

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE
INDUSTRIAS LÁCTEAS

ALAN RAMÓN TORRES MUENA

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

CHILLÁN-CHILE

2025

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE
INDUSTRIAS LÁCTEAS**

Aprobado por:

Gastón Ignacio Merlet Venturelli
Ingeniero Civil en Química, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Guía

Luis Antonio Seminario Salas
Ingeniero en Industria Alimentaria, Mg.
Profesor Asistente

Profesor Asesor

Ramiro James Rebolledo Cormack
Ingeniero Civil Matemático, Ph. D.
Profesor Asistente

Profesor Asesor

Gastón Ignacio Merlet Venturelli
Ingeniero Civil en Química, Dr.
Profesor Asociado

Director de Departamento

Luis Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Titular

Decano

Dedicatoria

A mi mamá, mi papá y hermano mayor, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional, que me han acompañado en cada paso de mi vida académica y personal.

A mi familia, por enseñarme la importancia de la perseverancia y la humildad.

Y a quienes, de una u otra forma, han estado presentes en este camino, compartiendo alegrías y desafíos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, a mi profesor guía, por su orientación, paciencia y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y consejos fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados.

A mis profesores asesores, por sus observaciones y recomendaciones, que enriquecieron de manera significativa este estudio.

A mis amigos, por las conversaciones, los buenos momentos, las risas y el ánimo compartido en los momentos más exigentes de este proceso.

Finalmente, a mi familia, por su confianza, motivación y apoyo incondicional, que han sido el motor que me impulsó a concluir este desafío.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. Objetivo general.....	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. METODOLOGÍA.....	11
4. MARCO TEÓRICO	13
4.1. Industria láctea en el contexto chileno	13
4.2. Características del agua residual en la industria láctea.....	14
4.3. Tecnologías convencionales de tratamiento	21
4.3.1. Coagulación-floculación como tratamiento primario	22
4.4. Tecnologías avanzadas: tratamiento con membranas	25
4.4.1. Microfiltración (MF): Principios, eficiencia y aplicación en aguas residuales de la industria láctea.....	27
4.4.2. Ultrafiltración (UF): Principios, funcionamiento y aplicación en aguas residuales de la industria láctea.....	31
4.4.3. Nanofiltración (NF): Principios, funcionamiento y aplicación en aguas residuales de la industria láctea.....	35
4.4.4. Ósmosis Inversa (RO): Principios, funcionamiento y aplicación en aguas residuales de la industria láctea.....	40
4.4.5. Comparación de tecnologías de membranas.....	44
4.4.5.1. Metodología para la construcción del gráfico radar comparativo.....	47
4.4.5.2. Discusión de resultados del gráfico radar comparativo	51
4.4.5.2.1. Síntesis general	53
4.4.5.2.2. El doble rol de la UF	53
4.5. Sistemas híbridos: coagulación-floculación acoplada a membranas (MF/UF) y biorreactor de membranas (MBR).....	54
4.5.1. Coagulación-floculación acoplada a microfiltración o ultrafiltración (C/F + MF/UF)	55
4.5.2. Biorreactor de membrana (MBR): integración de tratamiento biológico y separación por membrana	59
4.5.3. Comparación entre sistemas híbridos aplicables a la industria láctea	63
4.5.3.1. Discusión de los resultados de los gráficos de radar.....	66
4.6. Normativas ambientales aplicables.....	68
4.6.1. Normativa chilena sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales	

industriales	68
4.6.2. Normativas internacionales.....	71
4.6.2.1. Normativas sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales en India	72
4.6.2.2. Normativas sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales en Estados Unidos	73
4.6.2.3. Normativas sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales en Alemania	76
4.6.3. Análisis y relevancia de las normativas ambientales en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea	78
4.7. Indicadores técnicos y ambientales para evaluar sistemas.....	83
4.7.1. Metodología MCDM para gráfico radar comparativo	95
4.7.2. Discusión de resultados de los gráficos radar comparativos	100
5. CONCLUSIÓN.....	103
6. BIBLIOGRAFÍA.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto		Página
Tabla 1.	Propiedades del agua residual de la industria lechera.....	7-8
Tabla 2.	Origen y tipo de contaminantes en aguas residuales de la industria láctea.....	15-16
Tabla 3.	Parámetros comunes en aguas residuales de la industria láctea.....	17
Tabla 4.	Ventajas y limitaciones del proceso de coagulación-floculación aplicado al tratamiento de aguas residuales.....	23
Tabla 5.	Comparación técnica de tecnologías de membranas para el tratamiento de aguas residuales lácteas.....	45
Tabla 6.	Comparación técnica entre sistemas híbridos C/F+MF/UF y MBR.....	63-64
Tabla 7.	Producción estimada de leche en 2025 por países líderes en la industria láctea.....	72
Tabla 8.	Comparación de parámetros clave de tratamiento de aguas residuales en la industria láctea de Chile, India, Estados Unidos y Alemania.....	79
Tabla 9.	Desempeño de Coagulación–Floculación (CF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.....	87
Tabla 10.	Desempeño de Microfiltración (MF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.....	88
Tabla 11.	Desempeño de Ultrafiltración (UF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.....	89
Tabla 12.	Desempeño de Nanofiltración (NF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.....	90
Tabla 13.	Desempeño de Ósmosis Inversa (RO) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.....	91
Tabla 14.	Desempeño de Biorreactor con Membranas (MBR) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.....	92

Tabla 15.	Desempeño de CF + MF frente a indicadores ambientales, económicos y normativos.....	técnicos, y	93
Tabla 16.	Desempeño de CF + UF frente a indicadores ambientales, económicos y normativos.....	técnicos, y	94

ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto	Página
Figura 1. Sistema de tratamiento de las aguas residuales de una industria láctea..... ...	9
Figura 2. Comparación de parámetros típicos del agua residual láctea con los límites máximos establecidos por el DS-90.....	19
Figura 3. Resumen conceptual del proceso de coagulación-floculación aplicado al tratamiento de aguas residuales lácteas.....	25
Figura 4. Mapa conceptual del proceso de Microfiltración (MF) aplicado al tratamiento de aguas residuales de la industria láctea.....	30
Figura 5. Mapa conceptual de la ultrafiltración (UF) aplicada al tratamiento de aguas residuales de la industria láctea.....	35
Figura 6. Mapa conceptual de la tecnología de nanofiltración aplicada al tratamiento de aguas residuales de la industria láctea..... ...	40
Figura 7. Ósmosis inversa (RO) aplicada a aguas residuales de la industria láctea..... ...	44
Figura 8. Comparación ordinal de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) orientadas al vertido de efluentes lácteos en cuerpos de agua.....	50
Figura 9. Comparación ordinal de ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO) para la reutilización de efluentes lácteos.....	51
Figura 10. Esquema conceptual del sistema híbrido coagulación–floculación acoplada a microfiltración/ultrafiltración (MF/UF).....	59
Figura 11. Esquema de biorreactor de membranas (MBR).....	62
Figura 12. Comparación ordinal (escala Likert; 1–5) entre sistemas híbridos CF+MF y CF+UF mediante gráfico radar.....	65
Figura 13. Comparación ordinal (escala Likert; 1–5) entre sistemas híbridos CF+UF y MBR mediante gráfico radar.....	66
Figura 14. Comparación internacional de límites de descarga en efluentes de industrias lácteas: Chile, India, EE. UU. y Alemania.....	80

Figura 15. MCDM de tecnologías para vertido en industria láctea (gráfico radar). Indicadores técnicos, ambientales y económicos.	99
Figura 16. MCDM de tecnologías para reúso en industria láctea (gráfico radar). Indicadores técnicos, ambientales y económicos.....	100

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE INDUSTRIAS LÁCTEAS

TREATMENT OF WASTEWATER FROM DAIRY INDUSTRIES

Palabras claves: Aguas residuales, industria láctea, tecnologías de membrana, MCDM, sostenibilidad.

RESUMEN

La gestión de aguas residuales en la industria láctea representa un desafío ambiental relevante debido a la alta carga contaminante de materia orgánica, grasas, proteínas y nutrientes presentes en sus efluentes. Este estudio tuvo como objetivo identificar y evaluar las tecnologías convencionales, avanzadas y sistemas híbridos aplicables al tratamiento de aguas residuales en plantas lácteas medianas en Chile, integrando criterios técnicos, económicos, ambientales y normativos.

La metodología se basó en una revisión bibliográfica sistemática y en la aplicación de un análisis multicriterio (MCDM) que permitió comparar alternativas de manera integral. Los resultados muestran que, si bien la coagulación-floculación es efectiva como tratamiento primario, resulta insuficiente para cumplir con estándares de reúso. Las tecnologías de membranas, en particular la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (RO), presentan altos niveles de eficiencia y reúso, aunque con elevados costos de inversión y operación. Los sistemas híbridos, especialmente la combinación coagulación-floculación con ultrafiltración (CF+UF), ofrecen un equilibrio favorable entre eficiencia técnica, cumplimiento

normativo y viabilidad económica.

El estudio concluye que la integración de tecnologías híbridas y de membranas avanzadas constituye una alternativa robusta para la industria láctea chilena, aportando a la sostenibilidad del sector y al cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

TREATMENT OF WASTEWATER FROM DAIRY INDUSTRIES

Keywords: Wastewater, dairy industry, membrane technologies, MCDM, sustainability.

SUMMARY

Wastewater management in the dairy industry represents a significant environmental challenge due to the high pollutant load of organic matter, fats, proteins, and nutrients present in its effluents. This study aimed to identify and evaluate conventional, advanced, and hybrid technologies applicable to wastewater treatment in medium-sized dairy plants in Chile, integrating technical, economic, environmental, and regulatory criteria.

The methodology was based on a systematic literature review and the application of a multicriteria decision-making analysis (MCDM), which allowed a comprehensive comparison of alternatives. Results show that although coagulation–flocculation is effective as a primary treatment, it is insufficient to meet water reuse standards. Membrane technologies, particularly ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), and reverse osmosis (RO), achieve high efficiency and reuse potential but involve significant investment and operational costs. Hybrid systems, especially the combination of coagulation–flocculation with ultrafiltration (CF+UF), provide a favorable balance between technical efficiency, regulatory compliance, and economic feasibility.

The study concludes that the integration of hybrid and advanced membrane technologies represents a robust alternative for the Chilean dairy industry,

contributing to the sector's sustainability and compliance with current environmental regulations.

1. INTRODUCCIÓN

Según la biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2018), la crisis hídrica que enfrenta Chile, exacerbada por el rápido crecimiento demográfico y el cambio climático, ha generado una urgente necesidad de encontrar soluciones innovadoras para optimizar el uso del agua. De acuerdo con Yolanda Alberto (2023), el uso de tecnologías avanzadas en sistemas de agua potable y en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, pueden desempeñar un papel crucial en la reducción de los impactos del cambio climático en Chile.

En este contexto, la industria láctea se encuentra entre los sectores que se ven afectados por la crisis hídrica y que están adaptando sus procesos para enfrentar la escasez de agua. Según Slavov A. K. (2017), el agua desempeña un papel crucial en el procesado de la leche, ya que se utiliza en varios pasos de las líneas tecnológicas, como la limpieza, el lavado, la desinfección, el calentamiento y la refrigeración. El uso extensivo de agua en el procesado de lácteos contribuye al gran volumen de aguas residuales producidas. Ante la necesidad de reducir su huella hídrica y garantizar la sostenibilidad de sus operaciones, las empresas lácteas están implementando tecnologías más eficientes y sistemas de reciclaje de agua.

Además, según País Circular (2020), la producción lechera también se ve afectada por los efectos del cambio climático, como la disponibilidad irregular de pastos debido a las sequías y las inundaciones. Esta interconexión entre la crisis hídrica y la industria láctea resalta la importancia de adoptar prácticas

sustentables que no solo mitiguen el impacto ambiental, sino que también aseguren la viabilidad económica a largo plazo del sector lácteo en Chile.

A nivel mundial, el consumo de agua en la industria láctea varía considerablemente según la eficiencia de las plantas de producción y las tecnologías implementadas. Se estima que este consumo oscila entre 1 y 10 litros de agua por kilogramo de leche procesada, dependiendo del tipo de instalación y los sistemas de tratamiento utilizados (Ecopreneur SA.,2023).

En Chile, el consumo de agua en la industria láctea varía significativamente según la región y las prácticas implementadas. Se estima que la generación de efluentes oscila entre 5 y 20 litros de agua por litro de leche procesada, siendo superior a los estándares internacionales (Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA], 2011). En el sur del país, un estudio determinó un consumo promedio de 5,8 litros de agua por litro de leche producida, con más del 50% destinado al lavado de instalaciones (Martínez-Lagos, J., & Salazar, F., 2015). Estos valores reflejan la necesidad de implementar estrategias que optimicen el uso del agua en la industria láctea chilena, promoviendo procesos más eficientes y sostenibles. En este contexto, normativas como el Decreto Supremo N°90/2000 juegan un papel clave en la regulación ambiental. Esta normativa establece límites máximos para la descarga de residuos líquidos en cuerpos de agua marinos y continentales, con el objetivo de minimizar la contaminación y fomentar prácticas responsables en el manejo de efluentes industriales (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2001).

Estudios recientes han demostrado que la implementación de tecnologías de recuperación y reciclaje de agua en plantas lácteas puede reducir significativamente el consumo de agua potable. Por ejemplo, Nestlé, en su planta de Jalisco, México, implementó el proyecto "Cero Agua", que utiliza tecnologías avanzadas para tratar y reutilizar el agua extraída de la leche durante procesos como la evaporación y condensación. Esta iniciativa ha permitido que la planta funcione sin consumir agua de fuentes externas para ciertos procesos, reutilizando el agua recuperada en actividades como torres de refrigeración y limpieza de equipos (Veolia Water Technologies, 2017).

Según Gaibor, J. (2014), la industria láctea produce una considerable cantidad de aguas residuales que concentran la mayoría de los contaminantes resultantes de sus procesos de producción. Esta afirmación se ve respaldada por los datos recopilados en la Tabla 1, que muestra las propiedades del agua residual de la industria lechera.

Tabla 1. Propiedades del agua residual de la industria lechera.

Parámetro	Rango	Unidades
DBO5	1000 - 5000	mg/L
DQO	1000 - 9000	mg/L
Sólidos suspendidos	1000 - 5000	mg/L
Sólidos totales	2000 - 8000	mg/L
pH	6.0 – 9.0	-

Nitrógeno	20 - 100	mg/L
Fósforo	10 - 50	mg/L
Cloruros	104*	mg/L
Grasas y aceites	500 - 3000	mg/L

Fuente: Khojare et al.,2005; Slavov A. K., 2017; Borges Tabelini et al., 2023.

Esta conexión entre la crisis hídrica y la industria láctea subraya la importancia de adoptar prácticas sustentables en la gestión del agua. Optimizar el uso del agua mediante el empleo de equipos avanzados y una operación adecuada, como sugiere Tuset (2023), no solo puede reducir el impacto ambiental de la industria láctea, sino también contribuir a la resiliencia del sector frente a la escasez hídrica y otros desafíos derivados del cambio climático.

La industria láctea representa una importante parte de la industria agroalimentaria y esta genera una gran cantidad de aguas residuales. Para mitigar este impacto, las plantas de tratamiento de efluentes lácteos más actuales se han ideado con el objetivo de reducir la cantidad de residuos que son liberados al medio ambiente buscando reciclar y reutilizar los desechos generados en el proceso, así como aprovechar al máximo los recursos presentes en los productos lácteos (Ritambhara et al., 2019).

Para optimizar el manejo de residuos lácteos, es necesario combinar métodos tradicionales y nuevas tecnologías en el tratamiento de residuos lácteos lo que permitirá obtener resultados altamente eficientes y productivos. Un esquema de lo anterior dicho se aprecia en la Figura 1 que se muestra a continuación.

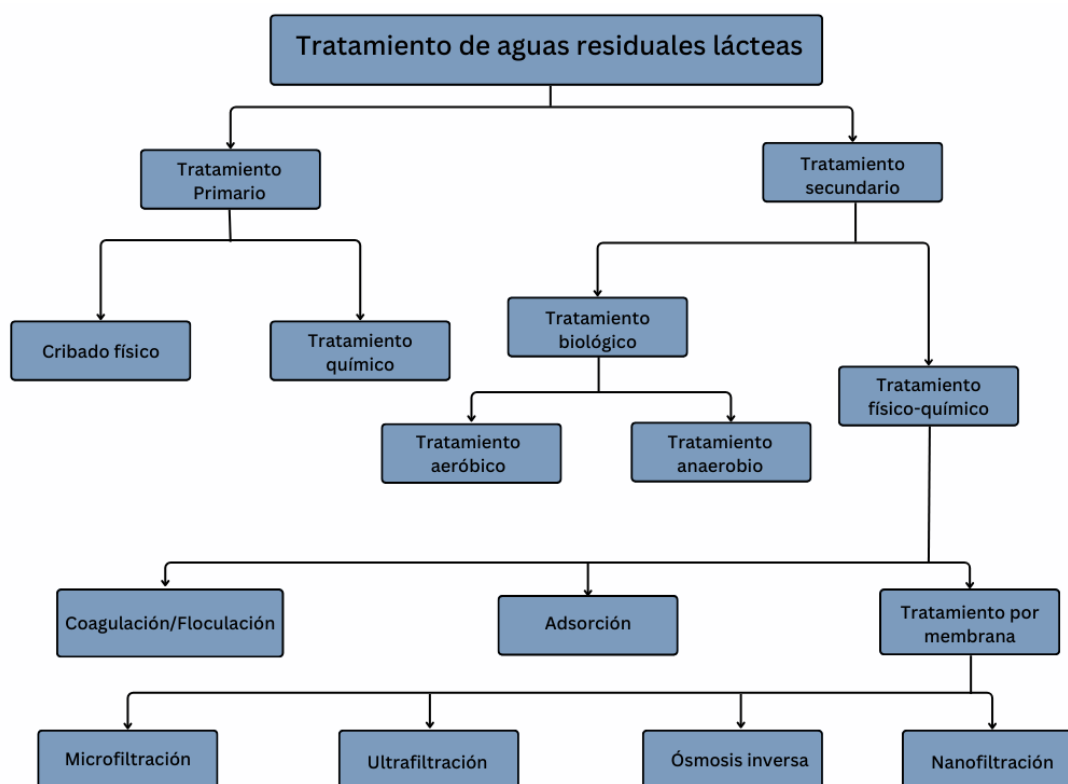


Figura 1. Sistema de tratamiento de las aguas residuales de una industria láctea. (Traducción y adaptación de Ritambhara et al., 2019).

En este trabajo se propone evaluar, mediante una revisión bibliográfica, las tecnologías convencionales y avanzadas aplicables al tratamiento de aguas residuales en la industria láctea, con especial énfasis en instalaciones de tipo mediano. El objetivo es identificar soluciones eficaces, sostenibles y viables que puedan ser implementadas en el contexto chileno, fortaleciendo así la gestión del recurso hídrico y contribuyendo a una producción más responsable ambientalmente.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar, mediante revisión bibliográfica, las tecnologías convencionales y avanzadas aplicadas al tratamiento de aguas residuales de la industria láctea de tipo mediano, con el fin de identificar soluciones técnica y económicamente viables que puedan ser aplicadas en el contexto chileno, fortaleciendo la gestión ingenieril del recurso hídrico.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar la eficacia del proceso de coagulación-floculación en la remoción de contaminantes de aguas residuales lácteas.
- Estudiar el desempeño de tecnologías con membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa) en la reducción de carga orgánica y sólidos, evaluando su viabilidad técnica, costos operativos y potencial de reúso del agua tratada.
- Comparar normativas sobre calidad de aguas tratadas en Chile, India, Estados Unidos y Alemania, enfocándose en parámetros clave como DBO₅, DQO, pH y sólidos suspendidos.
- Definir indicadores técnicos y ambientales para evaluar sistemas de tratamiento en la industria láctea.

3. METODOLOGÍA

Se desarrollará una revisión bibliográfica sistemática basada en artículos científicos, informes técnicos y normativas oficiales, publicados entre 2010 y 2025. Se consultarán bases de datos como Scopus, Google Scholar y ScienceDirect.

La metodología se dividirá en cinco etapas principales:

1. Recolección de información: Utilizando palabras clave como "aguas residuales lácteas", "tratamiento con membranas", "coagulación-floculación", "normativa efluentes industria láctea", entre otras. Se priorizarán fuentes revisadas por pares y documentos técnicos oficiales.
2. Análisis del proceso de coagulación-floculación: Se identificarán estudios y experiencias que evalúen esta tecnología en contextos lácteos, clasificando resultados según tipo de contaminantes removidos, eficiencia promedio, condiciones operativas y limitaciones en su aplicación.
3. Evaluación crítica de las tecnologías con membranas: Se estudiarán casos que reporten eficiencia de remoción, costos de instalación y operación, requerimientos energéticos y grado de implementación en plantas lácteas. Se priorizará el análisis desde una perspectiva ingenieril para plantas medianas.
4. Comparación normativa internacional: Se revisarán y contrastarán los marcos regulatorios ambientales sobre efluentes lácteos de Chile, India,

Estados Unidos y Alemania, con el propósito de identificar estándares internacionales exigentes, brechas regulatorias y posibles mejoras que puedan ser implementadas en Chile.

5. Síntesis de indicadores preliminares: A partir del análisis de tecnologías y normativas, se propondrán indicadores técnicos y ambientales relevantes para evaluar de forma integrada la eficiencia, sostenibilidad y aplicabilidad de los sistemas de tratamiento estudiados.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Industria láctea en el contexto chileno

La industria láctea en Chile es un pilar fundamental de la agroindustria nacional. En 2018, se produjeron aproximadamente 2.550 millones de litros de leche cruda, de los cuales el 85% fue recibido por plantas procesadoras de la industria láctea mayor y el 7% por la industria láctea menor. Esta producción se destina tanto al consumo interno como a la exportación de diversos productos lácteos (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2019).

