos lácteos, soro do leite, proteína.

■ INTRODUCCIÓN

El sector lácteo produce 6200 millones de litros de leche al año distribuidos en la producción y fabricación de diversos productos como leches tratadas térmicamente, en polvo, mantequillas, helados y quesos. El 15% de este volumen es transformado en queso y de esta leche destinada a queso el 90% son lactosueros, distribuidos en 50% dulces y 50% ácidos. Estas industrias generan una alta cantidad de efluentes calculados entre 0,2 a 10L por litro de leche procesada (Balannec, Vourch, Rabiller-Baudry y Chaufer, 2005) originados de los diferentes procesos productivos y que implican el uso de altos volúmenes de agua y la consiguiente generación de lactosueros y aguas residuales con una elevada carga de sólidos disueltos, esta contaminación se caracteriza por ser de tipo orgánica y biodegradable con una producción de efluentes líquidos que tienen una rápida tendencia a la fermentación por la conversión de lactosa a ácido láctico (Cuartas-Uribe, Alcaina-Miranda, Soriano-Costa, Mendoza-Roca, Iborra-Clar, & Lora-García, 2009; Wojdalski, Drózd, Piechocki, Gaworski, Zander y Marjanowski, 2013). Este proceso de biodegradación se asocia directamente con la cantidad de leche o lactosuero que va a parar al efluente por lo que el control de los procesos y el aprovechamiento de subproductos es el primer paso tendiente a mejorar la calidad medioambiental (Fepale, 2008).

A nivel mundial el costo y manejo de los recursos hídricos es una preocupación notable por lo que se hace relevante la recuperación de aguas a través de tecnologías emergentes como la nanofiltración que permitan la recuperación de componentes como la

lactosa y las proteínas solubles que puedan ser usados en otras aplicaciones alimentarias, y con ello reduzcan la contaminación de los efluentes específicos generados por esta industria, al garantizar la disminución de los niveles de materia orgánica contenida (Balannec et al, 2005; Gong, Zhang & Cheng, 2012).

En la actualidad la aplicación de tecnologías de membranas, entre ellas la nanofiltración para la concentración selectiva y tratamiento de lactosueros, permiten obtener productos como suero en polvo, suero en polvo desmineralizado, permeado en polvo, lactosa de grado alimenticio y WPC (Concentrado Proteico de Suero) convirtiéndose en una opción atractiva para la industria de alimentos, con especial implementación en el área de lácteos (Chacón, 2006). El proceso de separación por membranas se fundamenta en la permeabilidad selectiva de un componente o varios, de un líquido, a través de una membrana y en un gradiente de presión hidrostática (Dresch, Daufin & Chaufer, 2011).

Una membrana se puede considerar como una barrera selectiva, que permite la transferencia de determinados componentes de un medio al otro a través de ella y evita o restringe el paso de otros. El transporte de componentes a través de la membrana se da por la aplicación de una fuerza impulsora influenciada por gradientes de concentración, presión, temperatura o potencial eléctrico. La permeabilidad selectiva viene determinada por el tamaño de la partícula, la afinidad química con el material de la membrana, y/o la movilidad de los componentes a través de la membrana (Mohammad, Teow, Ang, Chung, Oatley-Radcliffe & Hilal, 2015).

Existen diversas tecnologías de filtración selectiva como: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) [Alkhatim, Alcaina, Soriano, Iborra, Lora, & Arnal, 1998; Timmer, van der Horst & Robbertsen, 1993]. Dentro de estas, la NF ha demostrado ser una de las tecnologías más exitosas en la industria láctea, dado su potencial para tratar productos residuales como el lactosuero, a través de procesos de desmineralizado, remoción de colorantes y desalinización. Este proceso favorece la obtención de productos paralelamente a la reducción de efluentes contaminantes [Salehi, 2014]. La industria láctea genera una gran variedad de productos, muchos de ellos reconocidos como alimentos básicos. La producción de éstos, conlleva a la generación de lactosuero, que es un producto rico en proteínas globulares hidrosolubles, lactosa y minerales por lo que constituye una importante fuente de nutrientes de alto valor biológico [Chandrapala, Chen, Kezia, Bowman, Vasiljevic&Kentis, 2016; Nguyen, Reynolds & Vigneswaran, 2003]. Sin embargo, es también una de las principales fuentes de contaminación ambiental de esta industria. El principal objetivo de este artículo es revisar la importancia de la nanofiltración y su aplicación en la industria láctea, específicamente en el tratamiento de lactosueros y recuperación de componentes de importancia como lactosa para aplicación en alimentos.

Suero lácteo o Lactosuero

Es el residuo líquido de color amarillento, obtenido después de la coagulación de la proteína de la leche, siendo el principal producto obtenido a partir de la producción quesos. Para obtener un kilo de queso se

requieren 10 litros de leche y se obtienen alrededor de 9 litros de suero. Contiene una alta concentración de materia orgánica, principalmente proteínas [lactoalbuminas y lactoglobulinas], lactosa, grasa, sales minerales [calcio, fosforo, sodio y magnesio], vitaminas hidrosolubles y algunas otras sustancias con capacidad antioxidantes [enzimas, péptidos, tocoferoles, aminoácidos, citratos, fosfatos, etc] lo que le atribuye una gran relevancia industrial por sus múltiples nutrientes y propiedades funcionales, esta composición está determinada por el tipo de leches usada, el tipo de queso producido y el proceso tecnológico aplicado. [Hernández-Rojas & Velez-Ruiz, 2014; Madureira, Pereira, Gómez, Pintado & Malcata, 2007; Guerrero, Ramírez & Puente, 2011; Cuartas, 2005].

