



Universidad de Concepción  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química



## **Aplicación de membranas recicladas en el tratamiento de aguas residuales de baja carga iónica**

POR

**Vicente Esteban Pacheco Oliva**

Memoria de Título presentada a la facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesor Guía

Dr. Rodrigo Bórquez Y.

Profesional Supervisor

Dr. Luis Felipe Montoya R.

Marzo, 2023

Concepción, (Chile)

©2023, Vicente Esteban Pacheco Oliva







## **Prefacio**

Esta memoria de título para optar al grado de Ingeniero Químico que se inició en abril de 2022 obtuvo financiamiento a través del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción.

Además, quiero agradecer en esta instancia a todas las personas que me han ayudado y han hecho que esto sea lo más ameno posible, en lo académico destaco a mi profesor guía Dr. Rodrigo Bórquez por el equipo de trabajo y el seguimiento a lo largo de este proceso, a Alexandra Rozas por toda la ayuda en el laboratorio que tantos problemas dio (en especial la bomba que falló dos veces) y a mis compañeros y amigos que me acompañaron en el día a día durante los 6 años de la carrera.

En lo sentimental quiero destacar y agradecer por todo el cariño de mi familia, a mis hermanos Alonso, Ignacio, Agustín y mi mamá que me dan las fuerzas y ganas día a día para avanzar y me han apoyado desde que tengo memoria.

Quiero agradecer también a Karen González, la compañera de vida que escogí para caminar junto a su lado y que llena mi corazón como nadie más lo ha hecho. Gracias por estar conmigo, tenerme paciencia y llenarme de amor todos los días.

Finalmente agradecer a toda la gente de Interlex por estos últimos años de buen fútbol, amistad y compañerismo.

Es por ustedes en gran parte que esto es posible y puedo dar un paso más finalizando esta etapa.

Vicente Pacheco Oliva

## Resumen

Debido a la escasez de agua en la que se encuentra Chile debido a la sequía y a la contaminación es que urge buscar soluciones a este problema, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías.

El objetivo general de este trabajo es estudiar la viabilidad del reúso de las membranas modificadas de ósmosis a la forma de membranas de ultrafiltración para el tratamiento de aguas residuales con bajo contenido de iones. El trabajo se basa en el estudio experimental, con énfasis en el proceso de filtración, en especial la “calidad” del permeado y su comparación con el permeado obtenido mediante membranas comerciales de ultrafiltración para determinar el grado de modificación de esta.

Primero se compararon los perfiles de densidad de flujo a lo largo de 4 horas para analizar el ensuciamiento de la membrana modificada de ósmosis inversa usando presiones transmembrana de 2.5, 3.5 y 5 bar. Luego se estudió una membrana comercial de ultrafiltración con tamaño de corte nominal de 10 kDa para tratar aguas residuales en un equipo piloto de UF, usando presiones transmembrana de 2, 3, 4 y 5 bar. Más adelante, se estudió la membrana modificada bajo las mismas condiciones, esto es, el mismo equipo piloto de UF y presiones transmembrana de 2, 3, 4 y 5 bar. Se compararon los resultados del permeado obtenido por ambas membranas, en particular contenido de cloruro, pH, turbidez, TDS y conductividad. El ensuciamiento de la membrana disminuyó con el aumento de la presión de operación.

Los parámetros obtenidos a partir del permeado con la membrana modificada se encuentran en rangos normales, sin embargo, el contenido de cloruro, conductividad y TDS presentes en el permeado son muy bajos en comparación a una membrana de ultrafiltración.

La presión de 3.5 bar fue donde más se acercó el comportamiento de ambas membranas.

En relación a la densidad de flujo se obtuvo un grado de modificación de membrana de 62.07%, mientras que considerando los parámetros de TDS y contenido de cloruro se obtiene un 16.55% y 17.45% de grado de modificación respectivamente y se evidencia que la membrana modificada se encuentra en un punto intermedio entre membrana de ultrafiltración y nanofiltración.

Finalmente, este estudio indica que el tratamiento de aguas sanitarias con membranas modificadas de ósmosis inversa bajo las condiciones de operación empleadas es viable, en consecuencia, el agua obtenida puede ser empleada para actividades como la agricultura en sectores rurales sin acceso constante de agua, sin embargo, falta por analizar la factibilidad económica del proyecto.