El sector lácteo tiene una relevancia económica significativa, especialmente en las regiones de Los Ríos y Los Lagos, donde se concentra la mayor parte de la producción lechera. Estas regiones albergan miles de familias de productores de leche y numerosas plantas procesadoras, incluyendo empresas nacionales e internacionales. Además, en 2019, el consumo de lácteos en Chile alcanzó un valor de 3.370 millones de dólares, evidenciando su importancia en la economía nacional (Consortio Lechero, 2023; IVACE, 2020).

La industria láctea chilena está compuesta por una diversidad de productores, desde pequeños hasta grandes. Un estudio realizado en 2003-2004 analizó 39 explotaciones lecheras en las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, proporcionando una caracterización detallada de las condiciones productivas y económicas de medianos y grandes productores en estas áreas (Lerdon & Aspe, 2010).

Este patrón de concentración productiva intensifica los desafíos ambientales en zonas donde los sistemas hídricos pueden verse afectados por el volumen y características de los efluentes generados.

La gestión de aguas residuales es un desafío ambiental crítico en la industria láctea. Las aguas residuales generadas pueden tener un alto impacto ambiental si no se tratan adecuadamente, por lo que se ha trabajado intensamente en la implementación de tecnologías de tratamiento eficientes dentro de las plantas procesadoras para asegurar la calidad del efluente y mitigar estos impactos (Consortio Lechero, 2023).

Este problema se agrava en el contexto de crisis hídrica que afecta al país desde hace más de una década. Entre 2010 y 2015, Chile experimentó una mega sequía que forzó a diversos sectores productivos a replantear el uso del agua (Gutiérrez-Gómez et al., 2019). En este escenario, la industria láctea ha comenzado a adoptar tecnologías orientadas a la eficiencia hídrica y la sostenibilidad ambiental. Esta transformación no solo busca reducir su huella hídrica, sino también garantizar su viabilidad operativa y económica en un entorno de creciente escasez del recurso.

4.2. Características del agua residual en la industria láctea

Las aguas residuales generadas por la industria láctea son altamente contaminantes debido a la naturaleza de sus procesos, donde el agua se utiliza intensivamente en etapas como limpieza, desinfección, calentamiento y enfriamiento de equipos (Slavov, 2017). Esta actividad produce efluentes con

una elevada carga de contaminantes orgánicos e inorgánicos, cuya composición varía según el tipo de producto elaborado y las condiciones operativas de cada planta (Gaibor, 2014).

Entre los componentes más relevantes destacan los residuos orgánicos provenientes de leche y derivados (como proteínas, grasas y lactosa), grasas y aceites utilizados en el proceso, sólidos en suspensión y nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, que suelen tener su origen en detergentes y agentes desinfectantes (Khojare et al., 2005; Borges Tabelini et al., 2023).

A continuación, en la Tabla 2, se resumen las principales etapas del proceso productivo lácteo junto con los contaminantes generados y el tipo de residuo asociado, lo que permite comprender el origen de la carga contaminante presente en los efluentes.

Tabla 2. Origen y tipo de contaminantes en aguas residuales de la industria láctea.

Etapa del proceso	Contaminantes generados	Tipo de residuo
Limpieza de equipos	Detergentes, grasas, proteínas	Compuestos orgánicos e inorgánicos
Pasteurización y homogeneización	Grasa, lactosa, proteínas	Residuos orgánicos
Desuerado y fabricación de quesos	Suero, sólidos en suspensión	Alta carga orgánica y SST
Lavado de tanques y pisos	Restos de leche, agua con químicos	Materia orgánica y químicos
Desinfección	Agentes biocidas y desinfectantes	Compuestos químicos y nutrientes (N, P)

Descargas accidentales	Leche o productos lácteos no aprovechados	Carga orgánica concentrada
---------------------------	--	-------------------------------

Fuente: Gaibor, 2014; Ritambhara et al., 2019; Slavov, 2017 y Borges Tabelini et al., 2023.

Los principales parámetros críticos que se deben controlar en el tratamiento de aguas residuales lácteas incluyen:

- DBO₅ (Demanda Biológica de Oxígeno): indica la cantidad de materia orgánica biodegradable presente. Valores entre 1.000 y 5.000 mg/L reflejan una carga significativa.
- DQO (Demanda Química de Oxígeno): mide la materia orgánica total, biodegradable o no, alcanzando valores de hasta 9.000 mg/L.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST): entre 1.000 y 5.000 mg/L, pueden afectar procesos biológicos si no se remueven adecuadamente.
- pH: generalmente varía entre 6,0 y 9,0, lo que puede influir en la eficiencia de los tratamientos físicos y químicos.
- Nutrientes (N y P): el nitrógeno (20–100 mg/L) y el fósforo (10–50 mg/L) contribuyen a la eutrofización si no se eliminan antes de la descarga.
- Grasas y aceites: presentes en concentraciones entre 500 y 3.000 mg/L, tienden a formar películas superficiales que dificultan la transferencia de oxígeno en tratamientos biológicos.

A continuación, se presenta la Tabla 3 que ampliada con parámetros físico-químicos y microbiológicos comúnmente encontrados en las aguas residuales generadas por la industria láctea.

Tabla 3. Parámetros comunes en aguas residuales de la industria láctea.

Parámetro	Rango típico	Unidades	Descripción técnica / impacto ambiental
DBO ₅	1.000 – 5.000	mg/L	Materia orgánica biodegradable
DQO	2.000 – 9.000	mg/L	Materia orgánica total (biodegradable y no)
SST	1.000 – 5.000	mg/L	Sólidos que afectan procesos biológicos y físicos
TDS	800 – 2.000	mg/L	Sales disueltas, afectan ósmosis y vida acuática
Conductividad eléctrica	1.500 – 3.000	μS/cm	Indicador indirecto de salinidad y carga iónica
Turbidez	100 – 500	NTU	Afecta la claridad del agua y eficiencia de desinfección
Grasas y aceites	500 – 3.000	mg/L	Impiden transferencia de oxígeno
pH	6,0 – 9,0	—	Influye en procesos químicos y biológicos
Nitrógeno total	20 – 100	mg/L	Nutriente causante de eutrofización
Fósforo total	10 – 50	mg/L	Nutriente clave en proliferación algal
Coliformes fecales	10 ⁴ – 10 ⁶	NMP/100 mL	Indicadores de contaminación microbiológica
Temperatura	20 – 40	°C	Puede alterar procesos biológicos en tratamiento

Fuente: Khojare et al., 2005; Slavov, 2017; Ritambhara et al., 2019 y Borges Tabelini et al., 2023.

El impacto de estas aguas residuales no tratadas puede ser severo: eutrofización de cuerpos de agua, mortalidad de organismos acuáticos por disminución del oxígeno disuelto, olores desagradables, proliferación de vectores patógenos y afectación del suelo si se usan para riego sin tratamiento (Ritambhara et al., 2019; Tuset, 2023).

De acuerdo con los parámetros presentados en la Tabla 3, se observa que los efluentes lácteos presentan concentraciones de contaminantes muy por encima de los límites establecidos en la normativa chilena (DS N°90/2000). Esta situación se aprecia de forma comparativa en la Figura 2, donde se muestran los rangos típicos de aguas residuales lácteas en contraste con los valores máximos permitidos por la regulación vigente.

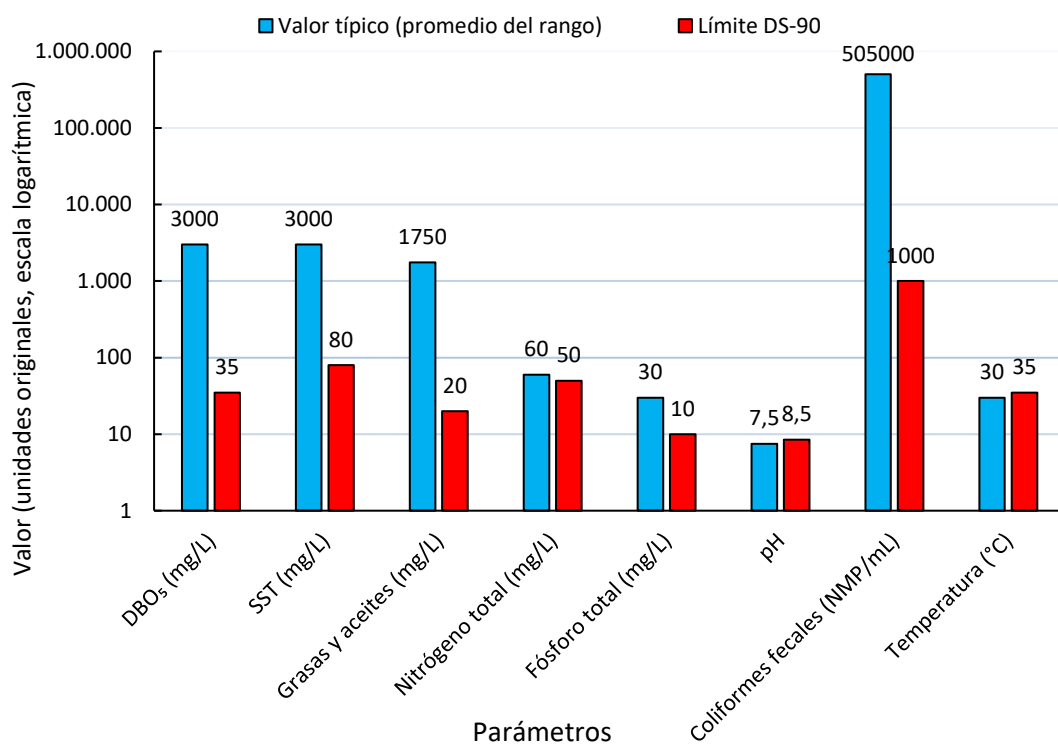


Figura 2. Comparación de parámetros típicos del agua residual láctea con los límites máximos establecidos por el DS-90. (Elaboración propia a partir de Khojare et al., 2005; Slavov, 2017; Ritambhara et al., 2019; Borges Tabelini et al. 2023; Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2001).

Como se observa en la Figura 2, las concentraciones típicas de parámetros críticos en las aguas residuales de la industria láctea superan ampliamente los valores permitidos por la normativa chilena (DS N°90/2000). Este contraste evidencia la magnitud del desafío ambiental asociado a este tipo de efluentes y la necesidad de implementar tecnologías de tratamiento que aseguren el cumplimiento regulatorio. Además, la brecha observada subraya la importancia de considerar no solo la reducción de contaminantes orgánicos y nutrientes, sino también estrategias de reutilización que permitan mitigar la presión sobre los recursos hídricos en contextos de escasez.

Debido a estos riesgos, resulta indispensable aplicar tratamientos que consideren la remoción eficiente de estos parámetros, asegurando la sostenibilidad ambiental y el cumplimiento de la normativa vigente. En el caso chileno, destacan el Decreto Supremo N°90, que regula las descargas de residuos líquidos a cuerpos de agua superficiales (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2001); el Decreto Supremo N°46, que establece los requisitos para vertidos en aguas subterráneas (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2003); y el Decreto Supremo N°609, aplicable cuando el efluente se descarga al sistema de alcantarillado (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 1998). Además, en el contexto del reuso de aguas, la Ley N°21.075 regula la recolección, tratamiento y utilización de aguas grises, incluyendo criterios sanitarios y técnicos para su aplicación (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2018).

Frente a estos desafíos, la industria láctea a nivel internacional ha comenzado a incorporar tecnologías emergentes como los biorreactores de membrana (MBR), sistemas de oxidación avanzada y procesos de ósmosis inversa. Estas soluciones, aunque aún poco comunes en el contexto chileno, representan una tendencia global hacia sistemas de tratamiento más eficientes y con capacidad de reutilización del agua tratada (Khojare et al., 2005; Kaur, 2021). Su estudio y evaluación comparativa con tecnologías físicas y químicas tradicionales, como la coagulación-floculación, resulta clave para definir estrategias sostenibles en contextos de escasez hídrica como el chileno.

4.3. Tecnologías convencionales de tratamiento

Las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales en la industria láctea han sido fundamentales para la reducción de carga orgánica y sólidos suspendidos antes de su vertido o tratamiento avanzado. Estas tecnologías comprenden una serie de etapas físicas, químicas y biológicas que, de forma secuencial, permiten reducir significativamente el impacto ambiental de los efluentes generados (Slavov, 2017; Arango & Garcés, 2007). Generalmente, el tratamiento comienza con una etapa de pretratamiento físico que incluye rejas, desarenadores y tamices rotatorios, cuyo objetivo es remover sólidos gruesos y materiales sedimentables. Luego, se aplica un tratamiento primario que puede incluir sedimentadores o sistemas de flotación por aire disuelto (DAF), que permiten eliminar sólidos en suspensión, grasas y aceites presentes en la corriente de agua residual (Iannelli, 2020; CONAMA, 2001).

Posteriormente, se emplean procesos biológicos aerobios, como los sistemas de lodos activados convencionales, los cuales son ampliamente utilizados debido a su eficacia para reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). En estos sistemas, microorganismos aeróbicos degradan la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual, produciendo un licor mixto que luego es separado en un sedimentador secundario (Slavov, 2017; Ritambhara et al., 2019).

Estas tecnologías tradicionales, aunque ampliamente probadas y utilizadas, presentan ciertas limitaciones cuando se enfrentan a cargas elevadas de

materia orgánica, compuestos recalcitrantes o requerimientos estrictos de calidad del efluente. Por esta razón, en los últimos años se ha incrementado el interés por el uso de tecnologías avanzadas o híbridas que permitan una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes (Arango & Garcés, 2007; Slavov, 2017).

4.3.1. Coagulación-floculación como tratamiento primario

La coagulación-floculación es un proceso esencial en el tratamiento de aguas residuales, diseñado para eliminar partículas suspendidas, coloides y sustancias disueltas que no pueden ser eliminadas mediante sedimentación simple debido a su pequeño tamaño y estabilidad en suspensión. La primera etapa, la coagulación, consiste en la adición de coagulantes químicos como sales de aluminio (por ejemplo, sulfato de aluminio) o de hierro (como el cloruro férrico). Estos compuestos poseen cargas positivas que neutralizan las cargas negativas de las partículas suspendidas en el agua, reduciendo las fuerzas de repulsión entre ellas y facilitando su aglomeración. Esta neutralización permite la formación de microfloculos a partir de partículas que anteriormente se mantenían dispersas e inestables (Jiang, 2015; Bratby, 2016).

A continuación, en la etapa de floculación, se aplica una agitación lenta y controlada para promover el encuentro entre estos microfloculos, permitiendo que se unan y formen flóculos de mayor tamaño y densidad. En esta fase es común el uso de floculantes, como polímeros orgánicos, que actúan como puentes entre partículas, favoreciendo la cohesión del material suspendido.

Estos flóculos más grandes sedimentan con mayor facilidad, permitiendo su posterior remoción mediante procesos de decantación o flotación. La eficiencia de todo el proceso depende críticamente de factores como el pH, la dosis de coagulante y las velocidades de mezcla. Un control adecuado de estos parámetros garantiza la eficacia del tratamiento, evita el uso excesivo de químicos y optimiza la formación de flóculos (Duan & Gregory, 2003; Bratby, 2016).

A continuación, se presentan las principales ventajas y limitaciones de este tratamiento, resumidas en la Tabla 4.

Tabla 4. Ventajas y limitaciones del proceso de coagulación-floculación aplicado al tratamiento de aguas residuales.

Ventajas	Limitaciones
Eficiencia en la remoción de contaminantes como sólidos suspendidos, materia orgánica y metales pesados (Jiang, 2015).	Generación de lodos que requieren manejo adecuado y aumentan los costos operativos (Bratby, 2016).
Versatilidad ante distintas calidades de agua y tipos de contaminantes (Bratby, 2016).	Dependencia de condiciones como pH, temperatura y tipo de carga contaminante (Duan & Gregory, 2003).
Mejora la eficiencia de procesos posteriores como filtración y desinfección (Bratby, 2016).	Uso de productos químicos que implican costos y precauciones de seguridad (Bratby, 2016).

La combinación de coagulación-floculación con tecnologías de membrana, como la ultrafiltración (UF) o la ósmosis inversa (RO), ha demostrado ser una estrategia altamente eficiente para el tratamiento de aguas residuales. La coagulación actúa como pretratamiento al reducir la carga de sólidos y materia

orgánica, lo que disminuye el ensuciamiento de las membranas, mejora su rendimiento y prolonga su vida útil (Costa et al., 2024). Estudios recientes han evidenciado que la aplicación de preoxidación seguida de coagulación-floculación antes de la UF-RO no solo mejora la calidad del agua tratada, sino que también estabiliza la permeabilidad de las membranas frente a las variaciones estacionales del agua bruta (Costa et al., 2024).

En la industria láctea, la coagulación-floculación ha sido aplicada de forma efectiva para tratar efluentes con altas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, grasas y aceites. Un estudio realizado por Kushwaha et al. (2010) demostró que el uso de coagulantes inorgánicos como el cloruro férrico logra una reducción significativa de la demanda química de oxígeno (DQO) y de los sólidos suspendidos totales (SST). Más recientemente, Bortoluzzi et al. (2022) evaluaron la combinación de coagulación química con sistemas de membrana en el tratamiento de aguas residuales lácteas, logrando eficiencias cercanas al 100 % en parámetros como turbidez, color, DQO y carbono orgánico total (TOC). Estos resultados confirman que la coagulación-floculación, ya sea como tratamiento primario o en combinación con otras tecnologías, representa una estrategia efectiva y adaptable en la gestión de efluentes lácteos, especialmente en contextos que exigen altos estándares de calidad y sostenibilidad ambiental.

En síntesis, la coagulación-floculación constituye una tecnología versátil y efectiva para el tratamiento primario de efluentes lácteos, especialmente cuando se utiliza en combinación con otras etapas de tratamiento físico-

químico o de membranas. Un resumen de los principales aspectos de este proceso se presenta en la Figura 3.

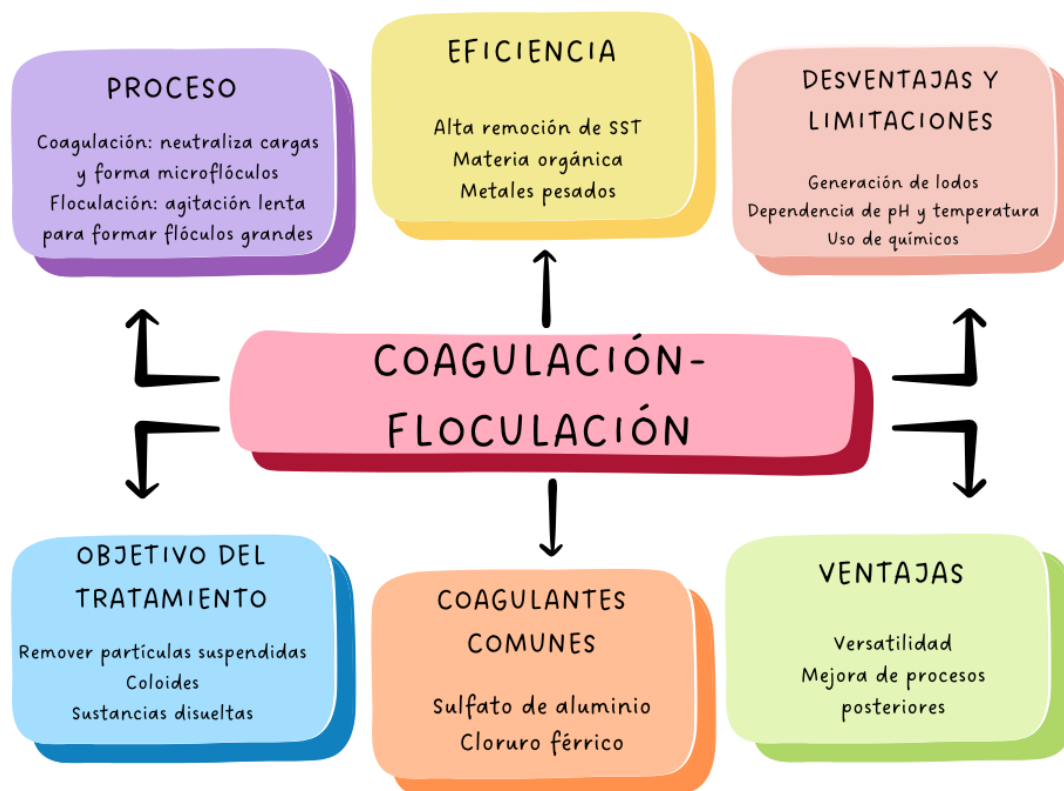


Figura 3. Resumen conceptual del proceso de coagulación-floculación aplicado al tratamiento de aguas residuales lácteas. (Elaboración propia a partir de Jiang, 2015; Bratby, 2016; Duan & Gregory, 2003; Bortoluzzi et al., 2022; Kushwaha et al., 2010).

4.4. Tecnologías avanzadas: tratamiento con membranas

El uso de membranas en el tratamiento de aguas residuales ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en una de las tecnologías más eficientes para la separación de contaminantes a nivel molecular. Las membranas permiten la eliminación de sólidos suspendidos, microorganismos, materia orgánica y solutos disueltos, mejorando la calidad del agua tratada y permitiendo su reutilización en diversas aplicaciones

industriales y ambientales (Shannon et al., 2008). Este tipo de tecnología se basa en la filtración por presión, donde el agua se fuerza a través de una membrana semipermeable que retiene los contaminantes, dejando pasar el agua limpia o el permeado. Las membranas se diferencian según el tamaño de sus poros y las propiedades que filtran, y se clasifican principalmente en microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO), que varían en términos de eficiencia y capacidad de remoción de contaminantes (Baker, 2004).