En la tabla 1 se observa una composición genérica de dos tipos de sueros, en estado líquido y solido a diferentes condiciones de pH.

Tabla 1. Composición porcentual de lactosueros.

Tomado de: Restrepo, 2006

Componente	Líquido		Sólido	
	Dulce*	Acido**	Dulce	Acido
Proteína	0,8	0,7	12	12
Lactosa	4,9	4,4	73,3	68,7
Minerales	0,5	0,8	79	11,5
Grasa	0,2	0,04	1,3	0,8
Agua	93	93,5	4,6	3,9
Ácido láctico	0,2	0,5	1,7	4,6

*Suero procedente de la coagulación enzimática de la leche (pH: 6,4)

**Suero procedente de la coagulación acida de la leche (pH: 4,5)

Los volúmenes de sueros generados y las aguas residuales resultantes durante los procesos industriales, los cuales tienen alta carga orgánica requieren un control en cuanto a parámetros como demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO), haciendo relevante la aplicación de nanofiltración combinando con otras técnicas de membrana que garanticen el adecuado manejo de este producto y garanticen la recuperación de aquellos componentes de alto valor industrial. (Restrepo, 2006; Hernández-Rojas & Velez-Ruiz, 2014).

Nanofiltración

La NF es una tecnología de separación por membrana en la cual se trabaja con altas presiones, tiene un bajo consumo de energía favoreciendo su uso frente a otras técnicas de membranas. Este proceso de separación de componentes trabaja bajo el mismo fundamento que la osmosis inversa y la ultrafiltración. (Ecker, Raab&Harasek,

2012). Es una técnica intermedia a las mencionadas, determinada por dos características principales en cuanto a su estructura microporosa (tamaño de poro) y a los materiales membranarios que llevan cargas eléctricas particularizando los mecanismos de transferencia. Dentro de estos mecanismos, en NF principalmente se genera el Equilibrio de Donnan que consiste en el equilibrio entre los iones que pueden atravesar la membrana y los que no, lo cual es determinado por las concentraciones de los iones así como por sus cargas positivas o negativas (Cuartas-Uribe, Vincent-Vela, Alvarez-Blanco, Alcaina-Miranda & Soriano-Costa, 2010; Salehi,Razavi&Elahi, 2011).

Esta tecnología se introdujo por primera vez en el mercado, a finales de los años 80. La diferencia principal con otras tecnologías similares, es el alto grado de retención que logran estas membranas, utilizando rangos de peso molecular entre 0,2 - 1 nm y presiones altas (1 a 4 MPa). (Salehi, 2014; Turan, 2004).

Figura 1. Selectividad del proceso de Nanofiltración

Fuente: Recuperado de: <http://palagostar.com/en/nano-filtration-system>

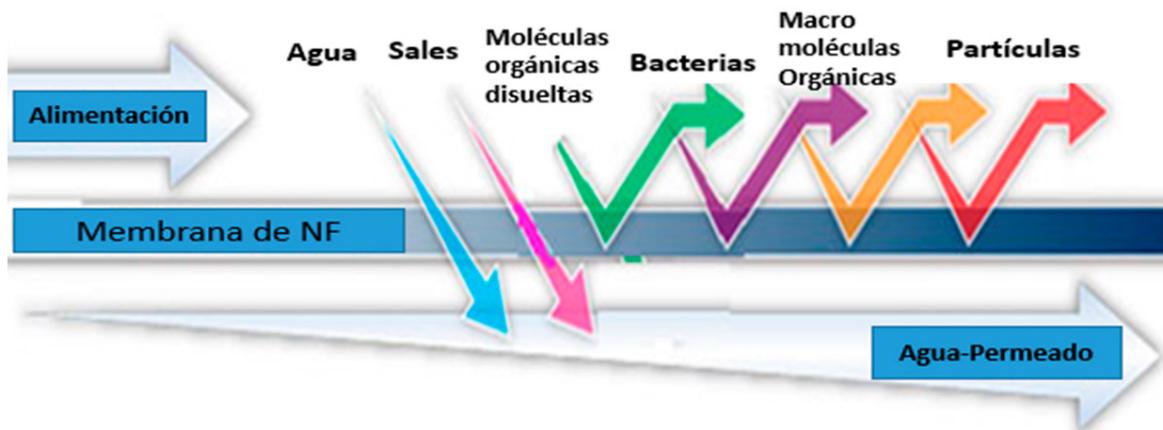
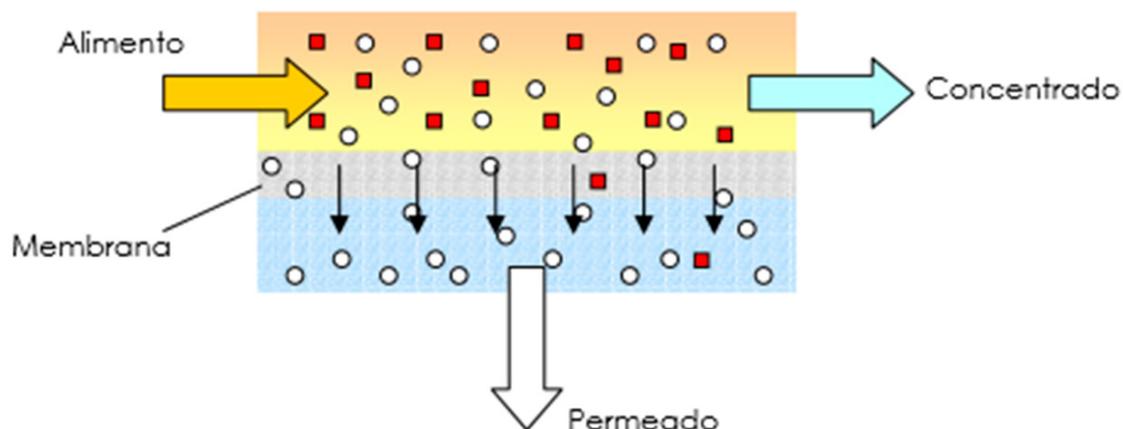