## Summary

Due to the scarcity of water in Chile due to drought and pollution, it is urgent to find solutions to this problem, which has prompted the development of new methods and technologies.

The general objective of this work is to study the feasibility of reusing modified ósmosis membranes in the form of ultrafiltration membranes for the treatment of wastewater with low ion content. The work is based on the experimental study, with emphasis on the filtration process, especially the quality of the permeate and its comparison with the permeate obtained by commercial ultrafiltration membranes to determine the degree of modification of the latter.

First, flux density profiles were compared over 4 hours to analyze the fouling of the modified reverse ósmosis membrane using transmembrane pressures of 2.5, 3.5 and 5 bar. Then, a commercial ultrafiltration membrane with nominal cut-off size of 10 kDa was studied to treat wastewater in a UF pilot plant using transmembrane pressures of 2, 3, 4 and 5 bar. Further, the modified membrane was studied under the same conditions, i.e., the same UF pilot plant and transmembrane pressures of 2, 3, 4 and 5 bar. The results of the permeate obtained by both membranes were compared, in particular chloride content, pH, turbidity, TDS and conductivity. Membrane fouling decreased with increasing operating pressure.

The parameters obtained from the permeate with the modified membrane are in normal ranges, however, the chloride content, conductivity and TDS present in the permeate are very low compared to an ultrafiltration membrane. The pressure of 3.5 bar was where the performance of both membranes was the closest.

In relation to the flux density, a membrane modification degree of 62.07% was obtained, while considering the TDS and chloride content parameters, a 16.55% and 17.45% modification degree was obtained, respectively, and it is evident that the modified membrane is at an intermediate point between ultrafiltration and nanofiltration membranes.

Finally, this study indicates that the treatment of sanitary water with modified reverse ósmosis membranes under the operating conditions used is feasible, consequently, the water obtained can be used for activities such as agriculture in rural sectors without constant access to water; however, the economic feasibility of the project remains to be analyzed.

## Listado de figuras

Figura 4.1 Esquema del funcionamiento de una membrana .....	8
Fig 5.2 Equipo de medición de pH y contenido de cloruro.....	17
Fig. 5.3 Medidor Multiparámetro Edge dedicado a Conductividad/TDS/Salinidad- HI2003. ....	17
Fig. 5.4 Turbidímetro portatil (EPA) Hach 2100Q. ....	18
Figura 6.1 Permeabilidad de la membrana modificada en agua destilada .....	23
Fig. 6.2 Densidad de flujo de permeado con membrana modificada v/s tiempo con agua sanitaria de Esva a 2.5 bar .....	25
Fig. 6.3 Densidad de flujo de permeado con membrana modificada v/s tiempo con agua sanitaria de Esva a 3.5 bar .....	25
Fig. 6.4 Densidad de flujo de permeado con membrana modificada v/s tiempo con agua sanitaria de Esva a 5 bar .....	26
Fig. 6.5 Comparación de densidad de flujo en el tiempo entre membrana modificada y membrana comercial con agua sanitaria de Esva a 3.5 bar.....	27
Fig. 6.6 Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF .....	30
Fig 6.7 Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF .....	30
Fig 6.8 Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF .....	31
Fig 6.9 Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF. ....	31



## Listado de tablas

Tabla 4.1	Características de los procesos de membranas (Cheryan, 1998) .....	10
Tabla 5.1	Resultados de coliformes presentes en aguas sanitarias de Esva.....	19
Tabla 6.1	Densidad de flujo media a distintas presiones transmembrana para una membrana modificada de ósmosis inversa.....	23
Tabla 6.2	Reducción en la densidad de flujo a distintas presiones transmembrana para una membrana modificada de ósmosis inversa.....	24
Tabla 6.3	Pérdida en la densidad de flujo de permeado con la membrana modificada al cabo de 4 horas de filtración debido al ensuciamiento de la membrana. ....	26
Tabla 6.4	Características de aguas sanitarias a 2 bar .....	28
Tabla 6.5	Características de aguas sanitarias a 3 bar .....	28
Tabla 6.6	Características de aguas sanitarias a 4 bar .....	29
Tabla 6.7	Características de aguas sanitarias a 5 bar .....	29