Las membranas ofrecen varias ventajas sobre los procesos convencionales de tratamiento, como la precisión en la remoción de contaminantes y la posibilidad de operar a escalas más pequeñas sin comprometer la eficiencia. Además, permiten una alta flexibilidad operativa, ya que se pueden adaptar a diferentes tipos de aguas residuales dependiendo de la industria (Al-Tayawi et al., 2023). Sin embargo, también presentan desafíos, tales como el ensuciamiento de las membranas y el alto consumo energético requerido, especialmente en procesos como la ósmosis inversa (Maeda, Y., 2024). A pesar de estos desafíos, las membranas siguen siendo una tecnología clave en la mejora de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, y su aplicación se ha expandido en sectores como la industria láctea, donde se enfrentan altos volúmenes de aguas residuales con altos contenidos de sólidos suspendidos y materia orgánica (Liu et al., 2017). En este contexto, el uso de membranas no solo mejora la calidad del efluente, sino que también contribuye a la recuperación y reutilización de agua, algo crucial en regiones con escasez

de este recurso.

4.4.1. Microfiltración (MF): Principios, eficiencia y aplicación en aguas residuales de la industria láctea

La microfiltración (MF) es una tecnología de separación por membranas ampliamente utilizada como tratamiento primario o intermedio en el manejo de aguas residuales industriales, especialmente en el sector alimentario y lácteo. Su eficiencia para remover sólidos y microorganismos, junto a su bajo consumo energético y simplicidad operativa, la posicionan como una alternativa clave dentro de los sistemas avanzados de tratamiento por membranas (Baker, 2012; Ritambhara et al., 2019).

Esta tecnología se basa en el uso de membranas porosas con tamaños de poro que oscilan entre 0,1 y 10 micrómetros, capaces de retener partículas en suspensión, bacterias y algunas células, mientras permiten el paso del agua y de solutos disueltos de bajo peso molecular. Aunque no es eficaz para eliminar virus o compuestos orgánicos disueltos, su función como etapa de clarificación o pretratamiento resulta fundamental para proteger tecnologías más exigentes como la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF) o la ósmosis inversa (RO) (Baker, 2012; Figueroa et al., 2021). En el contexto de la industria láctea, la microfiltración se utiliza principalmente en el tratamiento inicial de efluentes con alta carga de sólidos, grasa y proteínas, en la clarificación de productos alimentarios como la leche, y en la recuperación de soluciones de limpieza en sistemas CIP, separando compuestos residuales antes de su descarga o

reutilización (Ritambhara et al., 2019; CONAMA, 2001).

El proceso de microfiltración se basa en la filtración por presión, generalmente baja (entre 0,1 y 2 bar), que impulsa el líquido a través de una membrana microporosa. La retención ocurre por exclusión de tamaño, separando eficazmente los contaminantes físicos del agua. Dependiendo del diseño del sistema, el flujo puede disponerse de manera frontal o en forma cruzada, siendo esta última más eficiente para reducir el ensuciamiento o fouling. Las membranas suelen estar fabricadas en configuraciones de fibra hueca, cartucho o tubular, con materiales poliméricos como polisulfona o PVDF, seleccionados según el tipo de contaminante, el caudal requerido y las condiciones de operación (Ribeiro, 2007).

En cuanto a su eficiencia, la microfiltración es eficaz para la remoción de sólidos suspendidos totales, turbidez, bacterias y grasas. Diversos estudios reportan remociones superiores al 99 % en sólidos y microorganismos indicadores como *E. coli*. Además, se ha observado que puede reducir la demanda química de oxígeno (DQO) entre un 20 y un 40 %, dependiendo del tipo de agua tratada y del pretratamiento previo. En sistemas integrados, como configuraciones MF/RO, se han logrado remociones de hasta un 94 % de nitrógeno Kjeldahl total y un 84 % de carbono orgánico total (TOC), mejorando notablemente la calidad del efluente final (Ritambhara et al., 2019; Figueroa et al., 2021).

La tecnología de microfiltración se distingue por su bajo consumo energético, el cual se sitúa generalmente entre 0,1 y 0,3 kWh por metro cúbico tratado.

Este bajo requerimiento se debe a su operación a baja presión, lo que también implica una menor exigencia en infraestructura y equipos auxiliares. En términos económicos, presenta una inversión inicial y costos operativos inferiores en comparación con tecnologías de mayor presión. Estos costos incluyen el reemplazo periódico de membranas, el uso moderado de productos químicos para limpieza, y un mantenimiento relativamente sencillo (Baker, 2012).

Desde una perspectiva técnica, el funcionamiento adecuado de un sistema de microfiltración requiere una alimentación constante con presión controlada, monitoreo de variables como la presión transmembrana y el caudal de permeado, y la implementación de rutinas de limpieza que garanticen la vida útil de las membranas. El fouling sigue siendo uno de los principales desafíos operacionales. Su aparición puede deberse a la acumulación de materia orgánica, sales precipitadas, microorganismos o coloides, y provoca la disminución del caudal y aumento de la presión. Para mitigar estos efectos, es indispensable aplicar pretratamientos adecuados, como filtración gruesa o sedimentación, así como limpiezas periódicas mediante métodos químicos o hidráulicos (Ribeiro, 2007; Figueroa et al., 2021).

Finalmente, el bajo consumo energético de la microfiltración, combinado con su eficiencia en la remoción de partículas y su sencillez de operación, la convierten en una opción atractiva para sistemas de tratamiento descentralizados, pequeñas industrias o como etapa previa a procesos más complejos. Su aplicación en la industria láctea no solo contribuye al

cumplimiento normativo ambiental, sino que también mejora la eficiencia global de los sistemas de tratamiento al prolongar la vida útil de tecnologías posteriores de mayor exigencia.

En síntesis, la microfiltración (MF) constituye una alternativa eficaz para la clarificación de efluentes lácteos, destacando por su simplicidad operativa, bajo consumo energético y capacidad de remover sólidos suspendidos, bacterias y grasas. Además, se emplea como etapa de pretratamiento para proteger tecnologías de membranas más avanzadas. Un resumen de los principales aspectos de este proceso se presenta en la Figura 4.



Figura 4. Mapa conceptual del proceso de Microfiltración (MF) aplicado al tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. (Elaboración propia a partir de Baker 2012; Ritambhara et al. 2019; Figueroa et al. 2021 y CONAMA 2001).

4.4.2. Ultrafiltración (UF): Principios, funcionamiento y aplicación en aguas residuales de la industria láctea

La ultrafiltración (UF) es una tecnología de separación por membranas que opera mediante presión hidráulica moderada para retener compuestos de mayor tamaño molecular, como proteínas, grasas, coloides, polisacáridos, bacterias y virus. Utiliza membranas con un tamaño de poro comprendido entre 0,01 y 0,1 micrómetros, lo que le permite ofrecer una mayor capacidad de remoción que la microfiltración, pero sin alcanzar el nivel de selectividad de tecnologías como la nanofiltración o la ósmosis inversa (Baker, 2012; Figueroa et al., 2021). Su posición intermedia dentro del espectro de tecnologías de membrana le otorga un equilibrio valioso entre eficiencia de tratamiento y costos energéticos razonables.

En la industria láctea, la UF tiene un rol fundamental tanto en el tratamiento de aguas residuales como en procesos de valorización de subproductos. Su capacidad para retener sólidos suspendidos finos y compuestos orgánicos complejos la convierte en una herramienta eficaz para clarificar efluentes con alta carga contaminante, facilitar el posterior uso de tecnologías más selectivas, y concentrar proteínas o fracciones bioactivas presentes en el suero. Además, permite reducir significativamente la carga orgánica del agua tratada, disminuyendo la demanda bioquímica y química de oxígeno, y mejorando la calidad del efluente final (Ritambhara et al., 2019; Ahmed et al., 2023).

El proceso de ultrafiltración se basa en la aplicación de una presión moderada,

que oscila entre 2 y 6 bar, suficiente para vencer la resistencia de la membrana sin requerir equipos de alta presión. La separación ocurre por exclusión de tamaño y, en menor medida, por interacción entre los solutos y la superficie de la membrana. El fluido se divide en una corriente de permeado, que contiene agua y solutos de bajo peso molecular, y un retentado con las partículas retenidas. Las membranas empleadas pueden ser de polisulfona, PVDF, acetato de celulosa o cerámica, y presentarse en configuraciones de fibra hueca, plana o espiralada, dependiendo del tipo de aplicación y del nivel de ensuciamiento esperado (Figuroa et al., 2021; Yordanov & Kolev, 2020).

En términos de rendimiento, la UF ofrece una alta eficiencia en la remoción de compuestos orgánicos y microbiológicos. Se ha reportado que puede eliminar más del 99 % de bacterias y virus, y lograr remociones de DBO entre 60 y 85 %, y de DQO en rangos de 70 a 90 %. Asimismo, la remoción de aceites y grasas puede superar el 95 %, siendo una opción ideal para tratar efluentes provenientes de la limpieza de equipos en plantas lácteas (Figuroa et al., 2021; Ribeiro, 2007). Su capacidad para generar un permeado de alta calidad microbiológica la convierte en una tecnología adecuada tanto para tratamiento como para reutilización de agua dentro del mismo proceso industrial.

El costo operativo de la UF depende del tipo de membrana utilizada, del volumen tratado y de la calidad del influente. Las membranas poliméricas, aunque más económicas, suelen requerir recambio cada 2 o 3 años, mientras que las membranas cerámicas presentan una inversión inicial más alta, pero una vida útil que puede superar los 5 o 6 años. Los costos específicos de

operación se estiman entre 0,30 y 0,60 USD por metro cúbico tratado, incluyendo consumo energético, productos químicos de limpieza, reemplazo de membranas y mantenimiento del sistema (Ahmed et al., 2023; Figueroa et al., 2021).

El fouling o ensuciamiento de membranas es uno de los desafíos técnicos más relevantes en la operación de sistemas UF. Este fenómeno puede deberse a la acumulación de materia orgánica, biopelículas, sales precipitadas o sólidos coloidales, lo que reduce el caudal de permeado y aumenta la presión de operación. Para controlar el fouling, se implementan rutinas de retrolavado, limpieza química in situ y pretratamientos del influente que minimicen la concentración de compuestos críticos. Además, los sistemas modernos incorporan sensores de presión, caudal y turbidez que permiten anticipar problemas y realizar ajustes operativos preventivos (Zuriaga et al., 2019; Ribeiro, 2007).

Desde el punto de vista energético, la UF se ubica en un nivel medio dentro del espectro de tecnologías de membrana, con un consumo estimado entre 0,2 y 0,5 kWh por metro cúbico tratado. Este valor es superior al de la microfiltración, pero considerablemente menor que el de la nanofiltración o la ósmosis inversa. La eficiencia energética se puede mantener dentro de márgenes razonables cuando se cuenta con sistemas de limpieza adecuados y se evita el sobreensuciamiento. La UF resulta especialmente útil en esquemas de tratamiento donde se busca un equilibrio entre calidad del agua, eficiencia operativa y sostenibilidad del proceso (Ahmed et al., 2023; Yordanov

& Kolev, 2020).

En definitiva, la ultrafiltración se presenta como una tecnología versátil y eficiente, que cumple un doble propósito en la industria láctea: contribuir a la reducción de contaminantes en los efluentes y permitir la recuperación de fracciones valiosas en los subproductos. Su integración en sistemas de tratamiento y producción contribuye a mejorar el desempeño ambiental y económico de las plantas, alineándose con los principios de sostenibilidad y optimización del uso del agua.

En el contexto del tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, la ultrafiltración (UF) constituye una tecnología avanzada de membranas que opera mediante la exclusión por tamaño y presión moderada. Este proceso permite una alta eficiencia en la remoción de bacterias, virus, grasas y compuestos orgánicos, generando un permeado de calidad adecuado para su reutilización. Asimismo, se caracteriza por su capacidad de clarificación y concentración de proteínas, aunque presenta desafíos asociados al fouling y a los costos de membranas. Un resumen esquemático de sus principales características se presenta en la Figura 5.

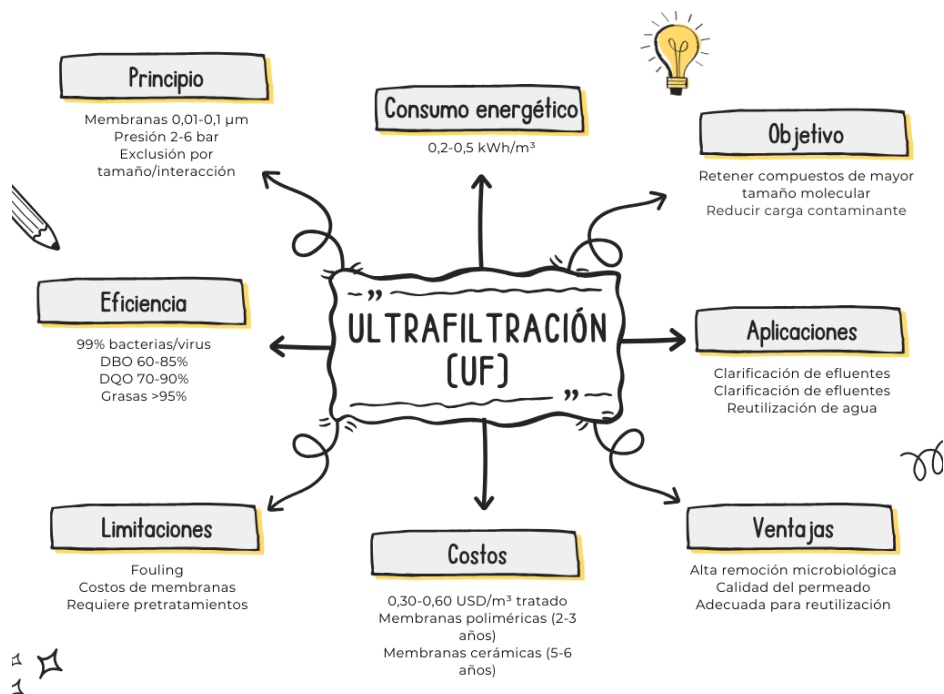


Figura 5. Mapa conceptual de la ultrafiltración (UF) aplicada al tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. (Elaboración propia a partir de Baker, 2012; Ritambhara et al., 2019; Figueroa et al., 2021; Ahmed et al., 2023; Ribeiro, 2007; Yordanov & Kolev, 2020; Zuriaga et al., 2019).

4.4.3. Nanofiltración (NF): Principios, funcionamiento y aplicación en aguas residuales de la industria láctea

La nanofiltración (NF) es una tecnología de separación por membranas que se ubica entre la ultrafiltración (UF) y la ósmosis inversa (RO) en cuanto a capacidad de remoción, presión operativa y complejidad técnica. Utiliza membranas con poros de entre 1 y 10 nanómetros y un peso molecular de corte entre 100 y 1000 Da, lo que le permite rechazar compuestos orgánicos de peso molecular medio, iones multivalentes, colorantes, virus y bacterias, mientras permite el paso parcial de agua, sales monovalentes y pequeñas moléculas neutras (Figueroa et al., 2021; Ahmed et al., 2023). Este perfil la

convierte en una tecnología ideal para procesos en los que se requiere una separación selectiva más precisa que la UF, pero con menor presión energética que la RO.

En la industria láctea, la NF ha demostrado ser una herramienta versátil, eficiente y rentable. Se aplica tanto en la valorización de subproductos como en el tratamiento avanzado de aguas residuales. Su uso permite realizar una desmineralización parcial del suero de leche, lo que optimiza la eficiencia energética en el secado y mejora las propiedades nutricionales del producto final. También se utiliza para separar lactosa de proteínas en la producción de concentrados proteicos como MPC, clarificar permeatos y reducir la carga salina en corrientes destinadas a reutilización. En procesos de tratamiento de aguas, la NF se implementa como etapa terciaria posterior a UF o MBR, generando un permeado de alta calidad apto para ser reincorporado a procesos industriales o para cumplir con normativas de vertido exigentes (Ritambhara et al., 2019; Andrade et al., 2014; Ahmed et al., 2023).

El principio de funcionamiento de la NF se basa en mecanismos combinados de exclusión por tamaño y rechazo electrostático. Las membranas utilizadas tienen carga superficial negativa, lo que favorece el rechazo de aniones y compuestos disueltos con carga, además de moléculas de cierto tamaño hidrodinámico. Estas membranas operan comúnmente entre 4 y 40 bar, según el tipo de aplicación, y generan dos flujos diferenciados: el permeado, que contiene agua limpia y solutos pequeños; y el retentado, en el que se concentran los contaminantes retenidos o los compuestos de interés. La

selección del tipo de membrana, su configuración hidráulica y el régimen de operación deben ajustarse cuidadosamente a las características del influente y al objetivo del proceso. En la industria láctea, esto implica considerar variables como la concentración de sólidos, la presencia de grasas y proteínas, y la sensibilidad microbiológica del sistema (Chen et al., 2018; Ahmed et al., 2023).

El uso de nanofiltración también implica desafíos técnicos importantes, especialmente en relación con el ensuciamiento o fouling. Este puede deberse a la acumulación de materia orgánica, sales precipitadas o biofilm bacteriano, lo que incrementa la presión transmembrana y reduce el caudal de permeado. Para prevenir y controlar estos fenómenos, se implementan estrategias que incluyen pretratamientos físicos y químicos (como coagulación, UF o ajuste de pH), limpiezas programadas mediante sistemas CIP con soluciones ácidas y alcalinas, y monitoreo continuo de parámetros clave como la presión transmembrana, el caudal de salida, la turbidez y la conductividad del permeado (Andrade et al., 2014; Chen et al., 2018).

La eficiencia de remoción que ofrece la NF la convierte en una de las tecnologías más efectivas para el tratamiento de efluentes lácteos. Estudios específicos reportan remociones de hasta un 98 % de DQO, 86 % de nitrógeno total y 89 % de fósforo, además de una notable reducción de turbidez, color, compuestos fenólicos, virus y bacterias. Estas cifras consolidan a la NF como una opción de alta calidad para el pulido de aguas industriales y su posterior reutilización. Asimismo, permite recuperar fracciones útiles como proteínas y

lactosa del suero, que pueden ser valorizadas en otros procesos productivos o utilizados como insumos en fermentaciones, mejorando así la sostenibilidad del proceso global (Ritambhara et al., 2019; Prudêncio et al., 2014; Figueroa et al., 2021).

En términos económicos, la NF requiere una inversión inicial moderada-alta y un nivel de operación técnico. Su consumo energético se encuentra entre 0,5 y 1,5 kWh por metro cúbico tratado, dependiendo de la presión de operación, la calidad del influente y la eficiencia del sistema hidráulico. Los costos de operación, incluyendo energía, limpieza y mantenimiento, oscilan entre 0,45 y 0,90 USD por metro cúbico tratado, y las membranas suelen tener una vida útil de entre 2 y 5 años si se mantienen bajo condiciones adecuadas de pretratamiento y limpieza (Chen et al., 2018; Andrade et al., 2014). A pesar de estos costos, la posibilidad de recuperar agua tratada y subproductos valiosos como proteínas y lactosa hace que la NF resulte económicamente atractiva, especialmente en plantas con una estrategia orientada a la economía circular y la reducción de residuos.

Desde el punto de vista técnico, un sistema de nanofiltración requiere bombas de alta presión, módulos de membrana resistentes (espiralados o tubulares), un sistema de limpieza automatizado (CIP), y sensores de monitoreo continuo para variables como presión, caudal, pH y temperatura. También es esencial la implementación de pretratamientos adecuados para proteger las membranas y mantener la eficiencia del sistema. La operación debe estar a cargo de personal capacitado que pueda interpretar los datos del sistema,

ejecutar ajustes y mantener las condiciones óptimas de funcionamiento en todo momento (Figueroa et al., 2021; Chen et al., 2018).

El consumo energético de la NF, aunque mayor que en tecnologías como MF y UF, se puede reducir mediante la optimización del diseño hidráulico, la implementación de pretratamientos eficaces y el uso de bombas con alta eficiencia. Su integración en esquemas de tratamiento con recuperación de agua y concentración de productos lácteos permite cerrar ciclos internos, reducir la dependencia de fuentes hídricas externas y disminuir significativamente el volumen de descarga, contribuyendo así al cumplimiento de objetivos ambientales y económicos en las plantas de procesamiento de leche (Ahmed et al., 2023; Prudêncio et al., 2014).

La nanofiltración (NF) se ha posicionado como una alternativa intermedia entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa, destacando por su capacidad de remover materia orgánica, virus, bacterias, sales divalentes y multivalentes con una presión de operación moderada. En la industria láctea, esta tecnología se utiliza tanto para la clarificación y reducción de sales como para la concentración de proteínas y la desmineralización parcial del suero. A pesar de sus ventajas, la NF requiere un estricto control operativo debido al riesgo de fouling y a la necesidad de pretratamientos. Un resumen de sus características principales se presenta en la Figura 6.

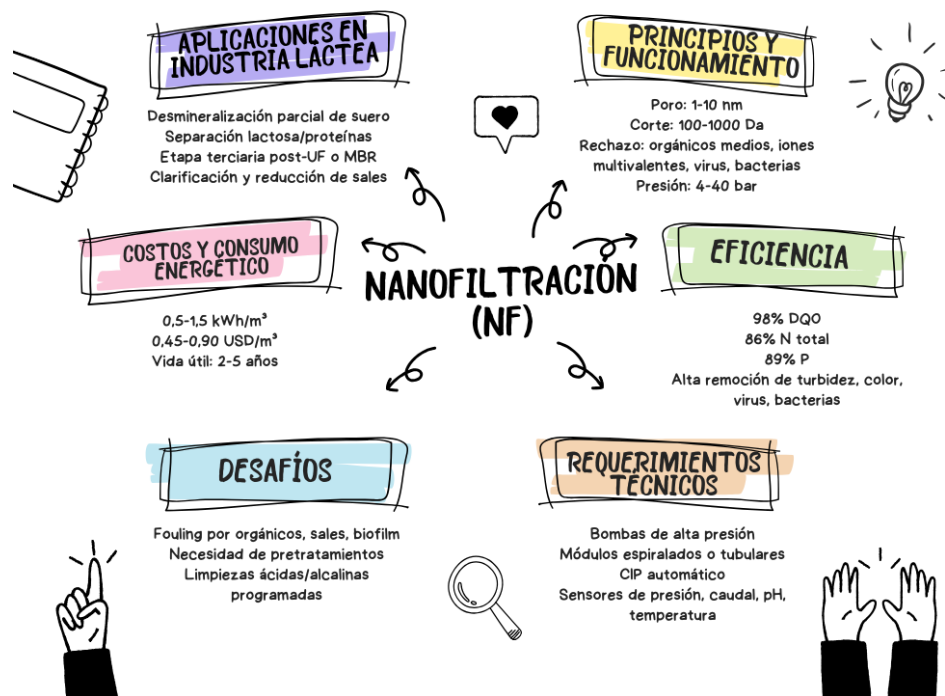


Figura 6. Mapa conceptual de la tecnología de nanofiltración aplicada al tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. (Elaboración propia a partir de Figueroa et al., 2021; Ahmed et al., 2023; Ritambhara et al., 2019; Andrade et al., 2014; Chen et al., 2018; Prudêncio et al., 2014).