Figura 2. Representación esquemática de un proceso de separación por membrana por filtración tangencial.

Fuente: Cuartas-Uribe, 2005



Del fluido de alimentación, se logran dos corrientes: el permeado (filtrado), que es el líquido que ha pasado a través de la membrana y al cual se le han quitado los componentes con peso molecular mayor que el tamaño de poro de la membrana, y el concentrado (retenido), que corresponde a las moléculas o solutos que no han atravesado la membrana por su tamaño. Esta técnica permite la retención y separación macromoléculas, así como de iones multivalentes (di y trivalente como calcio, magnesio, sulfatos) y de iones monovalentes (sodio, potasio, bicarbonatos, cloruros y nitratos) hasta en un 50-80% según la membrana usada y el tipo de ion, estos aspectos convierten la NF en una técnica muy específica y de alto uso en la industria para el tratamiento y obtención de sueros desmineralizados, así como para la recuperación de moléculas de alto valor funcional (Mucchetti, Zardi, Orlandini&Gostoli, 2000; Okawa, Shimada, Ushida, et al., 2015).

La NF es principalmente usada en la purificación y tratamiento de aguas

industriales y manejo de los lactosueros, productos del procesamiento de leches, favoreciendo la eliminación o recuperación de sustancias orgánicas de alto peso molecular (> 300 Da), tales como proteínas solubles, sacarosa y lactosa, y también de sales como NaCl y KCl. (Alkhatim et al, 1998; Luo, Ding, Wan&Jaffrin, 2012). Paralelamente en la industria alimentaria se pueden evidenciar otros usos de las membranas de NF (Cuartas-Uribe, Vincent-Vela, Alvarez-Blanco, Alcaina-Miranda & Soriano-Costa, 2010; Bouchoux, Roux-de Balmann&Lutin, 2006) como son:

- Concentración de proteínas hidrosolubles
- Desmineralización de disoluciones azucaradas
- Separación de solventes de aceites vegetales
- Reciclado de nutrientes en procesos fermentativos
- Recuperación de soluciones de limpieza
- Purificación de ácidos orgánicos
- Concentración de zumos
- Purificación de aguas para consumo humano

Para el caso específico de lactosueros tratados por NF, se logra obtener una fracción concentrada de alto valor nutricional reducida en sales y un permeado con un contenido alrededor de 50% [respecto al contenido inicial] de sales monovalentes y pequeñas cantidades de lactosa [Riera, Suarez & Muro, 2013].

Membranas

Las membranas son estructuras semipermeables, que facilitan el paso de determinados componentes y evita o restringe el paso de otros. El transporte de componentes a través de la membrana se realiza siempre aplicando una fuerza impulsora, para el caso de la NF se da por la acción de la presión transmembrana (PTM) que consiste en la diferencia de presión entre el lado del retenido y el del permeado de la membrana [Contreras, Kimb & Li, 2009].

Independiente del material con que estén elaboradas las membranas para NF, hay algunas características relevantes con las que deben contar como ser capaces

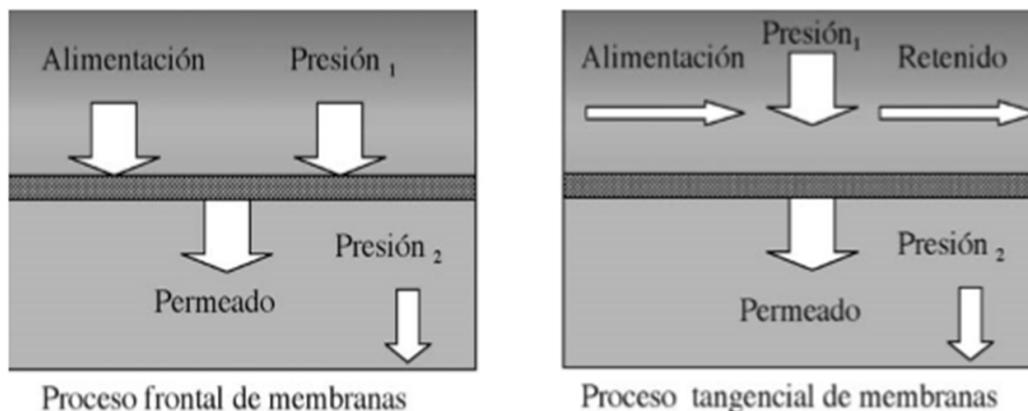
de resistir la PTM, ser estables térmica y químicamente [a la composición de la matriz - caso leche y a los productos de limpieza] [Chacón, 2006; Schaep, Vandecasteele, Mohammad&Bowen, 2001].