## Nomenclatura

<i>A</i>	Área superficial de la membrana
<i>C</i>	Concentración ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
<i>Da</i>	Dalton
<i>d</i>	Diámetro
<i>FR</i>	Reducción en la densidad de flujo
<i>J</i>	Densidad de flujo de permeado ( $\text{L}/(\text{m}^2\text{h})$ )
<i>J<sub>o</sub></i>	Densidad de flujo de permeado inicial ( $\text{L}/(\text{m}^2\text{h})$ )
<i>J<sub>ave</sub></i>	Densidad de flujo de permeado promedio ( $\text{L}/(\text{m}^2\text{h})$ )
<i>l</i>	Longitud (m)
<i>M</i>	Masa (Kg)
<i>P</i>	Presión transmembrana
<i>Q</i>	Flujo volumétrico
<i>R</i>	Resistencia
<i>T</i>	Temperatura
<i>t</i>	Tiempo
<i>V</i>	Volumen
<i>v</i>	Velocidad

# Índice

Prefacio.....	i
Resumen .....	ii
Summary .....	iii
Listado de figuras .....	iv
Listado de tablas.....	v
Nomenclatura .....	vi
1. Introducción .....	1
2. Motivación del trabajo .....	4
3. Objetivos .....	6
3.1 Objetivo general .....	6
3.2 Objetivos específicos .....	6
3.3 Hipótesis de trabajo .....	6
4. Marco Teórico.....	8
4.1 Procesos de membranas.....	8
5. Materiales y métodos .....	14
5.1 Aguas sanitarias .....	14
5.2 Membrana de ultrafiltración .....	14
5.3 Membranas de ósmosis inversa modificadas a la forma de membranas de ultrafiltración .....	14
5.4 Montaje experimental .....	14
5.5 Experimentación .....	15
5.6 Métodos analíticos .....	16
5.7 Análisis físicos y químicos .....	16
5.8 Análisis microbiológico.....	19

6. Resultados y discusión.....	22
6.1 Eficiencia del proceso.....	22
6.2 Ensuciamiento de la membrana.....	24
6.3 Comparación entre membrana modificada de ósmosis inversa y membrana comercial de ultrafiltración .....	27
6.4 Calidad del agua .....	28
7. Conclusiones .....	34
8. Recomendaciones .....	37
9. Glosario.....	39
10. Bibliografía .....	41
11. Apéndice .....	42
11.1 Análisis de composición de aguas sanitarias de Esvál. ....	42
11.2. Tabla estadística Mac Grady de número más probable para 3 tubos por dilución.....	43
11.3 Observación de resultado negativo por ausencia de gas en tubos con campana Durham. ....	44
11.4 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana modificada de OR a 2.5 bar.....	45
11.5 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana modificada de OR a 3.5 bar. ....	46
11.6 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana de UF a 3.5 bar. ....	47
11.7 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana modificada de OR a 5 bar.....	48

## 1. Introducción

Cerca del 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua, pero solo el 3% corresponde a agua dulce, su escasez afecta casi a la mitad de la población mundial, las causas son la contaminación, agricultura excesiva y sequías. La escasez se agrava cuando el recurso no se reparte equitativamente. ¿Cómo se enfrenta un país a la falta de agua?

En Chile, la sequía ya no afecta solo al norte del país, el incremento de temperaturas sumado a la disminución de precipitaciones ha preocupado a varias regiones del país, por ejemplo, comunas cercanas a Concepción como Florida, Santa Juana, entre otras.

El agua se puede tratar mediante diversos métodos para su uso en distintos rubros como la agricultura, minería, etc. Generalmente se trata con técnicas convencionales de filtración o mediante membranas, por ejemplo, de ultrafiltración.

Periódicamente y tras la pérdida del rendimiento de las membranas, estas se desechan en vertederos. Se estima que alrededor de 800.000 módulos de membranas se desechan anualmente en el mundo, lo que equivale a 14.000 toneladas de plásticos inertes. (*IDA et al., 2017*)

En particular, se propone un tratamiento para aguas sanitarias con baja carga iónica mediante membranas reutilizadas de ósmosis inversa que fueron modificadas a la forma de membranas de ultrafiltración.

Las aguas sanitarias o negras son aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua, son residuales porque luego de ser usadas constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo y se les llama negras debido al color que habitualmente tienen. Están constituidas por aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado.

Estas contienen altos niveles de sólidos suspendidos, nitrógeno, fosfatos y coliformes fecales.

El tema de este proyecto es detallar el tratamiento experimental de esta propuesta para determinar su efectividad mediante la comparación de los parámetros obtenidos con la membrana modificada y la membrana comercial de ultrafiltración, estos son: densidad de flujo de permeado, pH, turbidez, contenido de cloruro, conductividad y TDS.