4.4.4. Ósmosis Inversa (RO): Principios, funcionamiento y aplicación en aguas residuales de la industria láctea

La ósmosis inversa (RO) es una tecnología de separación por membranas que se distingue por su capacidad para eliminar prácticamente todos los solutos disueltos presentes en el agua, incluidos sales, compuestos orgánicos de bajo peso molecular, virus y bacterias. Funciona mediante la aplicación de una presión superior a la presión osmótica natural, forzando el paso del agua a través de una membrana semipermeable desde una solución más concentrada hacia una menos concentrada. Las membranas utilizadas en este proceso son densas y no porosas, fabricadas principalmente de poliamida en configuración

espiralada, y operan típicamente bajo presiones que oscilan entre 30 y 80 bar, dependiendo del tipo de aplicación (Baker, 2012; Ahmed et al., 2023).

En el contexto de la industria láctea, la RO se utiliza tanto para el tratamiento avanzado de aguas residuales como para la valorización de subproductos. Entre sus principales aplicaciones se encuentra la desmineralización de suero de leche, la concentración de proteínas y la recuperación de agua de proceso para su reutilización interna. La combinación de esta tecnología con etapas previas como UF o MBR permite alcanzar niveles de remoción que cumplen con estándares exigentes para la descarga o reutilización, convirtiéndola en una etapa clave dentro de esquemas de tratamiento terciario (Ritambhara et al., 2019; Ahmed et al., 2023).

Los sistemas de ósmosis inversa deben estar diseñados para soportar condiciones operativas exigentes, lo cual implica el uso de bombas de alta presión, materiales resistentes a la corrosión, sensores de control de flujo, conductividad y presión, así como sistemas de limpieza química automatizados (CIP). Las membranas de RO presentan una eficiencia de remoción de sales superior al 95 %, y en estudios aplicados al tratamiento de aguas residuales lácteas, se ha reportado una remoción de DQO de hasta 98,7 % y de TOC del 96,7 %, especialmente cuando se aplica como etapa posterior a procesos de coagulación y separación por membrana (Jadhav et al., 2022). Esta capacidad de separación se extiende también a metales pesados, nutrientes disueltos y contaminantes emergentes, lo que refuerza su valor en aplicaciones industriales donde se requiere agua de alta pureza (Baker, 2012;

Ahmed et al., 2023).

No obstante, la RO presenta limitaciones importantes asociadas al fouling o ensuciamiento de membranas, que puede originarse por la acumulación de compuestos orgánicos de bajo peso molecular (LMWOCs), grasas, proteínas o sales inorgánicas. Este fenómeno provoca una reducción del caudal de permeado, aumento de la presión transmembrana y pérdida de eficiencia, lo que repercute directamente en el consumo energético y la vida útil del sistema. Investigaciones recientes han demostrado que los LMWOCs generan capas densas en la superficie de las membranas, difíciles de remover incluso mediante limpiezas químicas convencionales, y que además interfieren con la formación del biofilm (Freeman et al., 2024). Por ello, se recomienda complementar la RO con pretratamientos efectivos como la coagulación-floculación, la microfiltración o la nanofiltración, según el perfil del agua de entrada.

Desde el punto de vista energético, la ósmosis inversa es la tecnología de membrana con mayor demanda específica. Su consumo se ubica entre 2,5 y 6 kWh por metro cúbico tratado, siendo influenciado por la presión de operación, la recuperación de agua deseada y el nivel de fouling acumulado (Ahmed et al., 2023; Figueroa et al., 2021). Para reducir estos consumos, los sistemas modernos integran bombas de alta eficiencia, recuperación de energía a partir del retentado y estrategias de operación por lotes o en ciclos optimizados (Baker, 2012; Freeman et al., 2024).

La vida útil de las membranas de RO suele estar entre tres y cinco años,

dependiendo de la calidad del pretratamiento, la frecuencia de limpieza y la agresividad química del influente. El reemplazo de membranas representa un costo relevante en la operación, aunque este se compensa parcialmente cuando el sistema está orientado a la reutilización de agua de alta calidad o a la obtención de productos concentrados. Además, los costos operativos, aunque elevados, pueden ser asumibles cuando se consideran los beneficios ambientales y regulatorios de reducir la descarga de efluentes con alta carga contaminante (Ritambhara et al., 2019; Baker, 2012).

En definitiva, la ósmosis inversa se consolida como la tecnología más exigente pero también más eficaz dentro del conjunto de membranas aplicadas al tratamiento de aguas en la industria láctea. Su capacidad de generar agua ultrapura y de actuar como barrera final para todo tipo de contaminantes la hace indispensable en procesos donde la seguridad, la sostenibilidad y la eficiencia del uso del recurso hídrico son prioritarias.

A continuación, se presenta la Figura 7 que resume los aspectos fundamentales de la ósmosis inversa en el tratamiento de aguas residuales lácteas, incluyendo su principio de funcionamiento, componentes clave, aplicaciones, requerimientos operativos y limitaciones.

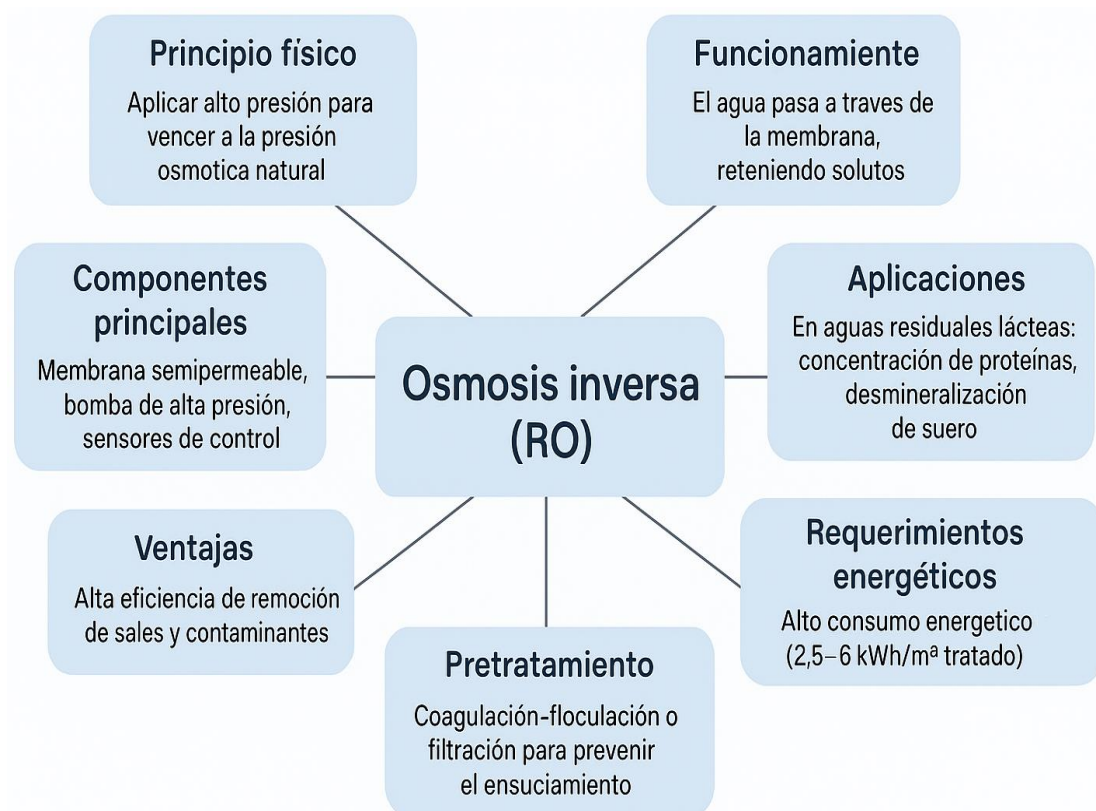


Figura 7. Ósmosis inversa (RO) aplicada a aguas residuales de la industria láctea. (Elaboración propia a partir de Baker, 2012; Ritambhara et al., 2019; Ahmed et al., 2023; Freeman et al., 2024; Jadhav et al., 2022 y Figueroa et al., 2021).

4.4.5. Comparación de tecnologías de membranas

A continuación, en la Tabla 5 se presenta una comparación técnica entre las principales tecnologías de tratamiento por membranas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Esta tabla sintetiza los aspectos más relevantes de cada tecnología, incluyendo su rango de aplicación, capacidad de remoción de contaminantes, requerimientos energéticos y operacionales, ventajas prácticas y limitaciones técnicas. Su inclusión permite visualizar de manera clara las diferencias funcionales entre microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, facilitando la

elección o combinación más adecuada según las características del efluente y los objetivos del tratamiento.

Tabla 5. Comparación técnica de tecnologías de membranas para el tratamiento de aguas residuales lácteas.

Parámetro	Microfiltración (MF)	Ultrafiltración (UF)	Nanofiltración (NF)	Ósmosis Inversa (RO)
Tamaño de poro o corte molecular	0,1 – 10 μm	0,01 – 0,1 μm	1 – 10 nm / 100–1000 Da	Sin poros / $\sim <100$ Da
Presión de operación	0,1 – 2 bar	2 – 6 bar	4 – 40 bar	30 – 80 bar
Eficiencia de remoción	Sólidos suspendidos, bacterias	Bacterias, virus, DBO 60–85 %, DQO 70–90 %	DQO hasta 98 %, N 86 %, P 89 %, virus y sales multivalentes	DQO hasta 98,7 %, TOC 96,7 %, virus, sales, TDS
Consumo energético estimado	0,1 – 0,3 kWh/m ³	0,2 – 0,5 kWh/m ³	0,5 – 1,5 kWh/m ³	2,5 – 6 kWh/m ³
Costo operativo estimado (USD/m ³ de agua tratada)	Bajo (0,1 – 0,3)	Medio (0,3 – 0,6)	Medio–alto (0,45 – 0,9)	Alto (0,6 – 1,2)
Ventajas clave	Bajo costo y fácil operación	Alta calidad microbiológica del efluente	Remueve sales divalentes, buena para desmineralización	Remoción casi total de solutos disueltos
Limitaciones principales	No remueve virus ni solutos disueltos	No remueve sales ni contaminantes muy pequeños	Fouling, requiere pretratamiento y presión media–alta	Alto consumo energético, fouling, alto costo

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; Figueroa et al., 2021; Ritambhara et al., 2019; Sonawane & Murthy, 2023; Khojare et al., 2005.

Comentarios: Se presentan a continuación, de forma enumerada, precisiones que orientan y aportan mayor claridad a la lectura de la Tabla 5.

1. USD/m³ de agua tratada: El costo operativo estimado hace referencia al gasto necesario para tratar un metro cúbico (1000 litros) de agua residual. Este valor considera energía, mantenimiento, insumos químicos y reemplazo de membranas, y puede variar según las condiciones del sitio, tipo de influente y escalabilidad del sistema.
2. Consumo energético: Expresado en kilovatios hora por metro cúbico (kWh/m³), representa la energía requerida para operar cada tecnología. Tecnologías como RO y MBR requieren mayor energía debido a la presión o aireación necesarias, mientras que MF y UF son más eficientes en este aspecto.
3. Tamaño de poro o corte molecular: Es un indicador del grado de selectividad de cada membrana. Las tecnologías con menor tamaño de poro (como NF y RO) logran una mayor remoción de sales, contaminantes disueltos y microorganismos.
4. Eficiencia de remoción: Los porcentajes y descripciones son aproximados y dependen de las características específicas del agua residual, del diseño del sistema y de su mantenimiento. Los datos presentados reflejan rangos típicos reportados en estudios técnicos y casos industriales.
5. Limitaciones y ventajas: Estas columnas resumen aspectos clave a considerar en la selección o combinación de tecnologías, especialmente en contextos industriales como el lácteo, donde los efluentes suelen tener alta carga orgánica, grasas y sólidos.

Con el fin de complementar la información presentada en la Tabla 5 y facilitar la comparación visual entre las diferentes tecnologías de membranas, se elaboró un gráfico radar que integra criterios técnicos, económicos y operativos relevantes para la industria láctea. Esta representación permite observar de manera intuitiva las fortalezas y debilidades relativas de cada alternativa, destacando aquellas con mayor potencial de implementación. Para su construcción se siguió una metodología de análisis cualitativo–cuantitativo que se detalla a continuación.

4.4.5.1. Metodología para la construcción del gráfico radar comparativo

Para la comparación preliminar de las tecnologías de membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa) se empleó un análisis cualitativo–cuantitativo basado en una escala ordinal de tipo Likert, siguiendo los principios descritos por Stevens (1946) para la medición de variables no métricas. Este enfoque permite transformar descriptores técnicos y operativos en valores numéricos estandarizados, facilitando su representación gráfica y comparación visual.

1. Selección de criterios de evaluación

Los criterios técnicos y operativos relevantes fueron definidos a partir de la revisión bibliográfica (Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; Figueroa et al., 2021; Khojare et al., 2005; Ritambhara et al., 2019; Sonawane & Murthy, 2023). Para la evaluación final se establecieron seis criterios:

- Eficiencia de remoción.
- Calidad de efluente obtenida.
- Costos de operación asociados.
- Mantenimiento y simplicidad operativa.
- Consumo energético del sistema.
- Adaptabilidad a plantas lácteas de tamaño mediano.

2. Construcción de la escala de valoración

A cada criterio se le asignó una escala ordinal de 1 a 5 puntos, donde 1 representa el desempeño menos favorable y 5 el más favorable. Para garantizar consistencia:

- En criterios de beneficio (eficiencia, calidad de efluente, adaptabilidad), un valor alto refleja un mejor desempeño.
- En criterios de costo o impacto negativo (costos de operación, mantenimiento, consumo energético), se invirtió la escala, de manera que un menor costo, requerimiento de mantenimiento o consumo energético equivale a una mayor puntuación.
- Con este ajuste metodológico, el valor 5 siempre representa la condición más favorable, y el valor 1 la menos favorable, en todos los criterios.

3. Asignación de puntajes

Los valores fueron determinados a partir de información y descriptores presentes en la literatura técnica, transformados a la escala Likert mediante criterios comparativos y consensuados. Este procedimiento aseguró consistencia metodológica y comparabilidad entre tecnologías.

4. Representación gráfica

Con el fin de realizar comparaciones más justas, se construyeron dos gráficos radar diferenciados según el destino del agua tratada:

- **Vertido:** comparación entre microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF), tecnologías suficientes para cumplir la normativa de descarga en cuerpos de agua.
- **Reuso:** comparación entre UF (reuso parcial), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO), tecnologías orientadas a la obtención de agua de calidad apta para reutilización en procesos de la planta.

Los puntajes asignados se representaron gráficamente, permitiendo visualizar de manera simultánea el desempeño relativo de cada tecnología en los seis criterios evaluados. Las áreas más amplias en los gráficos reflejan un mejor desempeño global.

La aplicación de esta metodología permitió asignar valores comparativos homogéneos a cada una de las tecnologías de membrana, asegurando consistencia en la evaluación de criterios tanto de beneficio como de costo.

Los resultados obtenidos se representan en la Figura 8 (escenario de vertido) y Figura 9 (escenario de reuso), donde se observa de manera integrada el desempeño relativo de cada alternativa. Esta visualización facilita identificar fortalezas y debilidades específicas, aportando una herramienta clara para la comparación preliminar y la toma de decisiones en el contexto de la industria láctea.

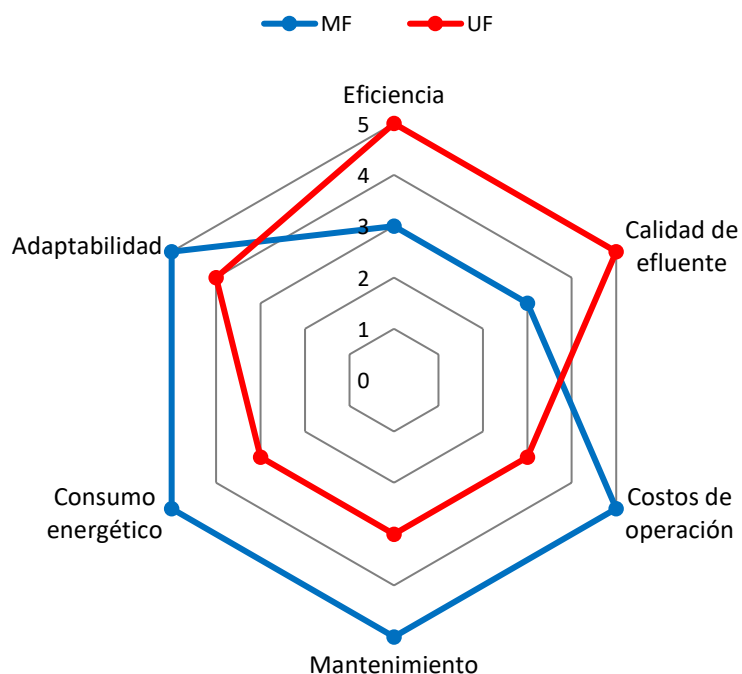


Figura 8. Comparación ordinal de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) orientadas al vertido de efluentes lácteos en cuerpos de agua. (Elaboración propia a partir de Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; Figueroa et al., 2021; Ritambhara et al., 2019 y Sonawane & Murthy, 2023).

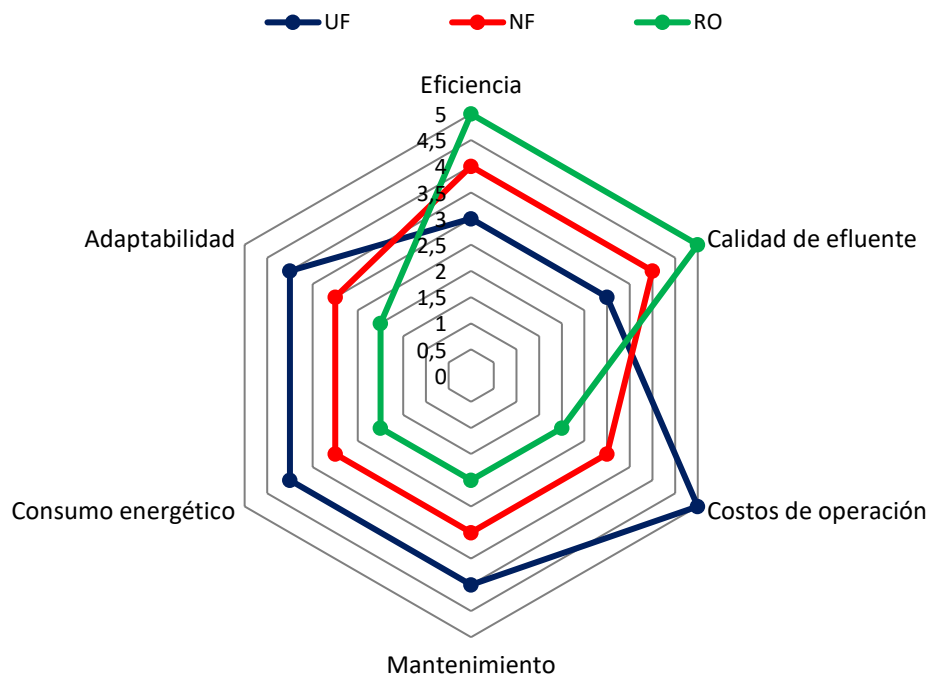


Figura 9. Comparación ordinal de ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO) para la reutilización de efluentes lácteos. (Elaboración propia a partir de Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; Figueroa et al., 2021; Ritambhara et al., 2019 y Sonawane & Murthy, 2023).

4.4.5.2. Discusión de resultados del gráfico radar comparativo

El gráfico radar de la Figura 8 para el escenario de vertido muestra que la ultrafiltración (UF) presenta los mayores valores en eficiencia y calidad del efluente, lo que confirma lo reportado por Figueroa et al. (2021) sobre su eficacia en la reducción de sólidos y materia orgánica. Sin embargo, la microfiltración (MF) destaca en costos de operación, simplicidad de mantenimiento y menor consumo energético, lo que la convierte en una alternativa atractiva para plantas de tamaño mediano que requieren cumplir

con la normativa de descarga (DS 90) sin incurrir en altos costos (Ahmed et al., 2023).

En este escenario, la elección entre MF y UF depende de la prioridad de la planta: minimizar costos y simplicidad (MF) o maximizar desempeño técnico (UF).

En la Figura 9 del escenario de reuso, la ósmosis inversa (RO) alcanza los mayores valores en eficiencia y calidad de efluente, coincidiendo con lo planteado por Baker (2012) y Ritambhara et al. (2019) respecto a su capacidad de generar agua de muy alta pureza. No obstante, presenta fuertes limitaciones en costo, mantenimiento y consumo energético, lo que restringe su adaptabilidad en plantas medianas.