En la NF es de gran relevancia las características de las membranas a usar porque de estas depende la eficiencia del proceso, dentro de estas características se considera: diámetro, longitud y distribución del poro así como material de la membrana. De otro lado también se consideran otras características relevantes inherentes a la matriz a tratar y que están estrechamente relacionadas con el resultado del proceso como son: fuerza iónica, valencia de los iones [mono o multivalentes], composición, viscosidad, temperatura y pH [Van der Horst, Timmer, Robbertsen, y Leenders, 1995].

Se pueden diferenciar dos técnicas de filtración, la primera es frontal donde el flujo es perpendicular a la superficie filtrante y la segunda es denominada tangencial [más usada y aplicada en el tratamiento de diferentes matrices], donde el flujo es paralelo a la superficie filtrante, se genera

Figura 3. Tipos de Filtración por membranas

Tomado de: Chacón, 2006.



una fase concentrada [retenido] y otra diluida [permeado] y es la que permite aplicar el concepto de presión transmembrenaria. (Fernández, Riera, Álvarez & Álvarez, 2010).

Tipos de membranas de Nanofiltración

Las membranas de NF pueden ser orgánicas o inorgánicas. Entre los materiales orgánicos usados para la fabricación de las membranas están las celulosas (acetato de celulosa) que son muy sensibles a altas temperaturas (mayores de 50 °C) y variaciones pH (óptimo 3 a 8). Los polímeros orgánicos (polisulfonas, teflón, propilenos, poliamidas, polisulfuros, polipropilenos) son otro tipo de material de alto uso que presenta características de mayor resistencia a temperaturas (hasta 80°C) y al pH (2 a 12), aunque presentan sensibilidad a la compactación y a los agentes clorados. (Teixeira, Rosa & Nystrom, 2005; Kovács & Samhaber, 2008b). Las membranas de tipo inorgánico están compuestas de sales como dióxido de zirconio (ZrO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y dióxido de titanio (TiO₂), presentan una alta resistencia a los cambios de temperatura (soportan más de 300 °C), trabajan en un amplio rango de pH (0 - 14) y permiten presiones mayores a 1MPa. (Chacón, 2006).

Las membranas presentan una organización estructural definida, en la cual se destacan aspectos como:

- Buena resistencia mecánica dada la estructura soporte macroporosa que permite un alto flujo de solventes.
- Una capa intermedia que actúa como unión entre las capas externas.
- Una capa selectiva delgada activa (poliamida), caracterizada por un bajo

espesor (< 1 micra), un diámetro de poro del orden de un nanómetro, con una distribución de tamaño muy estrecha, lo que facilita un flujo elevado y una buena separación. (Hong, Miller & Bruening, 2006; Kovács & Samhaber, 2008a).

Las membranas cargadas eléctricamente, cuentan con grupos catiónicos o aniónicos fijos en su estructura, lo que permite el paso de los componentes que tienen la misma carga que la membrana, y la retención de los de carga contraria debido al efecto Donnan. (Vezzani & Bandini, 2002). En cuanto a la forma, las membranas pueden ser:

- **Aplanadas**, son similares a los filtros prensa, es decir, tienen forma laminar. Las membranas se van intercalando entre placas, recogiendo el permeado y el concentrado en canales diferentes. Generalmente trabajan con pequeñas áreas de membrana. Estas pueden desmontarse con facilidad para realizar procedimientos de limpieza. (Cuartas-Uribe, Alcaina-Miranda, Soriano-Costa et al, 2009).
- **En forma de espiral**, con un separador interno. Las membranas se enrollan alrededor del tubo de permeado. El separador facilita el flujo y genera turbulencias que reducen los fenómenos de polarización y colmatado en las membranas durante la concentración, este tipo de estructura es más sensible a la obstrucción (Kumar, Hariharan, Mayya & Han, 2013; Cuartas-Uribe, Alcaina-Miranda, Soriano-Costa et al, 2009).
- **Tubular**: Es la estructura más simple, la membrana se moldea sobre la pared interior de un soporte poroso. Son poco compactos y de fácil limpieza.

Características de las membranas de nanofiltración

Alkhatim et al (1998) indica que la caracterización de las membranas se puede realizar teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Flujo del permeado = volumen del permeado / área de la membrana x tiempo
- Retención de soluto (%R) = $(1 - C_p / C_f) \times 100$ Donde:

C_p : concentración del componente permeable

C_f : corriente de alimentación

La selectividad de las membranas de NF, es un parámetro que está determinado por la capacidad de retención relacionada directamente con el tamaño (peso molecular) de los compuestos y la naturaleza química del material polimérico que la conforma, el índice de rechazo (selectividad de la membrana por un soluto específico), el efecto Donnan y el coeficiente de difusión del soluto. (Tolkack&Kulozik, 2005; Vezzani&Bandini, 2002).