El grado de modificación de la membrana de ósmosis inversa se determina a partir de cuanto se acerca su comportamiento al de una membrana de ultrafiltración, he ahí la importancia de este análisis y la comparación entre ambas membranas.



## **2. Motivación del trabajo**

El motivo de este estudio es determinar la posibilidad de implementar membranas modificadas de ósmosis inversa a la forma de membranas de ultrafiltración para el tratamiento de aguas sanitarias con bajo contenido de iones en sectores rurales afectados por la sequía y que necesiten agua, ya sea para la agricultura u otras actividades a bajo costo y durante todo el año.

Así beneficiar a personas que no cuentan con acceso estable y continuo de agua, mejorando su calidad de vida.





### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Esta memoria de título tiene como objetivo general:

Evaluar la reutilización de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa desechables, modificándolas a la forma de membranas de ultrafiltración para el tratamiento de aguas residuales de baja carga iónica.

#### **3.2 Objetivos específicos**

De acuerdo con lo anterior, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar las propiedades de las membranas obtenidas, con el fin de cuantificar el grado de modificación y asegurar su reproductibilidad.
2. Evaluar el comportamiento y perfiles de los flujos de permeado y porcentajes de rechazo de solutos en las membranas modificadas usando aguas residuales con bajo contenido de sales.
3. Evaluar el impacto social, ambiental y económico de reciclar las membranas de ósmosis inversa.

#### **3.3 Hipótesis de trabajo**

Luego, en el proyecto de tesis se plantearon las siguientes hipótesis de trabajo:

1. Las membranas de ósmosis inversa recicladas pueden entregar permeados con similitud de propiedades al permeado obtenido con membranas comerciales de ultrafiltración propiamente tal.
2. El tratamiento de aguas sanitarias mediante filtración con membranas recicladas es una buena opción para reutilizar el agua en sectores que carecen de abastecimiento diario.



## 4. Marco Teórico

Antes de presentar y detallar el proyecto es necesario introducir y presentar conceptos relevantes al tema de estudio, en este caso la filtración por membranas y aguas sanitarias.

### 4.1 Procesos de membranas

Una membrana es una barrera selectiva que permite el traspaso de algunos componentes de una mezcla y retiene otros. El fluido que atraviesa la membrana se denomina permeado, mientras que el fluido cuyo traspaso por la membrana es impedido, se llama concentrado o rechazo.

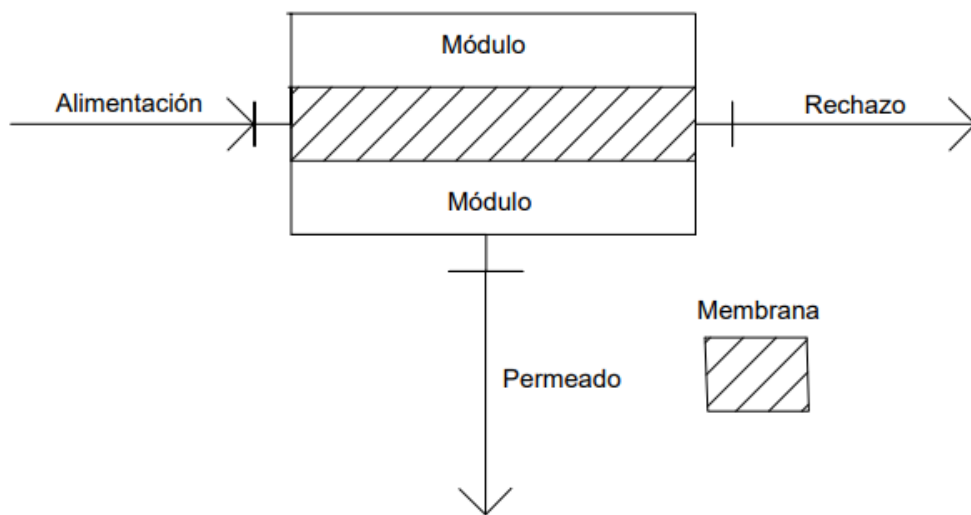


Figura 4.1 Esquema del funcionamiento de una membrana

La capacidad separadora de la membrana depende tanto de las propiedades de transporte de los diferentes componentes. La fuerza impulsora y su permeabilidad determinan la velocidad de transporte de los componentes a través de la membrana. La fuerza impulsora más importante en los procesos de membrana es el gradiente de presión, potencial químico, y eléctrico, dando origen a

convección de masa, difusión de moléculas y transporte de iones, respectivamente. En una membrana con estructura homogénea, la concentración del componente depende de su solubilidad en la matriz. En una membrana con estructura porosa, la movilidad del componente depende principalmente de su tamaño, forma y del desorden geométrico del medio poroso.