La nanofiltración (NF) se ubica como alternativa intermedia, con buena calidad de efluente y menores costos que RO, aunque más exigente en operación que UF. Por su parte, la UF (reuso parcial) obtiene puntajes moderados en eficiencia y calidad, pero se posiciona como la más favorable en costos y adaptabilidad, lo que la hace útil en aplicaciones no críticas como sistemas CIP, lavado y enfriamiento.

En este escenario, la elección depende del nivel de exigencia del reuso: RO para aplicaciones de alta pureza, NF para balance costo–calidad, y UF para reuso parcial en procesos auxiliares.

4.4.5.2.1. Síntesis general

Los resultados confirman que no existe una tecnología universalmente superior, sino que la selección depende del destino del agua tratada y del balance entre criterios técnicos y económicos. Mientras NF y RO son más adecuadas para esquemas de reúso, MF y UF resultan más aplicables en escenarios de vertido o de reúso parcial, tendencia que coincide con lo señalado por Khojare et al. (2005) y Sonawane & Murthy (2023). energético, factores críticos en plantas de tamaño mediano (Ahmed et al., 2023).

4.4.5.2.2. El doble rol de la UF

La ultrafiltración (UF) presenta un doble rol dentro de la industria láctea, lo que explica su presencia en ambos escenarios evaluados. En el caso de vertido, aun cuando sus costos de implementación son mayores que los de la microfiltración (MF), su aplicación permite obtener un efluente de calidad superior, lo que asegura un cumplimiento holgado de la normativa y puede reducir el impacto ambiental sobre el cuerpo receptor. En el escenario de reúso, aunque no alcanza los niveles de calidad de tecnologías más avanzadas como la nanofiltración (NF) o la ósmosis inversa (RO), constituye una alternativa viable para reúso parcial en actividades no críticas como la limpieza CIP, el lavado de equipos o el enfriamiento. Esta condición versátil muestra que la UF no debe analizarse solo desde la perspectiva de su costo inmediato, sino también en función de la estrategia operativa y ambiental de cada planta.

4.5. Sistemas híbridos: coagulación-floculación acoplada a membranas (MF/UF) y biorreactor de membranas (MBR)

La evolución de los sistemas de tratamiento de aguas residuales ha llevado al desarrollo de configuraciones híbridas que integran diferentes tecnologías con el fin de superar las limitaciones de los procesos individuales. En particular, la combinación de procesos físico-químicos y biológicos con separación por membranas ha demostrado una notable capacidad para mejorar la calidad del efluente, reducir el consumo de espacio y aumentar la eficiencia operativa en aplicaciones industriales complejas como las de la industria láctea. Este enfoque responde a la necesidad de tratar efluentes con alta carga orgánica, grasas, sólidos en suspensión y variabilidad de composición, elementos característicos de los residuos generados en plantas de procesamiento de leche y derivados (Ritambhara et al., 2019; Ahmed et al., 2023).

Dentro de las configuraciones híbridas más estudiadas y aplicadas se encuentran la combinación de coagulación-floculación con microfiltración o ultrafiltración, y el uso de biorreactores de membrana que integran tratamiento biológico con separación por membrana en un solo sistema. En ambos casos, se busca potenciar los beneficios de cada tecnología: la primera al reducir la carga de sólidos y materia orgánica antes de la etapa de filtración, disminuyendo el fouling de las membranas; la segunda al incorporar una biodegradación controlada junto con una separación física eficiente,

generando un efluente de alta calidad y baja carga contaminante (Baker, 2012; Le-Clech et al., 2006).

Estas estrategias permiten diseñar sistemas compactos, más resistentes a fluctuaciones de carga y con mayor capacidad de reutilización del agua tratada, lo que resulta especialmente relevante en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos. En la industria láctea, la implementación de esquemas híbridos se ha propuesto como solución para alcanzar estándares ambientales exigentes, reducir costos asociados a la gestión de residuos y avanzar hacia modelos de producción más sostenibles (Figuroa et al., 2021; Ritambhara et al., 2019).

A continuación, se analiza en detalle el funcionamiento, ventajas y limitaciones de dos configuraciones híbridas representativas: la coagulación-floculación acoplada a microfiltración o ultrafiltración, y el biorreactor de membranas.

4.5.1. Coagulación-floculación acoplada a microfiltración o ultrafiltración (C/F + MF/UF)

La combinación de procesos de coagulación-floculación (C/F) con tecnologías de separación por membranas como la microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF) ha sido ampliamente explorada como una estrategia híbrida para el tratamiento eficiente de aguas residuales industriales. Este tipo de configuración busca potenciar la eficiencia del proceso global mediante la sinergia entre el pretratamiento químico y la filtración física, optimizando la

remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, grasas y compuestos coloidales que afectan negativamente el rendimiento de las membranas. En particular, en la industria láctea, donde los efluentes presentan alta carga de sólidos, grasas y proteínas, esta integración resulta especialmente útil para mitigar fenómenos como el ensuciamiento (fouling) y prolongar la vida útil de las membranas (Ahmed et al., 2023; Ritambhara et al., 2019).

El funcionamiento del sistema se basa en una primera etapa en la que se aplican coagulantes como sales de aluminio o hierro, que permiten desestabilizar las partículas en suspensión. Posteriormente, mediante la floculación, se promueve la formación de agregados que pueden ser retenidos más fácilmente por las membranas de MF o UF instaladas en la etapa siguiente. Este pretratamiento físico-químico mejora notablemente la calidad del influente que ingresa al sistema de membranas, reduciendo la carga contaminante y previniendo la obstrucción de poros, uno de los principales problemas operacionales en sistemas de filtración directa (Figuroa et al., 2021; Le-Clech et al., 2006).

Diversos estudios han reportado eficiencias elevadas de remoción para esta configuración híbrida. Se han obtenido reducciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) del orden del 80 al 95 %, y de demanda química de oxígeno (DQO) en rangos de 75 a 90 %. Asimismo, la retención de sólidos suspendidos totales (SST), grasas y turbidez alcanza valores muy altos, lo cual permite incluso pensar en el uso de este sistema como etapa previa a procesos más

avanzados como la nanofiltración o la ósmosis inversa en esquemas de reúso de agua industrial (Baker, 2012; Ahmed et al., 2023).

Entre las ventajas destacadas de esta configuración híbrida se encuentra su bajo consumo energético, debido a que opera generalmente a baja o media presión; su eficacia para reducir el ensuciamiento de membranas; y su capacidad para estabilizar el influente, incluso en contextos de carga variable. Además, al tratarse de tecnologías ampliamente conocidas, su implementación resulta técnicamente viable en entornos industriales con recursos humanos y técnicos limitados (Figuerola et al., 2021).

Sin embargo, esta combinación presenta también ciertas limitaciones. El uso de coagulantes químicos genera lodos que deben ser gestionados adecuadamente, aumentando la complejidad y el costo del tratamiento. Adicionalmente, el consumo de reactivos como sulfato de aluminio o cloruro férrico implica una dependencia de insumos externos y un seguimiento riguroso para evitar problemas de sobredosificación o corrosión. Estos aspectos deben ser considerados cuidadosamente al dimensionar e implementar el sistema, especialmente si se busca una solución sostenible en el tiempo (Le-Clech et al., 2006; Ritambhara et al., 2019).

En el contexto de la industria láctea, se han reportado casos de implementación exitosa de este tipo de configuración para el tratamiento de efluentes con alta carga de proteínas, grasa y sólidos finos. Su capacidad para

reducir considerablemente la carga orgánica antes de etapas más avanzadas lo convierte en una herramienta valiosa dentro de esquemas escalonados de tratamiento, particularmente en plantas medianas que requieren soluciones robustas, eficientes y adaptables a los recursos disponibles (Ahmed et al., 2023; Baker, 2012).

En el caso del sistema híbrido CF+MF, su desempeño permite alcanzar reducciones significativas de carga orgánica y sólidos suspendidos, siendo suficiente para cumplir con normativas de vertido de efluentes industriales. No obstante, la calidad del agua obtenida no es adecuada para esquemas de reuso dentro de la planta, por lo que su aplicación se orienta principalmente a la disposición en cuerpos receptores (Ahmed et al., 2023; Ritambhara et al., 2019; Le-Clech et al., 2006).

Por su parte, el sistema híbrido CF+UF se presenta como una alternativa más versátil, ya que el efluente resultante cumple holgadamente con los requisitos de vertido y, además, puede destinarse a esquemas de reuso parcial en la planta. Este doble rol se explica porque la combinación de coagulación–floculación y ultrafiltración reduce de manera efectiva grasas, proteínas y sólidos coloidales, entregando un agua apta para usos no críticos como limpieza CIP, lavado de equipos o enfriamiento, aunque no alcanza la pureza necesaria para aplicaciones de mayor exigencia (Baker, 2012; Figueroa et al., 2021).

A continuación, la Figura 10 muestra un esquema conceptual del sistema híbrido de coagulación–floculación acoplada a microfiltración/ultrafiltración (CF+MF/UF), destacando su funcionamiento general, ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas en la industria láctea.

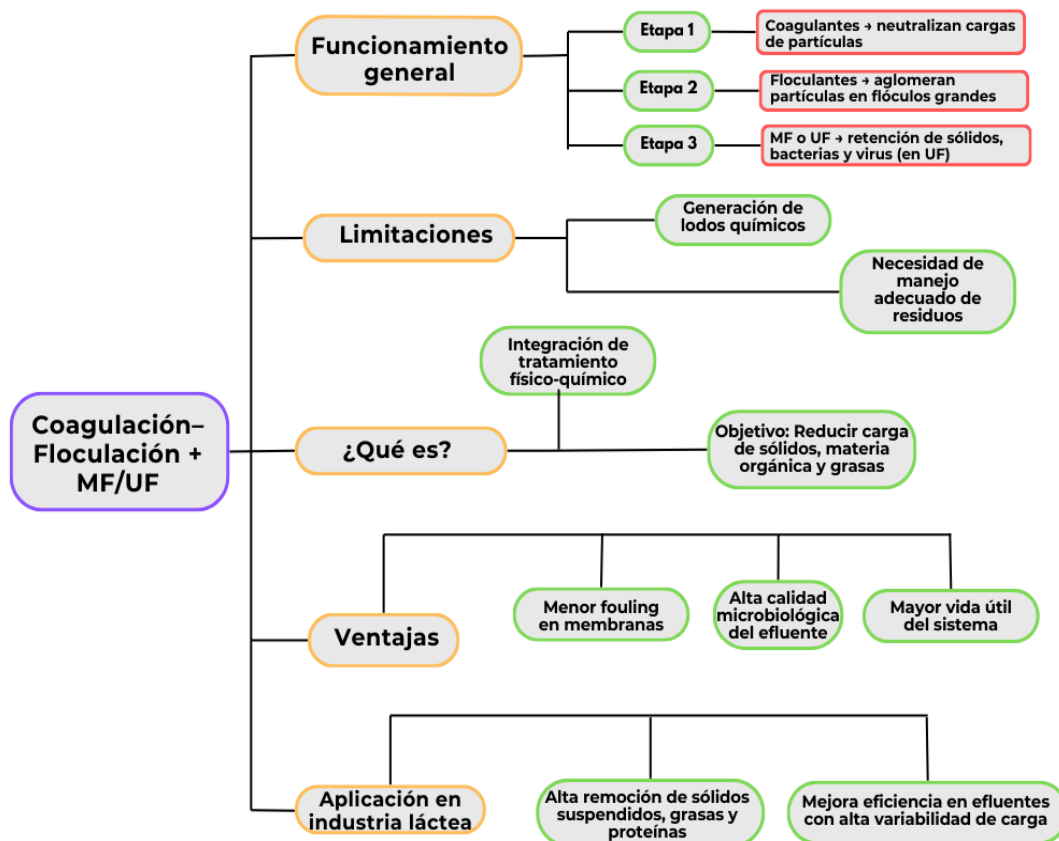


Figura 10. Esquema conceptual del sistema híbrido coagulación–floculación acoplada a microfiltración/ultrafiltración (MF/UF). (Elaboración propia a partir de Baker 2012; Le-Clech et al. 2006 y Ritambhara et al. 2019).

4.5.2. Biorreactor de membrana (MBR): integración de tratamiento biológico y separación por membrana

El biorreactor de membrana (MBR) es una tecnología híbrida que combina en

un solo sistema un reactor biológico con un proceso de separación mediante membranas, generalmente de tipo ultrafiltración. Esta integración permite prescindir de las unidades de clarificación secundaria típicas de los sistemas convencionales de lodos activados, reemplazándolas por una etapa de filtración que retiene de forma efectiva la biomasa y otros sólidos en suspensión. Su aplicación en el tratamiento de aguas residuales industriales se ha consolidado debido a su capacidad para producir efluentes de alta calidad, su menor huella física y su tolerancia a cargas variables, condiciones que resultan particularmente ventajosas en el contexto de la industria láctea (Khojare et al., 2005; Caro Estrada, 2020).

Los efluentes generados en plantas lecheras, que contienen altas concentraciones de proteínas, grasas y sólidos orgánicos, son especialmente aptos para ser tratados mediante MBR, ya que este sistema puede operar con concentraciones de sólidos suspendidos (MLSS) superiores a 10.000 mg/L, lo que mejora la eficiencia de remoción sin requerir grandes volúmenes de reactor. Estudios han reportado que este tipo de configuración permite reducir la producción de fangos en hasta un 70 % respecto a tecnologías tradicionales, mientras que mantiene una alta estabilidad operativa y resistencia ante fluctuaciones de carga (Khojare et al., 2005; Caro Estrada, 2020).

El proceso puede configurarse como interno (con membranas sumergidas en el reactor) o externo (con recirculación hacia una unidad de filtración), y requiere de una adecuada aireación tanto para mantener la actividad biológica

como para controlar el ensuciamiento de las membranas (Le-Clech et al., 2006). Este último aspecto es uno de los principales desafíos técnicos del MBR. El fouling puede ser de tipo biológico, orgánico o inorgánico, y conlleva una disminución del flujo de permeado y un aumento de la presión transmembrana. Por ello, se aplican estrategias de mitigación como retrolavados, limpieza química, control de aireación y pretratamientos físicos (Wang et al., 2014; Caro Estrada, 2020).

En términos de rendimiento, los MBR logran remociones de DBO superiores al 95 %, DQO entre 90 y 98 %, y una eliminación prácticamente total de sólidos en suspensión, grasas y patógenos. Estas cifras hacen que el agua tratada mediante MBR sea apta para ser reutilizada en procesos no potables, o incluso como alimentación para etapas posteriores como la ósmosis inversa, en esquemas de reúso industrial (Sonawane & Murthy, 2023; Ritambhara et al., 2019). El consumo energético asociado al funcionamiento del sistema, debido principalmente a la aireación y la operación de membranas, se sitúa entre 0,8 y 1,5 kWh/m³ tratado, lo que lo ubica por encima de tecnologías como MF o UF, pero con una eficiencia de remoción significativamente superior (Caro Estrada, 2020).

Si bien la operación de un MBR exige un mayor nivel de tecnificación y monitoreo continuo, su capacidad para generar un efluente de alta calidad, su eficiencia volumétrica y su robustez frente a variaciones hacen de esta tecnología una opción atractiva para plantas medianas que buscan avanzar

hacia una gestión sustentable del recurso hídrico. Su implementación, aunque más costosa en etapas iniciales, ofrece beneficios ambientales y operacionales en el largo plazo, especialmente si se combina con tecnologías de reúso o valorización de subproductos. A continuación, la Figura 11 presenta un esquema conceptual del funcionamiento de los biorreactores de membrana (MBR), donde se integran un reactor biológico y una unidad de membranas, sintetizando sus principales ventajas, limitaciones y aplicaciones en la industria láctea.

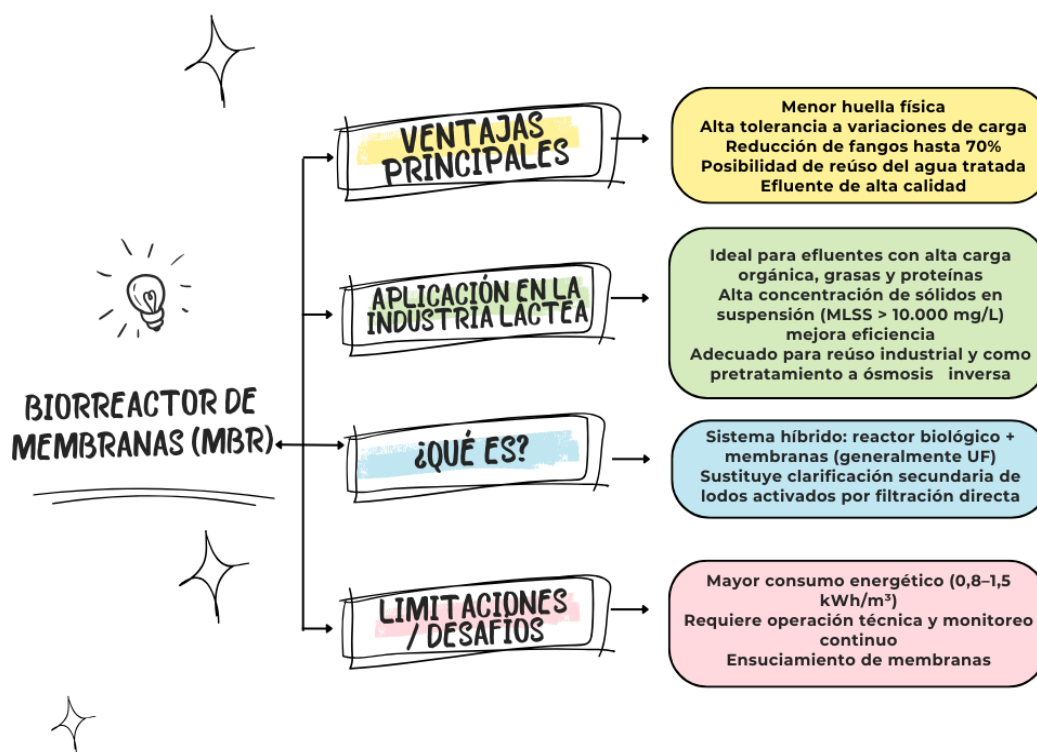


Figura 11. Esquema de biorreactor de membranas (MBR). (Elaboración propia a partir de Khojare et al. 2005; Caro Estrada 2020; Le-Clech et al. 2006; Wang et al. 2014; Ritambhara et al. 2019 y Sonawane & Murthy 2023).

4.5.3. Comparación entre sistemas híbridos aplicables a la industria láctea

Una vez descritas las configuraciones híbridas de coagulación-floculación acoplada a microfiltración o ultrafiltración, y de biorreactor de membrana, resulta pertinente realizar una comparación entre ambas. Si bien estos sistemas difieren en complejidad y mecanismos de operación, comparten objetivos comunes en cuanto a la mejora de la eficiencia de remoción, la reducción del ensuciamiento de membranas y la posibilidad de reutilizar el efluente tratado. A continuación, la Tabla 6 permite contrastar sus principales características técnicas y operativas, considerando criterios relevantes para su eventual implementación en plantas de procesamiento lácteo de tamaño mediano, en un contexto como el chileno.

Tabla 6. Comparación técnica entre sistemas híbridos C/F+MF/UF y MBR.

Criterio	C/F + MF/UF	MBR
Tipo de pretratamiento requerido	Requiere tratamiento químico previo	No siempre necesario
Remoción de DBO ₅	Alta (80–95%)	Muy alta (>95%)
Remoción de DQO	Alta (75–90%)	Muy alta (90–98%)
Producción de lodos	Alta (lodos químicos)	Baja a moderada (lodos biológicos)
Compactación del sistema	Moderada	Alta (reduce huella física)
Sensibilidad a carga variable	Media	Baja (alta estabilidad operativa)
Consumo energético	Bajo a medio	Medio a alto
Reutilización del efluente	Media (requiere pulido posterior)	Alta (puede alimentar procesos o RO)

Costo operativo	Bajo a medio	Medio a alto
Complejidad operativa	Baja	Alta (control de fouling, aireación, etc.)
Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; Caro Estrada, 2020; Figueroa et al., 2021; Khojare et al., 2005; Le-Clech et al., 2006; Ritambhara et al., 2019; Sonawane & Murthy, 2023; Wang et al., 2014.		

La comparación técnica entre ambos sistemas híbridos permite observar que tanto la combinación de coagulación-floculación con microfiltración o ultrafiltración, como los biorreactores de membrana, ofrecen ventajas concretas frente a las exigencias del tratamiento de aguas residuales en la industria láctea. Si bien el primero destaca por su menor complejidad y consumo energético, el MBR presenta una mayor eficiencia de remoción y mejor calidad del efluente tratado, aspectos clave cuando se busca avanzar hacia esquemas de reúso o cumplimiento ambiental estricto.

A continuación, la Figura 12 (escenario de vertido) y la Figura 13 (escenario de reúso) presentan gráficos de radar comparativos elaborados siguiendo la misma metodología descrita previamente, aplicando una escala ordinal de tipo Likert (1–5) normalizada, de modo que el valor 5 corresponde siempre a la condición más favorable. En este caso, los puntajes se asignaron en función de los criterios técnicos, económicos y ambientales definidos en la Tabla 6, lo que permite visualizar de manera integrada el desempeño relativo de las tecnologías híbridas evaluadas.