Las diluciones formadas de iones monovalentes pueden atravesar la membrana de NF con facilidad, mientras las soluciones con iones multivalentes (sulfatos y carbonatos) quedan retenidos. La retención de aniones en la membrana de NF se ve aumentada en el orden de nitrato, cloruro, hidróxidos, sulfato, carbonato, fosfato. La retención de cationes se aumenta en orden de sodio, potasio, calcio, magnesio, cobre y hierro.

En términos generales las características de mayor relevancia a tener en cuenta en las membranas de NF son:

- Carga iónica (especificidad según carga de los componentes del flujo).
- Peso molecular, selectividad según tamaño de partícula
- Grado de disociación: ácidos débiles (ácido láctico) es mejor rechazado a pH alto.
- Polaridad: las sustancias menos polares son retenidas de manera más eficiente.
- Grado de hidratación: Especies altamente hidratadas son mejor retenidas (Sanhaber, 2005).

Mecanismos de difusión

Existen varios mecanismos que participan en los procesos de NF y que están relacionados directamente con los resultados de la aplicación de esta técnica, entre ellos están:

- Mecanismo disolución-difusión, que está estrechamente relacionado con la presión osmótica. Este fenómeno básicamente se explica desde el equilibrio osmótico que se presenta entre dos medios, donde la fase diluida fluye hacia la fase concentrada logrando igualar los potenciales químicos a ambos lados de la membrana.
- Mecanismo de polarización por concentración: al pasar el disolvente por la membrana se va generando un aumento del soluto en la fase concentrada que se acumula en la pared de la membrana. Esto afecta el rendimiento del proceso dado que se disminuye el paso de la disolución, dado la acumulación de soluto rechazado.
- Mecanismo de exclusión de Donnan. Se presenta cuando la superficie de la

membrana está cargada, lo cual atraerá los solutos con carga opuesta, y rechazará los de igual carga.

- Mecanismo de exclusión dieléctrica. Se da por el tipo de carga superficial de la membrana y al momento dipolar del agua, esto afecta la constante dieléctrica que evita que los solutos cargados puedan pasar (Rice, Barber, O`connor, Pihlajamaki, Nystrom, Stevens & Kentish, 2011; Vezzani y Bandini, 2002).

Los mecanismos de transporte en membranas de NF se explican en base a diferentes modelos matemáticos como: ecuación extendida de Nernst Planck, Modelo de Theorell, Meyers y Sievens y Modelo de carga superficial

Aplicaciones de NF en suero

Los lactosueros contienen macro y micromoléculas, de gran importancia a nivel industrial porque representan materias primas con alta funcionalidad en la industria alimentaria, a esto se suma los efectos adversos que su vertimiento genera sobre el medio ambiente. Una de las alternativas para la concentración de estos componentes y la desmineralización de sueros es la NF ya que permite separar y recuperar compuestos de diferentes tamaños según las necesidades específicas. (Andrade, Mendes, Espíndola & Amaral, 2014; Nystrom, Kaipia & Luque, 1995; Guerrero et al, 2011).

Hernández-Rojas & Vélez-Ruiz (2014), reportan la aplicación de la técnica de filtración tangencial con membranas para la recuperación y concentración de proteínas del suero, el permeado resultante con alto

contenido de lactosa es sometido a NF para separar las sales minerales, logrando la obtención de productos como proteínas, lactosa y sales que pueden ser usados en la industria alimentaria.

Según Timmer, Speelmans & van der Horst, 1998, la NF se puede usar para realizar desmineralización de sueros, remoción de bacterias en leches descremadas, recuperación de proteínas de lactosueros, como también para la separación de los componentes esenciales del leche (proteínas, péptidos, aminoácidos). Es indispensable determinar la membrana de separación más adecuada que dependerá del conocimiento de las propiedades de los componentes a separar (carga, hidrofobicidad, tamaño de partícula, ambiente fisicoquímico en el que se encuentran) y la interrelación con esta, conociendo a su vez parámetros básicos como tamaño del poro, el grosor de la membrana y de los parámetros eléctricos (carga positiva o negativas de los componentes). (Bowen, Mohammad et al, 2015 & Hilai, 1997).

Kelly, Horton & Burling (1992), reportan que con la tecnología de NF se puede alcanzar la eliminación de hasta un 84% de sal del lactosuero salado, un 42% de ácido a partir de lactosueros ácidos, y la desmineralización parcial del lactosuero dulce.

A los concentrados proteicos y lactosa recuperados del tratamiento por NF de los lactosueros o en combinación con otras técnicas como ultrafiltración y osmosis inversa, se le atribuyen propiedades estimulantes del sistema inmunológico, además de tener múltiples usos en diversas industrias alimentarias como panificación, confitería, bebidas, helados, alimentos

infantiles y productos farmacéuticos, dado que permiten ofrecer materias primas con altos porcentajes de proteína (30% a 80%) y diversas funcionalidades. (Chacón, 2006; Kovács & Samhaber, 2008b).