Actualmente, hay diversos materiales de membranas como polímeros, metales, cerámicos y líquidos con elementos selectivos de transporte.

Una membrana puede ser simétrica, es decir, su estructura es idéntica en toda la sección transversal de ésta, o asimétrica, es decir, su estructura varía entre el lado superior e inferior.

Generalmente, las membranas son fabricadas como láminas planas, fibras huecas, capilares o tubos. Para su funcionamiento se depositan, por razones prácticas, en un dispositivo llamado módulo. Los más comunes son los módulos tubulares, de láminas y marcos, de espiral enrollado y de membrana capilar. Finalmente, la configuración y el modo de operación del módulo resultan en distintas ecuaciones de diseño del proceso. (Cross, 2002)

Para cada aplicación es sumamente importante la elección apropiada del módulo y de la membrana para obtener una eficiencia satisfactoria del proceso de separación (Luque *et al.*, 2004). Las propiedades que determinan el comportamiento de una membrana son la selectividad y la densidad de flujo, la tendencia al ensuciamiento y la compatibilidad con las condiciones de operación.

En el mercado se encuentra gran diversidad de membranas, las cuales se clasifican según Cheryan (1998), en cuatro grupos de acuerdo a:

- Su naturaleza (Natural o sintética)
- Su estructura (Porosa o sin poros)
- Tipo de separación (Separación gas-gas, gas-líquido, líquido-líquido o sólido-líquido)
- Su mecanismo de acción (Adsorción, difusión, intercambio de iones u ósmosis)
- 

Por otra parte, los procesos de membranas se pueden clasificar según la fuerza motriz utilizada. La mayoría de los procesos de filtración son impulsados por un gradiente de presión, como la ultrafiltración, ósmosis inversa y separación de gases, o por gradiente de concentración, como el caso

de la diálisis, también y en menor medida puede impulsar un gradiente de presión parcial, tal como en la pervaporación, finalmente, no está de más mencionar la electrodiálisis, proceso que utiliza el potencial eléctrico como fuerza motriz. (Strathmann, 2001). La tabla 1.1 resume las características de los diferentes procesos de membranas.

<b>Proceso</b>	<b>Fuerza Motriz</b>	<b>Rechazo</b>	<b>Permeado</b>
Ósmosis	Potencial químico	Solutos, agua	Agua
Diálisis	Diferencial de concentración	Macromoléculas, agua	Micromoléculas, agua
Microfiltración	Presión	Partículas suspendidas, agua	Solutos disueltos, agua
Ultrafiltración	Presión	Macromoléculas, agua	Micromoléculas, agua
Nanofiltración	Presión	Micromoléculas, sales bivalentes, agua	Iones monovalentes, ácidos no disociados, agua
Ósmosis inversa	Presión	Solutos, agua	Agua
Electrodiálisis	Voltaje/corriente	Solutos no iónicos, agua	Solutos iónicos, agua
Pervaporación	Presión parcial	Moléculas no volátiles, agua	Micromoléculas volátiles, agua

**Tabla 4.1 Características de los procesos de membranas (Cheryan, 1998)**

En especial, la ultrafiltración tiene como objetivo principal, separar solutos, macromoléculas y/o coloides disueltos a base del tamaño, utilizando un gradiente de presión como fuerza impulsora y una membrana como barrera selectiva. La dimensión del soluto respecto al tamaño de poros de la membrana determina, si el soluto puede o no pasar a través de ella. Los solutos retenidos por la membrana de ultrafiltración son generalmente macromoléculas o coloides con un tamaño entre 1 y 20 nm y un peso molecular entre  $10^3$  y  $10^6$  Da, dependiendo del poder de corte de la membrana (McGregor, 1986).