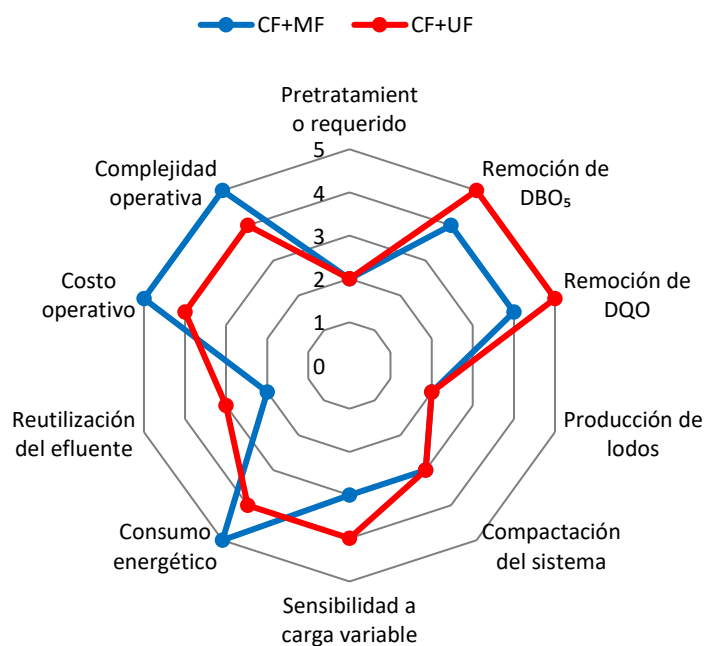


Figura 12. Comparación ordinal (escala Likert; 1–5) entre sistemas híbridos CF+MF y CF+UF mediante gráfico radar. (Elaboración propia a partir de Ahmed et al. 2023; Baker 2012; Caro Estrada 2020; Figueroa et al. 2021; Khojare et al. 2005; Le-Clech et al. 2006; Ritambhara et al. 2019; Sonawane & Murthy 2023 y Wang et al. 2014).

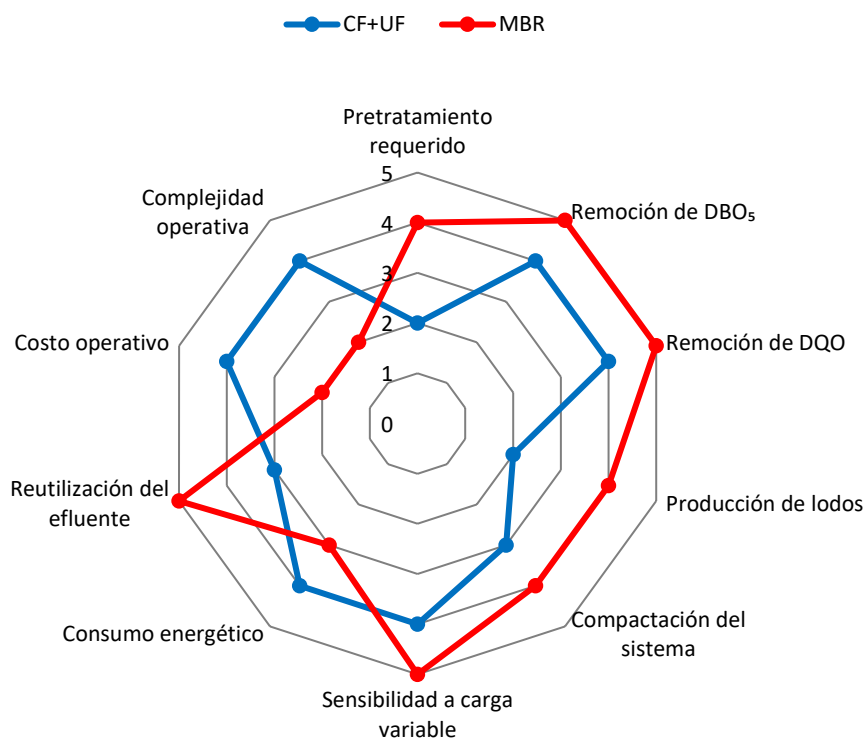


Figura 13. Comparación ordinal (escala Likert; 1–5) entre sistemas híbridos CF+UF y MBR mediante gráfico radar. (Elaboración propia a partir de Ahmed et al. 2023; Baker 2012; Caro Estrada 2020; Figueroa et al. 2021; Khojare et al. 2005; Le-Clech et al. 2006; Ritambhara et al. 2019; Sonawane & Murthy 2023 y Wang et al. 2014).

4.5.3.1. Discusión de los resultados de los gráficos de radar

La Figura 12 muestra la comparación de los sistemas híbridos CF+MF y CF+UF en el escenario de vertido. En este caso, se observa que el CF+MF presenta un mejor desempeño en criterios económicos y operativos, tales como bajo costo, simplicidad y reducido consumo energético, lo que lo convierte en una alternativa eficiente y accesible para plantas medianas que buscan cumplir la normativa de vertido con una tecnología robusta y de baja complejidad. Por su parte, el CF+UF, aunque más exigente en términos de costos y operación, ofrece una mayor eficiencia en la remoción de materia

orgánica y sólidos, así como una mejor adaptabilidad frente a variaciones de carga, lo que lo posiciona como una opción más versátil dentro del mismo escenario.

La Figura 13 presenta la comparación en el escenario de reuso, donde se contrasta el desempeño del CF+UF frente al MBR. En este contexto, el MBR alcanza los puntajes más altos en eficiencia de remoción, estabilidad operacional y compactación del sistema, lo que lo consolida como la alternativa más adecuada para aplicaciones de reuso neto que requieren elevados estándares de depuración. Sin embargo, presenta desventajas claras en consumo energético, costos y complejidad operativa, lo que coincide con la literatura que advierte sobre sus mayores requerimientos técnicos y económicos (Khojare et al., 2005; Caro Estrada, 2020). El CF+UF, en cambio, se posiciona como una alternativa intermedia: aunque no alcanza los niveles de depuración del MBR, su menor costo y complejidad lo hacen una opción viable para esquemas de reuso parcial en procesos no críticos como limpieza CIP, lavado de equipos o enfriamiento.

En conjunto, los resultados confirman que la elección de la tecnología híbrida depende del destino del efluente: mientras el CF+MF se orienta principalmente al vertido, el CF+UF cumple un doble rol (vertido y reuso parcial), y el MBR se proyecta como la opción más robusta para el reuso neto. Esta diferenciación permite a las plantas lácteas seleccionar la alternativa más adecuada según sus objetivos de gestión hídrica, disponibilidad de recursos y exigencias regulatorias.

4.6. Normativas ambientales aplicables

El tratamiento y la disposición de aguas residuales industriales está regulado en cada país por marcos normativos que definen parámetros físico-químicos clave y condiciones de descarga o reúso (Ritambhara et al., 2019). En el caso de la industria láctea, que genera efluentes con alta carga orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos, estas normativas son esenciales para evitar impactos negativos en cuerpos de agua receptores, sistemas sanitarios y en la salud pública (Slavov, 2017; Borges Tabelini et al., 2023). Además, en un escenario de escasez hídrica creciente, las regulaciones que permitan o promuevan la reutilización del agua tratada, ya sea para riego o dentro de los propios procesos industriales, se vuelven estratégicas (Ahmed et al., 2023; Figueroa et al., 2021). En esta sección se revisa primero el marco normativo chileno y luego se compara con el de tres países líderes en producción láctea: India, Estados Unidos y Alemania.

4.6.1. Normativa chilena sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales industriales

El tratamiento de aguas residuales industriales en Chile se encuentra regulado por un conjunto de normas técnicas y sanitarias que establecen tanto los límites para su descarga como las condiciones para su eventual reutilización. Estas disposiciones cobran especial relevancia en el caso de la industria láctea, debido al alto contenido de materia orgánica y nutrientes presentes en sus efluentes. Asimismo, en un escenario de creciente escasez hídrica y

presión sobre los recursos naturales, el análisis del marco normativo nacional es fundamental para identificar oportunidades de mejora y adaptación hacia una gestión hídrica más eficiente y sostenible. A continuación, se revisan las principales normativas chilenas aplicables al tratamiento y reúso de aguas residuales, con especial atención a su pertinencia en contextos industriales.

Una de las normativas más relevantes es el Decreto Supremo N°90 Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2001), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en descargas líquidas a cuerpos de aguas superficiales marinas y continentales. Esta norma define parámetros como demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes, temperatura, aceites y grasas, entre otros. Su objetivo es proteger la calidad de los cuerpos receptores y prevenir la degradación de los ecosistemas acuáticos (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2001).

Complementariamente, el Decreto Supremo N°609 (MOP, 1998) regula las descargas de residuos líquidos industriales (RILES) hacia los sistemas de alcantarillado público. Esta norma es clave para las industrias conectadas a redes urbanas, estableciendo límites de descarga que eviten interferencias con el funcionamiento de las plantas de tratamiento operadas por empresas sanitarias (MOP, 1998).

Por su parte, el Decreto Supremo N°46 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2003) establece las condiciones sanitarias y técnicas para el tratamiento de RILES dentro de las instalaciones industriales. Incluye aspectos

como el diseño de estanques, los sistemas de muestreo, control de olores, y los requerimientos de operación y mantenimiento. Esta norma es especialmente importante para obtener las autorizaciones sanitarias necesarias y para garantizar que las aguas tratadas no representen un riesgo para la salud pública (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2003). En materia de reúso, destaca el Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2018), la Ley N°21.075 que regula la recolección, tratamiento y reutilización de aguas grises. Si bien esta ley no se enfoca en aguas industriales, representa un precedente normativo significativo al establecer los criterios técnicos y sanitarios bajo los cuales las aguas tratadas pueden destinarse al riego de áreas verdes, limpieza de calles y usos similares en entornos urbanos o rurales (MOP, 2018). Esta ley se ve complementada por el Reglamento sobre condiciones sanitarias para la reutilización de aguas grises (Ministerio de Salud, 2021), el cual define parámetros de calidad, exigencias de diseño, operación y fiscalización para estos sistemas.

Cabe señalar que, actualmente, no existe en Chile una norma específica que regule de manera integral el reúso de aguas residuales tratadas dentro de la propia industria, por ejemplo, en procesos como el lavado de pisos, enfriamiento de equipos o limpieza de camiones. No obstante, el D.S. N°46 y el Código Sanitario permiten la operación de sistemas cerrados de reutilización interna, siempre que cumplan con los estándares de calidad y cuenten con la autorización correspondiente de la autoridad sanitaria. En la práctica, algunas industrias han implementado este tipo de prácticas como parte de sus

estrategias de eficiencia hídrica, aunque aún carecen de una reglamentación detallada a nivel nacional.

En conjunto, estas normativas configuran un marco regulatorio que establece con claridad las condiciones para la descarga y, parcialmente, para la reutilización de aguas tratadas. Sin embargo, el desarrollo normativo en torno al reúso industrial aún presenta vacíos que podrían abordarse tomando como referencia experiencias internacionales más avanzadas.

4.6.2. Normativas internacionales

En esta sección se abordan los marcos regulatorios de tres países líderes en producción lechera: India, Estados Unidos y Alemania. La selección de estos países responde a su importancia como grandes productores de leche, lo que los convierte en ejemplos relevantes en el contexto de la gestión de aguas residuales industriales en la industria láctea. Según datos recientes del portal World Population Review (2025), India, Estados Unidos y Alemania están entre los principales productores de leche a nivel mundial, lo que proporciona un contexto clave para analizar sus normativas.

A continuación, en la Tabla 7 se presentan las cifras de producción de leche estimadas para el año 2025.

Tabla 7. Producción estimada de leche en 2025 por países líderes en la industria láctea.

País	Producción estimada (millones de toneladas/año)
India	221
Estados Unidos	102
Alemania	21

Fuente: World Population Review, 2025.

4.6.2.1. Normativas sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales en India

El tratamiento de aguas residuales industriales, incluida la industria láctea, está regulado por el Central Pollution Control Board (CPCB), el principal organismo encargado de la protección del medio ambiente y la gestión de residuos en la India. El CPCB establece normativas y directrices para el manejo de efluentes industriales en todo el país, especificando los límites de parámetros clave como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y los aceites y grasas. En las regulaciones del CPCB se establece que los efluentes lácteos deben cumplir con una DBO5 inferior a 100 mg/L, SST inferiores a 150 mg/L y aceites y grasas menores de 10 mg/L (Central Pollution Control Board [CPCB], 2021).

Según las normativas del CPCB, los efluentes de la industria láctea deben cumplir con límites específicos para varios parámetros clave, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), los Sólidos Suspendidos Totales

(SST), y los aceites y grasas. Por ejemplo, la DBO5 debe estar por debajo de los 100 mg/L, los SST no deben superar los 150 mg/L y los aceites y grasas deben ser menores de 10 mg/L (CPCB, 2021). Estas directrices aseguran que las industrias minimicen su impacto ambiental al descargar sus efluentes a cuerpos de agua, protegiendo tanto los ecosistemas acuáticos como la salud humana.

Además, el Indian Standard IS 8682:1977 proporciona directrices más detalladas sobre el tratamiento de efluentes lácteos, y recomienda el uso de tecnologías de tratamiento como la sedimentación y la filtración para los primeros pasos del proceso. El tratamiento biológico, especialmente el uso de lodos activados, se emplea para reducir la carga de contaminantes orgánicos y nutrientes antes de que el agua tratada se devuelva al medio ambiente (Bureau of Indian Standards, 1977).

4.6.2.2. Normativas sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales en Estados Unidos

En Estados Unidos, el tratamiento de aguas residuales industriales, incluida la industria láctea, está regulado principalmente por la Environmental Protection Agency (EPA), bajo la normativa 40 CFR Parte 405, que regula específicamente los efluentes de la industria láctea (Environmental Protection Agency [EPA], 2025). Environmental Protection Agency [EPA]. (2018) que dice que la Clean Water Act (CWA) de 1972 establece los estándares nacionales de calidad del agua y regula las descargas industriales. Esta legislación

establece los límites para varios contaminantes clave en los efluentes industriales, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y el pH, y especifica los límites para las plantas que procesan productos lácteos (EPA, 2025).

Además, la EPA establece los New Source Performance Standards (NSPS), que son normas más estrictas aplicables a las nuevas instalaciones industriales. Estos estándares garantizan que las instalaciones implementen las mejores tecnologías disponibles para el tratamiento de sus efluentes, lo que ayuda a minimizar el impacto ambiental de la industria láctea. Las nuevas plantas deben contar con sistemas avanzados de filtración y tratamiento biológico, como los filtros de lecho bacteriano y los sistemas de lodos activados, para asegurar una reducción significativa en los niveles de DBO y SST (EPA, 2025).

La EPA también promueve el uso de tecnologías sostenibles a través de su programa de Clean Water State Revolving Fund (CWSRF), que proporciona financiamiento a las plantas de tratamiento de aguas residuales para que puedan implementar tecnologías innovadoras de tratamiento y reutilización de aguas residuales. Este fondo fomenta la eficiencia energética, la reducción de la huella hídrica y la reutilización de las aguas tratadas en procesos industriales como el lavado de equipos o el refrigerado de máquinas (EPA, 2025).

En cuanto al tratamiento específico de los efluentes lácteos, el tratamiento primario, secundario y terciario es comúnmente utilizado en el sector. Las

tecnologías incluyen sedimentación, filtración, y biotecnología avanzada, siendo estas claves para tratar las aguas residuales antes de su reutilización o disposición final. Además, las plantas que procesan productos lácteos deben adoptar estrategias de ahorro de agua, incluyendo la reutilización de aguas en los sistemas de limpieza en el sitio (CIP), lo que optimiza tanto los recursos hídricos como la eficiencia operativa (EPA, 2025).

A medida que la industria láctea avanza en el tratamiento de efluentes, la reutilización de agua se ha convertido en una práctica esencial. Esta incluye la reutilización del agua utilizada en el proceso de enfriamiento de la leche, así como en la irrigación de cultivos destinados a la alimentación del ganado y en los sistemas de limpieza de los equipos. Estas prácticas no solo optimizan el uso del agua, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y eficiencia operativa, especialmente en regiones con escasez de recursos hídricos. Las plantas procesadoras de productos lácteos implementan tecnologías avanzadas, como filtros de lecho bacteriano y sistemas de lodos activados, para reducir la huella hídrica (EPA, 2025; U.S. Dairy, 2024; McCabe & Fouts, 2022).

Las plantas procesadoras de productos lácteos en California, por ejemplo, han logrado reducir su uso de agua en un 90% en los últimos 60 años, gracias a la adopción de prácticas innovadoras de reutilización de agua. Este reciclaje de agua, desde el enfriamiento de la leche hasta el lavado de equipos, ha sido clave para enfrentar la escasez hídrica y mejorar la sostenibilidad de la producción lechera (McCabe & Fouts, 2022).

Por último, las plantas procesadoras de productos lácteos que operan en Estados Unidos deben cumplir con una serie de regulaciones estatales y federales para garantizar que sus efluentes sean tratados adecuadamente antes de ser descargados a cuerpos de agua o reutilizados en otros procesos industriales. Esto incluye la implementación de tecnologías como la biotecnología avanzada y el uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales de bajo costo y alta eficiencia (EPA, 2025).

4.6.2.3. Normativas sobre tratamiento y reutilización de aguas residuales en Alemania

En Alemania, el tratamiento de aguas residuales industriales, incluida la industria láctea, está regulado principalmente por la Abwasserverordnung (Reglamento de Aguas Residuales), que establece las condiciones y requisitos para la descarga de efluentes industriales en cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado público. Esta normativa se basa en directrices establecidas por la Agencia Federal de Medio Ambiente (Umweltbundesamt) y está alineada con las regulaciones europeas, especialmente con la Directiva de Aguas Residuales Urbanas (UWWTD) de la Unión Europea. La Abwasserverordnung regula los parámetros máximos permitidos para contaminantes como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), el Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Umweltbundesamt, 2024).

El Abwasserverordnung establece que las plantas industriales, incluida la

industria láctea, deben tratar sus aguas residuales para cumplir con los límites establecidos antes de la descarga al sistema de alcantarillado o cuerpos de agua. Por ejemplo, se establece un límite de 50 mg/L para la DBO5 en las descargas de efluentes, y los SST no deben superar los 150 mg/L (Umweltbundesamt, 2024). Además, se exige que las industrias adopten tecnologías de tratamiento eficientes y sostenibles para reducir la carga contaminante y minimizar el impacto ambiental.

Una de las tecnologías más comunes empleadas en el tratamiento de aguas residuales industriales en Alemania es el tratamiento biológico, que incluye sistemas de lodos activados y filtros de membranas para eliminar contaminantes orgánicos y nutrientes. Estas tecnologías permiten reducir la DBO y los SST en los efluentes antes de su liberación al medio ambiente. Las plantas lácteas también están obligadas a cumplir con las mejores técnicas disponibles (BAT, por sus siglas en inglés), que son establecidas a nivel europeo y promueven el uso de tecnologías avanzadas para la protección ambiental y la sostenibilidad operativa (European Commission, 2020).

Además de cumplir con las regulaciones nacionales, las plantas de tratamiento de aguas residuales en la industria láctea alemana deben adherirse a los requisitos de la Directiva de Aguas Residuales Urbanas (UWWTD) de la Unión Europea, que establece criterios para el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales en todos los estados miembros. Esta directiva tiene como objetivo reducir la contaminación del agua y promover la reutilización de aguas tratadas en procesos industriales (European Commission, 2020). En

este contexto, algunas plantas de la industria láctea en Alemania han implementado sistemas de digestión anaeróbica para producir biogás a partir de los efluentes, lo que contribuye a la generación de energía renovable y reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Un ejemplo destacable de sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea alemana es la planta de tratamiento de aguas residuales en el sur de Alemania, que ha implementado un sistema de tratamiento avanzado utilizando membranas de ultrafiltración y un reactor anaeróbico para la producción de biogás, lo que les permite reutilizar el agua tratada en sus procesos y generar energía para sus operaciones (EnviroChemie, 2024).

4.6.3. Análisis y relevancia de las normativas ambientales en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea

En la industria láctea, el tratamiento de aguas residuales es fundamental para garantizar que los efluentes generados no perjudiquen el medio ambiente ni la salud pública. A través de la comparación de las normativas internacionales, se pueden identificar las diferencias y similitudes en los enfoques de cada país para manejar los efluentes de esta industria. Esta comparación es esencial para evaluar las mejores prácticas y establecer recomendaciones para la normativa chilena, que aún se encuentra en proceso de adaptación a los estándares internacionales. A continuación, la Tabla 8 presenta una comparación de los parámetros clave utilizados en las normativas de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en Chile, India, Estados

Unidos y Alemania.

Tabla 8. Comparación de parámetros clave de tratamiento de aguas residuales en la industria láctea de Chile, India, Estados Unidos y Alemania.

Parámetro	Chile	India	Estados Unidos	Alemania
DBO5 (mg/L)	50	100	2000	50
DQO (mg/L)	100	200	2000	200
SST (mg/L)	150	150	2000	150
pH	6-9	6-9	6-9	6-9
Demanda de Oxígeno Total (TOC) (mg/L)	50	100	3000	50
Nitrógeno Total (mg/L)	10	15	20	10
Fósforo Total (mg/L)	1	5	2	1
Aceites y Grasas (mg/L)	10	15	50	10
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	200	500	2000	100
Temperatura (°C)	20	25	30	15
Reutilización (riego)	Sí (en algunas áreas)	Sí (en procesos industriales)	Sí (CIP y riego)	Sí (biogás y riego)

Fuente: CPCB, 2021; EPA, 2025; Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2001; Umweltbundesamt, 2020.

Con el fin de facilitar la comparación entre los distintos marcos regulatorios

analizados, en la Figura 14 se representan gráficamente los límites permisibles establecidos por las normativas de los cuatro países seleccionados. Este enfoque permite visualizar con mayor claridad las similitudes y diferencias en parámetros clave como pH, DBO₅, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno y fósforo, entre otros.