Cuarta (2005), reporta el uso de la tecnología de membranas para realizar fraccionamiento de proteínas, desmineralización y concentración de lactosuero, sumando a una mejora en los procesos en cuando a mayor eficiencia en la recuperación de proteínas y reducción en el consumo de energía (en un 44%). También se evaluó la desmineralización parcial de suero, partiendo del permeado ultrafiltrado de lactosuero dulce, usando membranas con bajas velocidades de flujo y niveles altos de rechazo, con estas condiciones se logró una reducción de 27,36% del contenido salino, donde los iones monovalentes presentaron índices de rechazo más bajos que los divalentes.

En otro estudio se evaluó la desalinización del lactosuero de queso aplicando la metodología de nanofiltración, evaluando membranas (tipo DS-5-DL marca GE-OSMONICS) con superficie de poliamida de soporte de polisulfona y matriz de poliéster obteniendo una recuperación de 80% de agua a 3 MPa. (Kentish & Rice, 2015).

Atra, Vatai, Bekassy-Molnar & Balint, (2005) reportan porcentajes de recuperación de lactosa en lactosueros tratados por NF entre 20 a 25% en el concentrado y valores de 0,1 a 0,2% en el agua de permeado, aplicando flujos mayores de 40 L/ m² h y 20 bares de presión. Estos bajos niveles de lactosa en el agua de permeado permiten su reutilización en agua de lavado, para riego de cultivos, entre otros.

Suarez, Lobo, Álvarez, Riera & Álvarez (2006), reportan retención de proteínas en un 100 % y en 99,8% de lactosa. También encontraron menor retención de iones monovalentes versus polivalentes concordante con el peso molecular. Evidenciaron que los cloruros fueron altamente permeables, lo que se explicó por el efecto Donnan dado la carga negativa de las proteínas y el pH del suero (6,2 - 6,8 las membranas se cargan negativamente). La retención de iones se ve soportada por el incremento de la presión intramembranaria debido a un mayor flujo del permeado, el grado de desmineralización logrado en el suero estuvo entre 27 y 36% valores dependientes del volumen de concentrado.

VanderHorst, Timmer, Robbertsen & Leenders (1995), encontraron que en procesos de NF de lactosueros, los porcentajes de rechazo de sal aumentan cuando aumenta el flujo, evidenciando la necesidad de aplicación del transporte difusivo a un bajo flujo y transporte convectivo en alto flujo. Se logra hasta un 40% de desmineralización.

Chapandra, Chen, Kezia et al (2016) trabajaron con lactosueros ácidos, que tienen más altos contenidos de lactosa y minerales y menos proteína que los lactosueros dulces. Encontraron un 90% de retención de lactosa, eficiencia que depende del pH, la temperatura y el tipo de membrana usada. Estos resultados favorecen el aprovechamiento de los componentes obtenidos en diferentes matrices alimentarias y la disminución del impacto ambiental de este tipo de lactosueros.

Chandrapala, Duke, Gray et al (2016), reportan que el tipo de membrana, el % rechazo de iones divalentes, la permeabilidad del agua, y el punto isoeléctrico son propiedades que

tienen un alto impacto en la eficiencia de los procesos de NF de lactosueros ácidos. Sin embargo esta transferencia de lactosa se potencia por pH bajos dada la disociación del ácido láctico, logrando hasta un 50% de paso a pH de 3,0.

En estudio realizado con lactosuero de queso cottage [ácido] donde se buscó concentrar y desmineralizar parcialmente este subproducto, aplicando NF combinada con diafiltración, usando membranas de lámina plana de 0,046 m² y 96% de rechazo de sacarosa, se encontró un alto porcentaje de desmineralización de iones monovalentes, alcanzando valores de 70% y 90% en relación de concentración frente a volumen del agua en diafiltración de permeado. Evidenciaron que la cantidad de iones multivalentes aumentó continuamente durante el proceso combinado de NF y diafiltración del lactosuero ácido. El rechazo de los compuestos de importancia del lactosuero de leche tales como proteínas y lactosa fue superior al 90%. [Roman, Wang, Csanadi, Hodur & Vatai, 2009].

■ CONCLUSIONES

El tratamiento de lactosueros en la industria láctea, es uno de los procesos que ha tomado gran fuerza y relevancia dado que permite disminuir la contaminación al evitar la disposición de efluentes con altas cargas orgánicas.

La nanofiltración es una tecnología de separación por membranas de gran interés, que permite tratar los lactosueros y poder recuperar componentes de gran importancia nutricional y biológica como son proteínas solubles, lactosa y minerales que resultan

útiles como materias primas para la industria alimentaria, paralelo a que genera beneficios económicos para la industria láctea que los está recuperando.

Es usual que la tecnología de separación por nanofiltración, se use combinada con otras tecnologías similares como son ultrafiltración y diálisis que permiten tener mayores porcentajes de recuperación, admitiendo la obtención de sueros desmineralizados de mayor calidad para ser usados como materia prima en otras industrias procesadoras [panificación, confitería, etc.].