La ultrafiltración posee algunas ventajas en comparación a otros procesos similares (Cheryan, 1998):

- Es una tecnología no contaminante que evita el uso de agentes químicos de filtración y clarificación.
- Es un proceso de separación molecular continua que no involucra un cambio de estado o de fases, ni la transferencia de masa a través de una interfaz y, por ende, requiere un menor consumo de energía en comparación con otros procesos de concentración, tales como la evaporación y liofilización.
- Retiene principalmente macromoléculas y, por ende, resulta en una presión osmótica mínima que permite una presión de operación relativamente baja, disminuyendo así los costos operacionales y del equipo de bombeo.
- No requiere equipamiento avanzado de transferencia y generación de calor, solamente se requiere energía eléctrica para el funcionamiento del motor de la bomba.
- Opera generalmente a temperaturas moderadas, así se evita cambios por oxidación o degradación térmica en el producto.

Así como tiene ventajas, la ultrafiltración también cuenta con desventajas, tales como (Cheryan, 1998):

- A medida que la solución de macromoléculas se concentra, aumenta su viscosidad y resulta en una menor velocidad de transferencia de masa por la membrana, además en problemas de bombeo del concentrado.
- Por otra parte, los fenómenos de polarización de concentración y ensuciamiento de la membrana que ocurren durante la ultrafiltración disminuyen la densidad de flujo del permeado; además, pueden cambiar la selectividad de la membrana, afectando su retención y la calidad del producto final.
- El material de la membrana o modulo puede significar una restricción para las condiciones de operación y limpieza posterior, limitando el tipo de aplicación.

Todas las membranas pueden ser consideradas como tamices selectivos que presentan mayor permeabilidad para algunos componentes en comparación con otros. Esto significa que, en la cercanía

de la membrana, aumenta la concentración de moléculas retenidas. Este fenómeno es reversible y se llama “polarización de concentración”. Las moléculas retenidas, acumuladas y aún disueltas, son una resistencia adicional para la filtración. Sin embargo, la concentración del soluto cerca de la superficie de la membrana puede llegar a valores tan altos que se forma una capa de gel. La formación de esta capa de gel es una de las formas de ensuciamiento de la membrana. Otras formas de ensuciamiento son la adsorción del soluto en el interior del medio poroso y la obstrucción a la entrada de los poros en la membrana. Todas las formas de ensuciamiento son irreversibles, es decir, la materia adherida solamente puede ser removida mediante un lavado exhaustivo.

El ensuciamiento de la membrana trae consigo diversas consecuencias negativas. Primero, disminuye la productividad del sistema, por ende, aumenta los costos, debido a la menor densidad de flujo del permeado durante el proceso. Además, la recuperación de la densidad de flujo original requiere un mayor uso de detergentes y tiempo de lavado, generando un mayor impacto ambiental y disminuyendo la vida útil de la membrana.

El ensuciamiento es el resultado de interacciones específicas entre la membrana y solutos presentes en el flujo de alimentación, como también entre componentes ya adheridos y otros solutos en la alimentación.

Los factores que afectan en el ensuciamiento de la membrana son entre ellos, hidrofobicidad, topografía superficial, tamaño de poros, propiedades de soluto y parámetros de procesos como, temperatura, velocidad de flujo, presión y concentración (Florentius et al., 2005).

Originalmente, la aplicación industrial de membranas de ultrafiltración estaba limitada al campo del tratamiento de aguas residuales y tenía como objetivo remover material macromolecular y particulado. Hoy en día, su aplicación ha sido amplificada a diversas otras áreas, como agua potable, industria química, farmacéutica, de alimentos y biotecnología (Cuperus y Nijhuis, 1993).





## **5. Materiales y métodos**

### **5.1 Aguas sanitarias**

Aguas sanitarias facilitadas por ESVAL ubicado en Cochrane 751, Valparaíso, Chile

### **5.2 Membrana de ultrafiltración**

Membrana comercial de ultrafiltración FILMTEC UF PES con corte nominal de 10 kDa y área activa de  $0.014 \text{ m}^2$ .