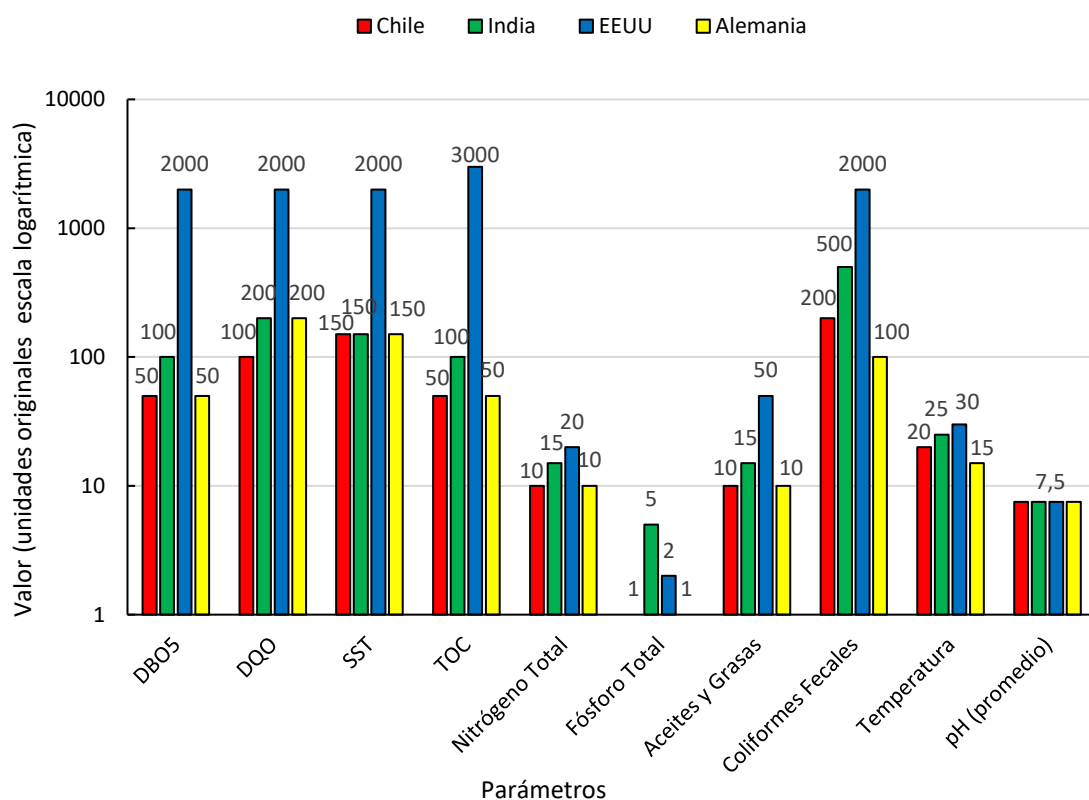


Figura 14. Comparación internacional de límites de descarga en efluentes de industrias lácteas: Chile, India, EE. UU. y Alemania. (Elaboración propia a partir de CPCB, 2021; EPA, 2025; Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2001 y Umweltbundesamt 2020).

La Figura 14 refuerza lo expuesto en la Tabla 8, mostrando de manera visual que Chile mantiene los límites más estrictos en nutrientes (N y P), mientras que Alemania se destaca en parámetros como pH y SST. En contraste, India

y Estados Unidos presentan valores permisivos en la mayoría de los indicadores, reflejando un enfoque menos riguroso. Esta comparación gráfica evidencia que, aunque Chile se posiciona a la vanguardia en control de nutrientes, aún existen oportunidades de mejora en otros parámetros regulatorios para alcanzar un nivel de exigencia integral como el alemán. Este análisis visual se complementa con una revisión más detallada de los parámetros normativos y sus implicancias en la gestión ambiental, particularmente en lo referente a nutrientes críticos como el nitrógeno y el fósforo.

La gestión de nutrientes en los efluentes industriales es crucial para proteger la calidad del agua y prevenir la eutrofización de los cuerpos de agua. En este contexto, Chile ha adoptado límites relativamente estrictos para el nitrógeno y el fósforo en comparación con otros países. Según los datos de la Tabla 8, Chile establece un límite de 10 mg/L de nitrógeno y 1 mg/L de fósforo, lo que es más estricto que en India y Estados Unidos, donde los niveles permitidos son considerablemente más altos. Estos límites estrictos ayudan a reducir la eutrofización en los cuerpos de agua, evitando la proliferación de algas y la consiguiente reducción del oxígeno en el agua, lo cual perjudica la biodiversidad acuática. La eutrofización es un fenómeno directamente relacionado con el exceso de nutrientes en los efluentes industriales, que genera alteraciones graves en los ecosistemas acuáticos.

Al adoptar estos estándares más estrictos, Chile no solo ha alineado sus políticas con las mejores prácticas internacionales en términos de control de

nutrientes, sino que también ha demostrado un compromiso con la sostenibilidad ambiental y la preservación de los ecosistemas acuáticos. Esto coloca a Chile en una posición favorable para mantener la calidad del agua y asegurar que sus efluentes industriales no afecten los cuerpos de agua y sus ecosistemas. Sin embargo, hay áreas en las que se podrían hacer mejoras adicionales para seguir avanzando en la gestión del agua y el tratamiento de efluentes. Por ejemplo, aunque Chile ya tiene un enfoque estricto para la eliminación de nutrientes, se podría considerar una mayor monitorización de estos parámetros en las plantas industriales, adoptando tecnologías avanzadas de monitoreo en tiempo real, como las que se utilizan en Alemania. Además, en cuanto a la reutilización del agua, aunque Chile permite su uso en riego, sería útil fomentar la reutilización interna en procesos industriales, como el lavado de equipos (CIP) y refrigeración, tal como ocurre en Estados Unidos, donde en California algunas plantas procesadoras de productos lácteos han logrado reducir en un 90 % su uso de agua en los últimos 60 años gracias a prácticas innovadoras de reciclaje y reutilización (McCabe & Fouts, 2022). Este enfoque no solo reduce el consumo de agua fresca en las industrias lácteas, sino que también mejora la eficiencia operativa y minimiza el impacto ambiental.

Asimismo, Chile podría reforzar sus esfuerzos para garantizar que los límites de nutrientes establecidos se cumplan de manera estricta, incluso promoviendo el uso de tecnologías de digestión anaeróbica que generen biogás a partir de los efluentes, como ocurre en Alemania. La incorporación de

tecnologías de monitoreo en tiempo real también permitiría un control más riguroso y transparente de los parámetros críticos. De esta forma, Chile no solo consolidaría su liderazgo en el control de nutrientes, sino que también avanzaría hacia una gestión hídrica y energética más sostenible en la industria láctea.

4.7. Indicadores técnicos y ambientales para evaluar sistemas

La evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en la industria láctea debe sustentarse en un conjunto de indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos que permitan comparar de forma objetiva el desempeño de distintas alternativas tecnológicas. Esta mirada integral no solo permite seleccionar las opciones más eficientes desde el punto de vista de la remoción de contaminantes, sino también aquellas que demuestren sostenibilidad a largo plazo, viabilidad económica y cumplimiento de los marcos regulatorios vigentes.

Desde una perspectiva técnica, uno de los indicadores fundamentales es la eficiencia de remoción de contaminantes, expresada como el porcentaje de reducción de parámetros críticos como la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO5), los sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites. Estos parámetros caracterizan el alto contenido orgánico de los efluentes lácteos, los cuales provienen principalmente del suero, la leche derramada y los residuos de limpieza CIP (clean-in-place) (Slavov, 2017). Tecnologías como los biorreactores con

membranas (MBR) y los sistemas de ultrafiltración (UF) han demostrado eficiencias de remoción superiores al 95% en DQO y SST, lo que los posiciona como opciones altamente eficaces (Iorhemen, Hamza & Tay, 2016; Ritambhara et al., 2019).

Otros indicadores técnicos relevantes incluyen el caudal tratado, que refleja la capacidad de respuesta ante la variabilidad de producción típica de la industria láctea, y el tiempo de retención hidráulica (TRH), crucial para mantener la estabilidad del sistema en procesos biológicos o anaerobios. En estudios de aplicación de reactores UASB, se ha evidenciado que cargas superiores a 9,6 g DQO/L*d permiten alcanzar hasta un 98% de remoción de carga orgánica, aunque a tasas mayores la eficiencia disminuye, lo que subraya la importancia de este parámetro como indicador de dimensionamiento adecuado (Arango & Sousa, 2009).

En el ámbito ambiental, el consumo de agua por litro de leche procesada es una métrica crítica, especialmente en contextos de estrés hídrico como el que enfrenta Chile. Se estima que este consumo puede oscilar entre 1 y 10 litros de agua por cada litro de leche, dependiendo del grado de automatización, las tecnologías de limpieza y la aplicación de prácticas de producción más limpia (Slavov, 2017; CONAMA, 2001). Junto con ello, el potencial de reúso del efluente tratado cobra especial relevancia, particularmente si se considera el marco normativo chileno establecido en el Decreto Supremo N°50/2021 del Ministerio de Salud, el cual regula la reutilización de aguas grises para riego u otros usos no potables. Para que un efluente pueda ser reutilizado, debe

cumplir con estrictos parámetros físico-químicos y microbiológicos, lo que convierte esta condición en un indicador clave de desempeño ambiental (Ministerio de Salud, 2021).

En términos económicos, los indicadores más utilizados son el CAPEX (costo de inversión) y el OPEX (costo operativo), expresados generalmente en dólares por metro cúbico tratado. Las tecnologías de membrana suelen implicar un mayor CAPEX en comparación con métodos convencionales, pero presentan ventajas significativas en OPEX debido a la recuperación de agua y subproductos, y a la menor generación de lodos. Según datos del sector, los costos operativos para tratamientos avanzados oscilan entre 0,5 y 2,5 USD/m³, siendo los sistemas con recuperación de energía (como digestión anaerobia) y los sistemas integrados de membrana los que ofrecen mejor relación costo-beneficio a mediano plazo (Slavov, 2017; Ritambhara et al., 2019; CONAMA, 2001).

A nivel normativo, en Chile destacan como referentes el Decreto Supremo N°90/2000, que establece los límites máximos de descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua, y el Reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises, que define los estándares de calidad exigidos para distintos usos del efluente tratado (Ministerio de Salud, 2021). El cumplimiento de estas normativas, así como la integración de prácticas recomendadas por organismos como la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y la Dirección General de Aguas (DGA), representa un criterio esencial de evaluación, ya que determina la viabilidad legal y

ambiental del sistema.

Finalmente, indicadores como el potencial de reúso, la proporción de agua recuperada, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) asociada al tratamiento, y el costo evitado por sanciones o pérdida de producto, permiten una evaluación holística del impacto ambiental y económico del sistema, en línea con los principios de economía circular y desarrollo sostenible.

En conjunto, estos indicadores permiten realizar una evaluación comparativa de tecnologías, optimizar la toma de decisiones en el diseño de plantas de tratamiento, y orientar las inversiones hacia soluciones que, además de cumplir con las exigencias técnicas, contribuyan a la resiliencia hídrica, al cumplimiento normativo y a la competitividad de las industrias lácteas en contextos cada vez más exigentes.

A continuación, se presentan ocho tablas individuales, cada una correspondiente a una tecnología de tratamiento evaluada en este estudio. En ellas se resumen sus desempeños frente a los indicadores técnicos, ambientales y económicos definidos para la industria láctea de tamaño mediano en Chile. Estas tablas buscan servir como una herramienta de referencia práctica para empresas del sector, permitiéndoles seleccionar combinaciones tecnológicas que aseguren una alta eficiencia en la remoción de contaminantes, el cumplimiento de la normativa vigente y un uso sostenible de los recursos hídricos. Las tecnologías listadas han sido evaluadas dentro del presente estudio, considerando tanto su rendimiento como su aplicabilidad en el contexto chileno.

Tabla 9. Desempeño de Coagulación–Floculación (CF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de CF
Remoción de DQO	85–98%	Moderada remoción (~50–70%)
Remoción de DBO5	80–95%	Moderada remoción (~50–60%)
Remoción de SST	85–99%	Alta remoción (~80–90%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Alta capacidad, adaptable
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Corto TRH (~1–6 h) en diseño convencional
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	No afecta directamente el indicador
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Muy bajo consumo energético (~0.1–0.3 kWh/m ³)
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Bajo a moderado (infraestructura sencilla)
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Moderado por uso de químicos y manejo de lodos
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Requiere etapas complementarias (filtración/desinfección)
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Cumple parcialmente; requiere postratamiento para reúso

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017.

Tabla 10. Desempeño de Microfiltración (MF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de MF
Remoción de DQO	85–98%	Baja remoción (~30–50%)
Remoción de DBO5	80–95%	Baja remoción (~20–40%)
Remoción de SST	85–99%	Alta remoción (~85–95%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Alta capacidad para caudales variables
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Muy corto TRH (<1 h), filtración directa
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	Contribuye a reducirlo si se reutiliza permeado
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Bajo consumo (~0.2–0.5 kWh/m ³)
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Moderado, depende del tipo de membranas
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Moderado por limpieza y reemplazo de membranas
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Limitado sin desinfección posterior
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Requiere combinación con tratamiento previo o desinfección

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017.

Tabla 11. Desempeño de Ultrafiltración (UF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de UF
Remoción de DQO	85–98%	Moderada a alta remoción (~60–85%)
Remoción de DBO5	80–95%	Moderada remoción (~50–70%)
Remoción de SST	85–99%	Muy alta remoción (~95–99%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Alta capacidad para caudales variables
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Muy corto TRH (<1 h), filtración directa
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	Contribuye a reducirlo si se reutiliza el permeado
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Bajo consumo (~0.3–0.6 kWh/m ³)
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Moderado, por uso de membranas especializadas
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Moderado por mantenimiento y limpieza de membranas
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Alto si se combina con desinfección
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Cumple con tratamiento complementario o posterior

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017.

Tabla 12. Desempeño de Nanofiltración (NF) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de NF
Remoción de DQO	85–98%	Alta remoción (~85–95%)
Remoción de DBO5	80–95%	Alta remoción (~80–90%)
Remoción de SST	85–99%	Muy alta remoción (~95–99%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Moderada capacidad, requiere presión elevada
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Muy corto TRH (<1 h), filtración por membrana densa
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	Reduce el consumo si se reutiliza permeado
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Medio (~0.6–1.2 kWh/m ³), requiere presión intermedia
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Moderado a alto, por uso de membranas especializadas
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Moderado, depende de la frecuencia de limpieza y reemplazo
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Muy alto si se combina con desinfección o RO
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Cumple si se integra en tren de tratamiento

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017.

Tabla 13. Desempeño de Ósmosis Inversa (RO) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de RO
Remoción de DQO	85–98%	Muy alta remoción (~95–98%)
Remoción de DBO5	80–95%	Muy alta remoción (~90–95%)
Remoción de SST	85–99%	Muy alta remoción (~95–99%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Moderada capacidad, depende del diseño y presión
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Muy corto TRH (<1 h), paso a presión por membrana densa
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	Disminuye si se reutiliza permeado; genera concentrado
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Alto (~2.5–6 kWh/m ³), según presión y fouling
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Alto, por sistemas de alta presión y materiales resistentes
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Alto, por limpieza química, energía y reemplazo de membranas
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Muy alto, puede alcanzar calidad de agua ultrapura
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Cumple ampliamente si el sistema está bien dimensionado

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017.

Tabla 14. Desempeño de Biorreactor con Membranas (MBR) frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de MBR
Remoción de DQO	85–98%	Muy alta remoción (~90–96%)
Remoción de DBO5	80–95%	Muy alta remoción (~85–95%)
Remoción de SST	85–99%	Muy alta remoción (~95–99%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Moderada capacidad, adaptable a variabilidad
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Moderado (~8–24 h), depende de carga orgánica
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	Disminuye por posibilidad de recirculación del efluente tratado
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Medio a alto (~0.8–1.5 kWh/m ³) por aireación y bombeo
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Alto, por integración de sistemas biológicos y membranas
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Moderado a alto, depende del fouling y frecuencia de limpieza
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Muy alto; se usa como tratamiento terciario completo
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Cumple ampliamente; considerada tecnología avanzada

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017.

Tabla 15. Desempeño de CF + MF frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de CF + MF
Remoción de DQO	85–98%	Alta remoción (~70–85%)
Remoción de DBO5	80–95%	Alta remoción (~70–85%)
Remoción de SST	85–99%	Muy alta remoción (~90–98%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Alta capacidad, adaptable
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Corto (~2–6 h), depende de configuración
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	Reduce el consumo si se reutiliza el permeado
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Bajo (~0.3–0.5 kWh/m ³), por operación a baja presión
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Moderado, por integración de membranas y dosificación química
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Moderado por uso de químicos y limpieza de membranas
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Alto si se incluye desinfección complementaria
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Cumple con diseño adecuado y postratamiento

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017.

Tabla 16. Desempeño de CF + UF frente a indicadores técnicos, ambientales, económicos y normativos.

Indicador	Rango esperado	Desempeño de CF + UF
Remoción de DQO	85–98%	Alta remoción (~75–90%)
Remoción de DBO5	80–95%	Alta remoción (~75–90%)
Remoción de SST	85–99%	Muy alta remoción (~95–99%)
Caudal tratado	5–50 m ³ /h	Alta capacidad, adaptable a variabilidad de caudal
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	6–36 h	Corto (~2–6 h), buena estabilidad de operación
Consumo de agua por litro de leche	1–10 L/L	Reduce el consumo al facilitar la reutilización del permeado
Consumo energético	0.3–1.5 kWh/m ³	Bajo a medio (~0.4–0.6 kWh/m ³)
CAPEX (costo de inversión)	0.8–2.5 USD/m ³	Moderado, por integración de unidades químicas y membranas
OPEX (costo de operación)	0.3–1.5 USD/m ³	Moderado por uso de químicos y mantenimiento de membranas
Potencial de reúso	>90% (usos no potables)	Muy alto, especialmente si se aplica desinfección posterior
Cumplimiento normativo	Obligatorio (DS N°90 / aguas grises)	Cumple ampliamente si se diseña como tren completo

Fuente: Ahmed et al., 2023; Baker, 2012; CONAMA, 2001; Figueroa et al., 2021; Ministerio de Salud, 2021; Ritambhara et al., 2019 y Slavov, 2017).

A diferencia de las comparaciones intermedias presentadas previamente donde se emplearon escalas ordinales tipo Likert para facilitar la visualización de parámetros específicos, la comparación global de todas las tecnologías requiere un enfoque más robusto y sistemático. Por ello, se aplicó una metodología de análisis multicriterio (MCDM), que integra indicadores técnicos, ambientales y económicos bajo un marco común de evaluación. Este procedimiento permite superar las limitaciones de las escalas descriptivas, evitando sesgos de interpretación y otorgando mayor rigor a la comparación integral. La metodología seguida se detalla a continuación.

4.7.1. Metodología MCDM para gráfico radar comparativo

Para integrar y comparar de manera global todas las tecnologías analizadas en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, se aplicó una metodología multicriterio (MCDM, Multi-Criteria Decision Making). Este enfoque complementa los análisis descriptivos previos basados en escalas ordinales y permite evaluar simultáneamente criterios técnicos, ambientales y económicos, representando los resultados en un gráfico radar. De esta manera, se obtiene una visualización clara de las fortalezas y debilidades relativas de cada tecnología, lo que facilita la toma de decisiones fundamentadas (Govindan et al., 2015; Zavadskas & Turskis, 2011).

Paso 1. Selección de indicadores

Se definieron diez indicadores clave, obtenidos de la literatura especializada y de las tablas construidas previamente en el marco teórico:

- Técnicos: Remoción de DQO, DBO₅ y SST; Caudal tratado; Tiempo de retención hidráulica (TRH).
- Ambientales: Consumo de agua por litro de leche; Potencial de reúso; Cumplimiento normativo.
- Económicos: Consumo energético; CAPEX (costo de inversión); OPEX (costo de operación).

La selección responde a criterios de relevancia, representatividad y disponibilidad de datos, tal como sugieren Baker (2012) y Ritambhara et al. (2019) para la evaluación de tecnologías de membranas en la industria láctea.

Paso 2. Normalización de datos

Dado que los indicadores presentan unidades y escalas heterogéneas, se aplicó un proceso de normalización min–max para llevar todos los valores a una escala común entre 1 y 5, donde:

- 5 siempre corresponde al desempeño más favorable, independientemente del tipo de indicador.
- 1 corresponde al desempeño menos favorable.

Este procedimiento asegura comparabilidad entre indicadores de distinta naturaleza, siguiendo los fundamentos de la teoría de escalas de medición de Stevens (1946).

Paso 3. Orientación de los criterios

Para garantizar la consistencia de la escala, en los indicadores de costo o impacto (por ejemplo, OPEX o consumo energético) se aplicó una inversión de valores en la normalización, de modo que un menor costo o menor consumo

se traduzca en un puntaje más alto. De esta forma, en todos los criterios, un valor 5 representa la condición más ventajosa y un valor 0 la menos favorable, asegurando que la lectura de los gráficos sea homogénea.

Paso 4. Construcción de los gráficos radar

Con el fin de reflejar de manera más justa el rol de cada alternativa, se elaboraron dos gráficos diferenciados según la finalidad del efluente tratado:

- **Vertido de efluentes lácteos:** incluye tecnologías orientadas al cumplimiento normativo y disposición segura en cuerpos receptores. Cabe señalar que la coagulación–floculación, si bien puede en algunos casos cumplir con los límites básicos de DBO_5 y SST del DS-90, presenta un desempeño inestable y dependiente de la carga del efluente. Por ello, se la considera principalmente como etapa de pretratamiento más que como tecnología final de vertido.
- **Reuso de efluentes lácteos:** incluye tecnologías capaces de generar un agua de calidad suficiente para ser reutilizada parcial o totalmente en la planta.

Los valores normalizados de cada tecnología (Coagulación–Floculación, MF, UF, NF, RO, CF+MF/UF y MBR) se representaron en los gráficos radar. Este tipo de representación gráfica es ampliamente utilizada en procesos de evaluación multicriterio, ya que facilita la comparación simultánea y permite visualizar los compromisos entre eficiencia, costos y sostenibilidad (Govindan et al., 2015; Zavadskas & Turskis, 2011).

Paso 5. Interpretación

La interpretación de los gráficos permitió identificar patrones específicos según cada escenario. En el caso del vertido, destacan tecnologías más simples y costo-eficientes como CF y MF. En el escenario de reuso, tecnologías avanzadas como RO y MBR muestran mayores niveles de depuración y estabilidad operativa, aunque con costos energéticos y operativos más elevados. De esta forma, la separación en escenarios permite una comparación más justa y orientada a la finalidad de uso, reforzando el valor del gráfico radar como herramienta de apoyo en la toma de decisiones.