■ REFERENCIAS

- Alkhatim, H., Alcaina, M., Soriano, E., Iborra, M., Lora, J., & Arnal, J. (1998). Treatment of whey effluents from dairy industries by nanofiltration membranes. *Desalination*, 119, 177-184.
- Andrade, L.H., Mendes, F.D.S., Espindola, J.C & Amaral, M.C.S (2014). Nanofiltration as tertiary treatment for the use of dairy wastewater treated by membrane bioreactor. *Separation and purification technology*, 126, 21 - 29.
- Atra, R., Vatai, G., Bekassy-Molnar, E & Balint, A., (2005). Investigation of ultra and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of food engineering*, 67, 325 - 332.
- Balanec, B., Vourch, M., Rabiller-Baudry, M & Chaufer, B. (2005). Comparative study of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for dairy effluent treatment by dead-end filtration. *Separation and Purification*, 42 (1), 195-200.

- Bowen, W.R., Mohammad, A.W. y Hilai, N. (1997). Characterization of nanofiltration membranes for predictive purposes - use of salts, uncharged solutes and atomic force microscopy. *Journal of membrane science*, 126, 91-105.
- Bouchoux, A., Roux-de Balmann, H. y Lutin, F., 2006. Investigation of nanofiltration as a purification step for lactic acid production processes based on conventional and bipolar electrodialysis operations. *Sep. Purif. Technol.* 52 (2), 266 - 273.
- Chancón-Villalobos, Alejandro., (2006). Tecnologías de membranas en la agroindustria láctea. *Agronomía Mesoamericana*, 17 (2), 243-263.
- Chandrapala, J., Chen, G.Q., Kezia, K., Bowman, E.G., Vasiljevic, T & Kentis, S.E., (2016). Removal of lactate from acid whey using nanofiltration. *Journal of food engineering*, 177, 50 - 64.
- Chandrapala, J., Duke, M.C., Gray, R, Weeks, M., Palmer, M., & Vasiljevic, T., (2016). Nanofiltration and nanodiafiltration of acid whey as a function of pH and temperature. *Separation and Purification Technology*, 160, 18 -27.
- Contreras, A. E., Kimb, A. & Li, Q., (2009). Combined fouling of nanofiltration membranes: mechanisms and effect of organic matter. *J. Membr. Sci.* 327,87-95.
- Cuartas Uribe, Beatriz E. (2005). Estudio del proceso de nanofiltración para la desmineralización de lactosuero dulce (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 1-306p.
- Cuartas-Uribe, B., Alcaina-Miranda, M.I., Soriano-Costa, E., Mendoza-Roca J.A., Iborra-Clar, M.I., Lora-García, J., (2009). A study of the separation of lactose from whey ultrafiltration permeate using nanofiltration. *Desalination*, 241, 244-255.
- Cuartas-Uribe, B., Vincent-Vela, M.C., Alvarez-Blanco, S., Alcaina-Miranda, M.I & Soriano-Costa, E., (2010). Application of nanofiltration models for the prediction of lactose retention using three modes of operation. *Journal of food engineering*. 99, 373 - 376.
- Dresch, M., Daufin, G. & Chaufer, B., (2011). Integrated membrane regeneration process for dairy cleaning-in-place, *Sep. Purif. Technol.* 22-23, 181-191.
- Ecker, J., Raab, T. & Harasek, M., (2012). Nanofiltration as key technology for the separation of LA and AA. *J. Membr. Sci.* 389, 389 - 398.
- Fepale (2008) "Gestión Ambiental y Aguas residuales en Industrias Lácteas"
- Fernández, P., Riera, F.A., Álvarez, R. & Álvarez, S., (2010). Nanofiltration regeneration of contaminated single-phase detergents used in the dairy industry. *J. Food Eng.* 97, 319-328.
- Guerrero, J.R., Ramírez, A. & Puente, W., (2011). Caracterización del suero de queso blanco del combinado lácteo Santiago. *Tecnología Química*, 31 (3), 93-100.
- Gong, Y.M., Zhang, H.X. & Cheng, X.N., (2012). Treatment of dairy wastewater by two-stage membrane operation with ultrafiltration and nanofiltration, *Water Sci. Technol.* 65, 915-919.