### **5.3 Membranas de ósmosis inversa modificadas a la forma de membranas de ultrafiltración**

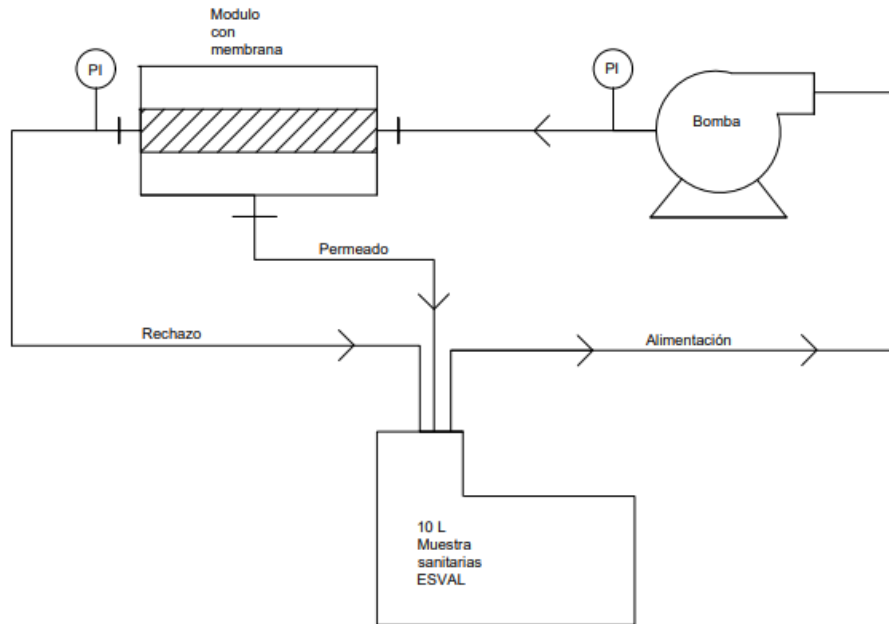
Las membranas de ósmosis inversa generalmente son usadas para el tratamiento de agua, donde son lavadas periódicamente recuperando así gran parte de la permeabilidad original, es por lo que cuentan con una larga vida útil. Sin embargo, tras el transcurso del tiempo y debido al desgaste es que las membranas pierden sus propiedades filtrantes y son desechadas contaminando el medio ambiente.

Una solución para las membranas de ósmosis inversa es su reutilización al ser modificadas tras ser expuestas durante un tiempo con hipoclorito de sodio, donde se logra eliminar la capa de poliamida típica de estas membranas para ser usadas posteriormente como membranas de ultrafiltración en pretratamientos de aguas, dándoles así una segunda vida útil, disminuyendo los costos de inversión en membranas de ultrafiltración y reduciendo la contaminación de aguas o vertederos con toneladas de plásticos inertes.

### **5.4 Montaje experimental**

Los experimentos se realizaron en un equipo piloto de UF equipado con un módulo de acero inoxidable para una membrana en forma de lámina en el departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción. La unidad consiste en un estanque donde se deposita la muestra de aguas sanitarias proporcionadas por Esval (10 L), una bomba que impulsa y presuriza la alimentación hasta la presión de operación, dos manómetros analógicos de rango 10 bar, uno ubicado a la salida de la bomba y otro ubicado a la salida del módulo que contiene a la membrana. Se utilizaron membranas

de ósmosis inversa modificadas y una membrana comercial de ultrafiltración con un tamaño de corte nominal de 10 kDa para comparar el grado de transformación de la membrana modificada.



**Fig 5.1 Diagrama esquemático del equipo de UF utilizado; PI: indicador de presión**

## 5.5 Experimentación

Todos los ensayos se realizaron en forma continua con recirculación total del rechazo y un volumen constante de 10 litros de aguas sanitarias. La temperatura no se controló, por lo que se mantuvo en un rango de 15 - 20 °C. El permeado se recolectó cada 10 minutos durante un lapso de 30 segundos en duplicado, donde se registró el promedio de ambos y se midió mediante una probeta de 50 ml con error de  $\pm 0.5$  ml.

Al final de cada ensayo, se limpió el módulo y la membrana para recuperar la densidad de flujo original. Según las recomendaciones del fabricante, se limpió de la siguiente manera:

- Enjuague con agua destilada
- Lavado ácido con HCl 0.1% v/v en dos etapas de 30 minutos con una pausa de 15 minutos entre lavados.

- Lavado básico con NaOH 0.1% v/v y EDTA al 0.5% v/v en dos etapas de 30 minutos con una pausa de 15 minutos entre lavados.
- Enjuague con agua destilada durante 30 minutos para neutralizar el pH de la membrana y remover cualquier rastro de suciedad presente en ella.

### **5.6 Métodos analíticos**

La eficiencia del proceso se determinó al comparar los valores obtenidos de densidad de flujo con la membrana modificada de OR en comparación con los valores obtenidos con la membrana comercial de ultrafiltración utilizando esta última como referencia.