Con la aplicación de la metodología descrita, se obtuvieron los valores normalizados de desempeño de cada tecnología, representados en la Figura 15 (escenario de vertido) y Figura 16 (escenario de reuso) mediante un gráfico radar multivariable. Esta representación permite comparar simultáneamente criterios técnicos, ambientales y económicos, evidenciando las fortalezas y debilidades relativas de cada alternativa tecnológica, y proporcionando un insumo visual clave para la interpretación y la toma de decisiones.

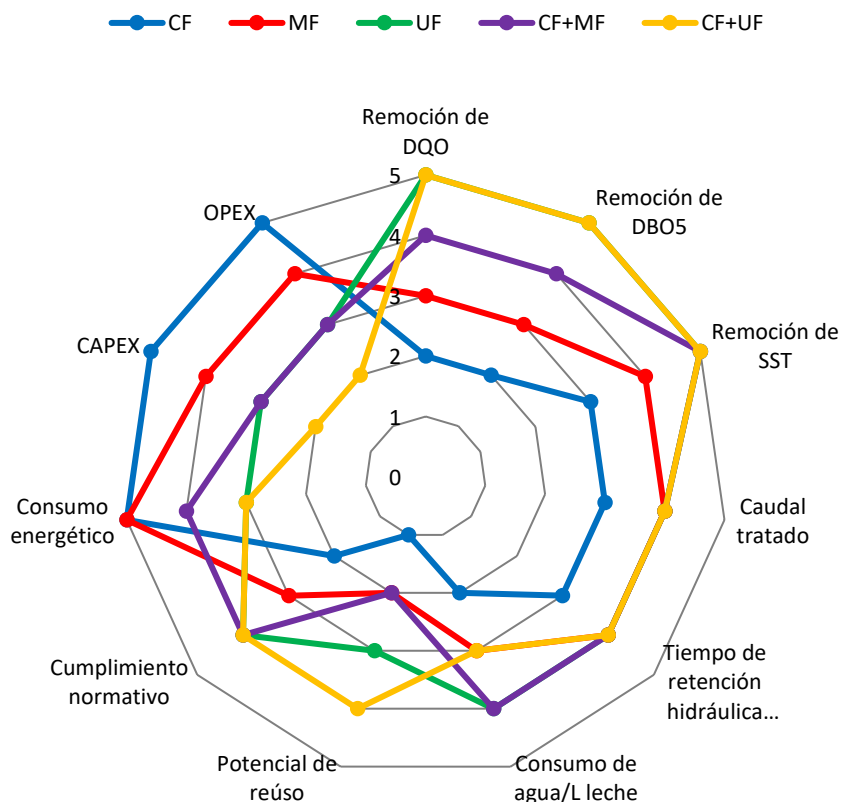


Figura 15. MCDM de tecnologías para vertido en industria láctea (gráfico radar). Indicadores técnicos, ambientales y económicos. (Elaboración propia con base en los datos de las Tablas del apartado 4.7 “Indicadores técnicos y ambientales para evaluar sistemas”).

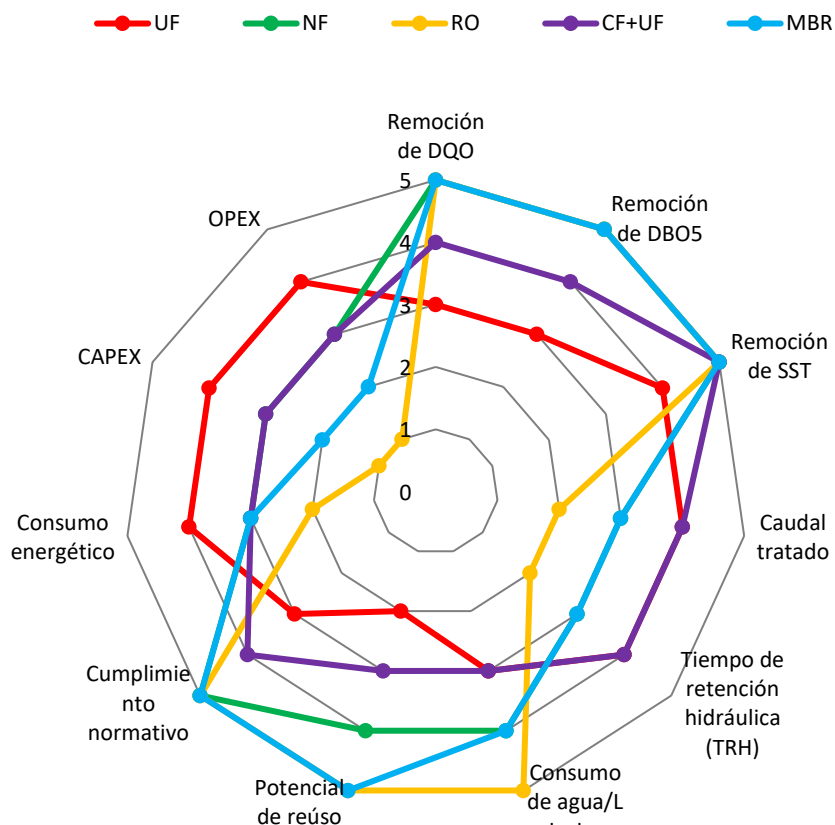


Figura 16. MCDM de tecnologías para reuso en industria láctea (gráfico radar). Indicadores técnicos, ambientales y económicos. (Elaboración propia con base en los datos de las Tablas del apartado 4.7 “Indicadores técnicos y ambientales para evaluar sistemas”).

4.7.2. Discusión de resultados de los gráficos radar comparativos

En el escenario de vertido (Figura 15) se observa que las tecnologías convencionales, como la coagulación–floculación (CF) y la microfiltración (MF), presentan un desempeño limitado en términos de eficiencia y potencial de reuso. Sin embargo, destacan por su simplicidad operativa y bajos costos, lo que las mantiene vigentes en contextos de recursos económicos restringidos o cuando el objetivo principal es cumplir con la normativa básica de vertido (Ahmed et al., 2023; Figueroa et al., 2021). En este mismo

escenario, la configuración híbrida CF+MF ofrece un desempeño intermedio al mejorar la remoción de contaminantes respecto de las tecnologías convencionales, aunque con la desventaja de la generación de lodos químicos. Por su parte, la ultrafiltración (UF) logra mejores niveles de calidad del efluente y una cobertura más amplia de criterios, lo que confirma su pertinencia como alternativa viable cuando se busca un equilibrio entre eficiencia técnica y viabilidad económica (Ritambhara et al., 2019).

En el escenario de reúso (Figura 16), las membranas avanzadas nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO) alcanzan los valores más altos en eficiencia y calidad de efluente, respaldando lo señalado por Baker (2012) y Ritambhara et al. (2019) respecto a su capacidad para cumplir con estándares exigentes de reúso. No obstante, este rendimiento se ve contrapesado por costos elevados y un mayor consumo energético, especialmente en el caso de RO. La UF, en cambio, ofrece un desempeño más modesto, pero con ventajas operativas y energéticas que permiten su uso en aplicaciones parciales de reúso, como limpieza CIP o riego. La configuración híbrida CF+UF constituye una opción intermedia: incrementa la calidad del efluente, aunque a costa de una mayor producción de lodos. Finalmente, los biorreactores de membrana (MBR) destacan por su robustez y alineación con principios de sostenibilidad, al combinar altas tasas de remoción con estabilidad operativa y potencial de integración en esquemas de economía circular, aunque requieren mayor nivel de tecnificación y presentan costos relevantes (Ahmed et al., 2023).

En síntesis, los resultados de ambos escenarios muestran que no existe una única tecnología óptima, sino alternativas con ventajas y limitaciones relativas según el objetivo de tratamiento. Para vertido, las opciones convencionales y los híbridos simples siguen siendo relevantes por su bajo costo y factibilidad técnica; mientras que, para reúso, tecnologías como NF, RO y MBR son superiores en eficiencia y cumplimiento normativo, aunque penalizadas en lo económico y energético. El enfoque multicriterio aplicado (MCDM) permitió identificar estos equilibrios, lo que reafirma que la selección tecnológica debe considerar simultáneamente los criterios técnicos, económicos, ambientales y regulatorios, de acuerdo con el contexto de aplicación (Zavadskas & Turskis, 2011; Govindan et al., 2015).

5. CONCLUSIÓN

La evidencia muestra que la coagulación–floculación es eficaz como etapa primaria para remover sólidos, grasas y turbidez. No obstante, por sí sola no alcanza estándares de reúso; su mayor valor está en el pretratamiento de trenes más avanzados.

En tecnologías de membrana, la microfiltración aporta una barrera eficiente para sólidos y reduce el ensuciamiento aguas abajo; la ultrafiltración incrementa la retención de coloides y macromoléculas; la nanofiltración mejora la reducción de materia orgánica y sales divalentes; y la ósmosis inversa logra las calidades más altas para reúso, con mayores exigencias operativas y de costo. En conjunto, permiten escalar la calidad según la meta (vertido o reúso).

La comparación normativa entre Chile, India, Estados Unidos y Alemania evidenció heterogeneidad de criterios y exigencias. Para Chile destacan estándares estrictos en parámetros clave y la necesidad de mayor definición para el reúso interno en planta, elementos que orientan la selección tecnológica y los puntos de control.

La construcción e integración de indicadores técnicos, ambientales y económicos —bajo un enfoque multicriterio— entregó una base transparente y trazable para comparar alternativas y sustentar decisiones en plantas medianas.

Con lo anterior, se identifican rutas viables para el contexto chileno: coagulación–floculación + micro/ultrafiltración para vertido y pretratamiento, ultrafiltración/nanofiltración como equilibrio entre desempeño y energía, y ósmosis inversa/MBR para esquemas de reúso más exigentes, fortaleciendo la inversión informada, el cumplimiento regulatorio y la gestión hídrica.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, W., Nasreen, S., Jabeen, R., Hussain, A., & Shah, A. A. (2023). Wastewater treatment in the dairy industry from classical treatment to promising technologies: An overview. *Processes*, 11(5), 1392. <https://doi.org/10.3390/pr11051392>.
- Al-Tayawi, A. N., Sisay, E. J., Beszédes, S., & Kertész, S. (2023). Wastewater Treatment in the Dairy Industry from Classical Treatment to Promising Technologies: An Overview. *Processes*, 11(7), 2133. <https://doi.org/10.3390/pr11072133>.
- Andrade, L. H., Mendes, F. D. S., Espindola, J. C., Amaral, M. C. S., & Ferreira, L. M. (2014). Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor and nanofiltration: Technical and economic feasibility. *Separation and Purification Technology*, 126, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.038>.
- Arango, Á., & Garcés, L. F. (2007). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 2(2), 24–31.
- Arango, A., & Sousa, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. *Revista Producción + Limpia*, 2(2), 24–30.
- Baker, R. W. (2012). *Membrane Technology and Applications* (3rd ed.). Wiley.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2018, mayo 25). Situación de los recursos hídricos en Chile.
- Borges Tabelini, D., Pereira Lima, J. P., Carraro Borges, A., & Aguiar, A.

- (2023). A review on the characteristics and methods of dairy industry wastewater treatment in the state of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103779. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103779>.
- Bortoluzzi, A. C., Demaman Oro, C. E., dos Santos, M. S. N., Mignoni, M. L., Dallago, R. M., Steffens, J., & Tres, M. V. (2022). Combination of chemical coagulation and membrane-based separation for dairy wastewater treatment. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05590-2>.
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment* (3rd ed.). IWA Publishing.
- Bureau of Indian Standards. (1977). *Indian Standard IS 8682:1977 - Guide for treatment and disposal of effluents of dairy industry*.
- Caro Estrada, R. (2020). *Estudio de aplicación de biorreactores de membrana (MBR) en la depuración de aguas residuales*. Universidad de Cádiz.
- Central Pollution Control Board (CPCB). (2021). *Guidelines for environmental management of dairy farms and Gaushalas*. Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Govt. of India.
- Chen, V., Li, H., & Fane Fane, A. G. (2018). Fouling behaviour of polyamide nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 547, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.02.009>.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (2001). *Guía para el*

control y prevención de la contaminación industrial: Fabricación de productos lácteos. Santiago, Chile.

<https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-fichas/trabajadores/lacteos.pdf>.

Consortio Lechero. (2023). El CIL presenta nuevos Indicadores del Sector Lácteo 2023. Recuperado de <https://consorciolechero.cl/el-cil-presenta-nuevos-indicadores-del-sector-lacteo-2023/>.

Costa, F. C. R., Moreira, V. R., Guimarães, R. N., Moser, P. B., Santos, L. V. S., de Paula, E. C., & Amaral, M. C. S. (2024). Pre-oxidation and coagulation-flocculation as a pretreatment to UF-RO applied for surface water treatment and arsenic removal. *Desalination*, 586, 117855. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117855>.

Duan, J., & Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100–102, 475–502. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(02\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00067-2).

Ecopreneur SA. (2023, septiembre 7). Tratamiento de efluentes de la industria láctea: Qué tecnologías se utilizan. <https://contenidos.ecopreneursa.com/ecopreneursa-blog/tratamiento-efluentes-industria-lactea>.

EnviroChemie. (2024). Major German dairy commissions the planning of a new wastewater treatment system with a biogas plant. Retrieved April 17, 2025, from <https://www.envirochemie.com/en/news-events/news/major-german-dairy-commissions-the-planning-of-a-new->

[wastewater-treatment-system-with-a-biogas-plant/](#).

Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Clean Water Act of 1972 (33 U.S.C. § 1251 et seq.). <https://www.govinfo.gov/content/pkg/USCODE-2018-title33/pdf/USCODE-2018-title33-chap26.pdf>.

Environmental Protection Agency (EPA). (2025). Dairy products processing effluent guidelines [40 CFR Part 405].

European Commission. (n.d.). Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD) for Germany. Retrieved April 17, 2025, from <https://water.europa.eu/freshwater/countries/uwwt/germany>.

Figuerola, P., Peña, C., & Sandoval, D. (2021). Comparación de tecnologías de membranas para el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Ingeniería Ambiental y Sanitaria*, 8(2), 45–60.

Freeman, B. D., Werber, J. R., Deshmukh, A., & Elimelech, M. (2024). Fouling of reverse osmosis membranes by low molecular weight organic compounds: Mechanisms and control strategies. *Journal of Membrane Science*, 671, 121234.

Gaibor, J. (2014). Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos El Salinerito – parroquia Salinas – cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento. *Revista De Investigación Talentos*, 1(I), 107-112. <https://talentos.ueb.edu.ec/index.php/talentos/article/view/92>.

Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., & Murugesan, P. (2015). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and

selection: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 98, 66–83.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.046>.

Gutiérrez-Gómez, C., Inostroza, R. A., Mujica, P. T., Bahamondes, P. E., & Huerta, J. N. (2019). CHAPTER 5, BUILDING RESILIENCE: THE RECIPROCAL RELATIONSHIP BETWEEN LIVESTOCK AND CLIMATE CHANGE IN CHILE. ENVIRONMENTAL HISTORY, PERSPECTIVES AND CHALLENGES.

Iannelli, L. M. (2020). Tratamiento de efluentes líquidos en una industria láctea ubicada en Marcos Paz (Proyecto Final Integrador, Universidad Nacional de San Martín).

Iorhemen, O. T., Hamza, R. A., & Tay, J. H. (2016). Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. *Membranes*, 6(2), 33.
<https://doi.org/10.3390/membranes6020033>.

IVACE. (2020). Lácteos en Chile. Recuperado de <https://www.ivace.es/Internacional/Informes-Publicaciones/Pa%C3%ADses/Chile/Chilelacteicex2020.pdf>.

Jadhav, S. V., Rathod, V. K., & Banerjee, U. C. (2022). Combination of chemical coagulation and membrane-based separation for dairy wastewater treatment. *Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 1002–1014. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05145-3>.

Jiang, J. Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 36–44.

<https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>.

- Kaur, N. (2021). Different treatment techniques of dairy wastewater. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100640>.
- Khojare, A., Kadu, A., Wasnik, P., Patil, M., & Khojare, M. (2005). Adaptability of membranes for dairy waste management. *Asian Journal Experimental Science*, 19.
- Kushwaha, J. P., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2010). Treatment of dairy wastewater by inorganic coagulants: Parametric and disposal studies. *Water Research*, 44(20), 5867–5874.
- Le-Clech, P., Chen, V., & Fane, T. A. G. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284(1–2), 17–53.
- Lerdon, G., & Aspe, R. (2010). Caracterización productiva y económica de explotaciones lecheras en el sur de Chile. *Idesia (Arica)*, 28(3), 235-242. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292010000300006&script=sci_arttext.
- Liu, Z., Cao, J., Li, C., & Meng, H. (2017). A review on cleaning of nanofiltration and reverse osmosis membranes used for water treatment. *Desalination And Water Treatment*, 87, 27-67. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21002>.
- Maeda, Y. (2024). Fouling of Reverse Osmosis (RO) and Nanofiltration (NF) Membranes by Low Molecular Weight Organic Compounds (LMWOCs),

Part 1: Fundamentals and Mechanism. *Membranes*, 14(10), 221.

<https://doi.org/10.3390/membranes14100221>.

Martínez-Lagos, J., & Salazar, F. (2015). Huella hídrica de la producción de leche en el sur de Chile. En *Memorias del V Congreso Latinoamericano de Agroecología* (ISBN 978-950-34-1265-7). Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA-Remehue, Chile.

McCabe, C., & Fouts, J. (2022, septiembre 19). Reduce, reuse, recycle: How water is managed on Western U.S. dairies. UC Davis Clear.

<https://clear.ucdavis.edu/explainers/reduced-reused-recycled-how-water-managed-western-us-dairies>.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (1998). Decreto Supremo N° 609: Establece condiciones de descarga de residuos líquidos a sistemas de alcantarillado. <https://www.leychile.cl/navegar?idNorma=121486>.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2018). Ley N° 21.075: Regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises. <https://www.leychile.cl/navegar?idNorma=1115066>.

Ministerio de Salud (2021): Reglamento sanitario D.S. N°50/2021, usado para definir criterios normativos de reúso y cumplimiento legal.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2001). Decreto Supremo N°90: Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.leychile.cl/navegar?idNorma=182637>.

- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2003). Decreto Supremo N°46: Norma de emisión para la descarga de residuos líquidos a aguas subterráneas. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2003). Decreto Supremo N° 46: Norma de emisión para la descarga de residuos líquidos a aguas subterráneas. <https://www.leychile.cl/navegar?idNorma=206883>.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2019). Descripción de la Cadena Láctea en Chile. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/12/DescripcionCadenaLacteaChile.pdf>.
- País Circular. (2020, septiembre 1). Industria láctea inicia trabajo para avanzar hacia la sustentabilidad de sus productos y procesos con foco en mitigación y adaptación al cambio climático - País Circular. País Circular. <https://www.paiscircular.cl/industria/industria-lactea-inicia-trabajo-para-avanzar-hacia-la-sustentabilidad-de-sus-productos-y-procesos-con-foco-en-mitigacion-y-adaptacion-al-cambio-climatico/>.
- Prudêncio, S. H., Mandelli, F. L., & Müller, C. M. O. (2014). Influence of diafiltration and nanofiltration on ricotta cheese quality. *Food Research International*, 56, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.016>.
- Ribeiro, M. (2007). Preparación de membranas para producción de agua potable [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].
- Ritambhara, Z., Vijayaraghavalu, S., Prasad, H.K., & Kumar, M. (2019). Treatment and recycling of wastewater from dairy industry. En R. Singh

- & R. Singh (Eds.), *Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future*. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-1468-1_4.
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310.
<https://doi.org/10.1038/nature06599>.
- Slavov, A. K. (2017). General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater - A review. *Food Technology and Biotechnology*, 55(1), 14–28. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.01.17.4520PMC5434364>.
- Sonawane, A. V., & Murthy, Z. V. P. (2023). Domestic wastewater treatment by membrane bioreactor: A performance evaluation study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1413–1426.
- Stevens, S. S. (1946). On the theory of scales of measurement. *Science*, 103(2684), 677–680. <https://doi.org/10.1126/science.103.2684.677>.
- Tuset, S. (2023, abril 18). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea | Condorchem Enviro Solutions. Condorchem Enviro Solutions.
<https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-industria-lactea/>.
- U.S. Dairy. (2024, abril 11). How dairy farmers reuse water responsibly. U.S. Dairy. <https://www.usdairy.com/news-articles/dairy-farm-water-usage>.
- Umweltbundesamt. (2024). Abwasserverordnung (Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer). BGBl.

2024 I, Nr. 132.

Veolia Water Technologies. (2017). Nestlé recupera agua de su leche con tecnología de Veolia.

<https://www.veoliawatertechnologies.es/publicaciones/nestle-recupera-agua-su-leche-tecnologia-veolia>.

Wang, Z., Wu, Z., & Tang, S. (2014). Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 460, 115–122.

World Population Review. (2025). Milk production by country.

<https://worldpopulationreview.com/country-rankings/milk-production-by-country>.

Yolanda Alberto. (2023, marzo 22). Tecnología que reduce impacto del cambio climático en consumo por Yolanda Alberto - Departamento de Ingeniería Civil - FCFM - Universidad de Chile. Ing Civil U Chile.

<https://ingcivil.uchile.cl/noticias/203429/tecnologia-que-reduce-impacto-del-cambio-climatico-en-consumo>.

Yordanov, D., & Kolev, D. (2020). General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater. *Ecological Engineering and Environment Protection*, 1, 44–54.

Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(2), 397–427.

<https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>.

Zuriaga, I., Arnal, J. M., & Sancho, M. (2019). Advanced membrane technologies for water treatment in the food industry. *Journal of Food Engineering Research*, 3(2), 110–122.