- Hernández-Rojas, M. & Vélez-Ruiz, J.F., (2014). Suero de leche y su aplicación en la elaboración de alimentos funcionales. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8 (2), 13-22.
- Hong, S., Miller, M.D. & Bruening, M.L., (2006). Removal of dyes, sugars and aminoacids from NaCl solutions using multilayer polyelectrolyte nanofiltration membranes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45 (18), 6284-6288.
- Kelly, P.M., Horton, B.S., Burling, H., (1992). IDF SpecialIssueNo.9201 - New Applications of Membrane Processes. *International Dairy Federation*, Brussels, Belgium, p. 130-140.
- Kentish, S.E. & Rice, G., 2015. Demineralization of Dairy Streams and Dairy Mineral Recovery Using Nanofiltration, *Membrane Processing for Dairy Ingredient Separation*. John Wiley & Sons, Ltd, p. 112 - 138.
- Kovács, Z & Samhaber, W., (2008a). Characterization of nanofiltration membranes with uncharged solutes. *Membran technika*, 12 (2), 22-36.
- Kovács, Z & Samhaber W., (2008b). Contribution of pH dependent osmotic pressure to aminoacid transport through nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 61, 243-248.
- Kumar, V.S., Hariharan, K.S., Mayya, K.S. & Han, S., (2013). Volume averaged reduced order Donnan Steric Pore Model for nanofiltration membranes. *Desalination*, 322 (1), 21-28.
- Luo, J., Ding, I., Wan, Y. y Jaffrin, M.Y., (2012). Three shold flux for shear-enhanced nanofiltration: experimental observation in dairy wastewater treatment, *J. Membr. Sci.* 409, 276-284.
- Madureira, A.R., Pereira, C., Gómez, A., Pintado, M. & Malcata, F., (2007). Bovine whey protein soverview on their main biological properties. *Food Research International*, 40 (10), 1197 - 1211.
- Minhalma, M., Magueijo, V., Queiroz, D.P & De Pinho, M.N., (2005). Reduction of wastewaters and valorization of by-products from "Serpa" cheese manufacture using nanofiltration. *Water Sci. Technol.*, 52, 393-399.
- Mohammad, A.W., Teow, Y.H., Ang, W.L., Chung, Y.T., Oatley-Radcliffe, D.L., & Hilal. N., (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, 356, 256-254.
- Mucchetti, G., Zardi, G., Orlandini, F & Gostoli, C., (2000). The pre-concentration of milk by nanofiltration in the production of Quarg Type fresh cheeses. *Lait80* (1), 43- 50.
- Nguyen, M., Reynolds, N. & Vigneswaran, S., (2003). By-product recovery from cottage cheese production by nanofiltration. *J. Clean. Prod.* 11 (7), 803 - 807.
- Nystrom, M., Kaipia, L. & Luque, S., (1995). Fouling and retention of nanofiltration membranes. *Journal of membrane science*, 98, 249-262.
- Okawa, T., Shimada, M., Ushida, Y., Seki, N., Watai, N., Ohnishi, M., Tamura, Y. & Ito, A., (2015). Demineralization of whey by a combination of nanofiltration and anion

- exchange treatment: a preliminary study. *Int. J. Dairy Technol.* 68 [4], 478 - 485.
- Restrepo G.M., (2006). Producción más Limpia en la Industria Alimentaria. *Producción + Limpia*, 1 [1], 87-101.
- Rice, G., Barber, A.R., O`connor, A.J., Pihlajamaki, A., Nystrom, Marianne, Stevens, G.W & Kentish, S.E., (2011). The influence of dairy salts on nanofiltration membrane charge. *Journal of Food Engineering*, 107, 184-172.
- Riera, F.A., Suarez, A & Muro, C., (2013). Nanofiltration of UHT flash cooler condensates from a dairy factory: Characterization and water reuse potential. *Desalination* 309, 52-6.
- Roman, A., Wang, J., Csanadi, J., Hodur, C. & Vatai, G., (2009). Partial demineralization and concentration of acid whey by nanofiltration combined with diafiltration. *Desalination* 241 (1e3), 288 - 295.
- Salehi, F., (2014). Current and future applications for nanofiltration technology in the food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 92, 161-177.
- Salehi, F., Razavi, S.M.A., & Elahi, M., (2011). Purifying anion exchange resin regeneration effluent using polyamide nanofiltration membrane. *Desalination*, 278, 31-35.
- Samhaber, W.M., (2005). Uses and problems of nanofiltration in the food industry. *Chemical Engineering Technology* 77 [5], 583-588.
- Schaep, J., Vandecasteele, C., Mohammad, A.W. & Bowen, W.R., (2001). Modelling the retention of ionic components for different nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology* 22-3 [1-3], 169-179.
- Suarez, E., Lobo, A., Alvarez, S, Riera, F.A y Alvarez, R. (2006). Partial demineralization of whey and milk ultrafiltration permeate by nanofiltration at pilot-plant scale. *Desalination*, 198, 274 - 281.
- Teixeira, M., Rosa, Y & Nystrom, M., (2005). The role of membrane charge on nanofiltration performance. *J. Membr. Sci.* 265 [1], 160 - 166.
- Timmer, J.M.K., Speelmans M.P.J. & van der Horst, H.C., (1998). Separation of amino acids by nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 14, 133 - 144.
- Timmer, J.M.K., van der Horst, H.C. y Robbertsen, T., (1993). Transport of lactic acid through reverse osmosis and nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 85, 205-216.
- Tolkack, A. & Kulozik, U., (2005). Fractionation of whey proteins and caseino macropeptide by means of enzymatic crosslinking and membrane separation techniques. *Journal of Food Engineering*. 67, 13-20.
- Turan, M., (2004). Influence of filtration conditions on the performance of nanofiltration and reverse osmosis membranes in dairy wastewater treatment, *Desalination*, 170, 83-90.
- Van der Horst, H. C., Timmer, J. M. K., Robbertsen, T. & Leenders, J. (1995).

Use of nanofiltration for concentration and desmineralization in the dairy industry: Model for mass transport. *Journal of Membrane Scienc*, 104, 205-218.

Vezzani, D.& Bandini, S., (2002). Donna equilibrium and dielectric exclusion for characterization of nanofiltration membranes. *Desalination* 149 (1-3), 477 - 483.

Wojdalski, J., Drózd, B., Piechocki, J., Gaworski, M., Zander, Z. & Marjanowski, J., (2013). Determinants of water consumption in the dairy industry. *Polish J. Chem. Technol.* 15 (2) 61-72.