El ensuciamiento de la membrana se determinó con la diferencia en la densidad de flujo inicial y final de cada ensayo en un lapso de 4 horas y se expresó en porcentajes de reducción de densidad de flujo.

Para analizar la “calidad” del agua se evalúan los parámetros del permeado obtenido mediante ambas membranas, estos son; pH, conductividad, contenido de cloruro, turbidez y TDS. Donde nuevamente se comparan tomando como referencia los valores de la membrana de ultrafiltración.

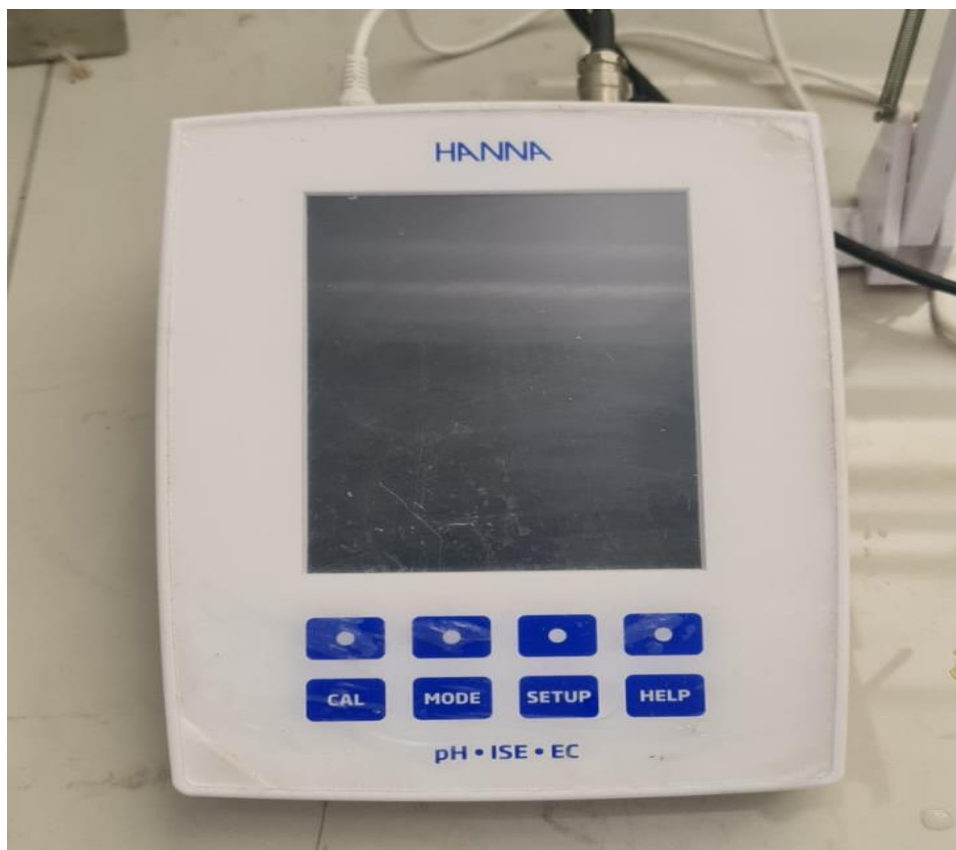
Para cuantificar el grado de modificación de la membrana de ósmosis inversa se compara tanto el perfil de densidad de flujo como la “calidad” del agua en relación a la membrana de ultrafiltración y se expresa en % según cuanto se acerca al comportamiento “ideal” (UF).

### **5.7 Análisis físicos y químicos**

El agua se analizó respecto a la turbidez, contenido de cloruro, conductividad, TDS y pH. La turbidez se determinó mediante un refractómetro y fue expresada en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). El contenido de cloruro se midió mediante un refractómetro y fue expresado en ppm. La conductividad se determinó mediante un refractómetro y fue expresada en  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Los TDS se determinaron mediante un refractómetro y fueron expresados en ppm. El pH se midió mediante un pH-metro en la escala normal de pH. Las mediciones se realizaron en duplicado y se registró el promedio de éstas.



**Fig 5.2** Equipo de medición de pH y contenido de cloruro.



**Fig. 5.3** Medidor Multiparámetro Edge dedicado a Conductividad/TDS/Salinidad- HI2003.



**Fig. 5.4 Turbidímetro portátil (EPA) Hach 2100Q.**

### 5.8 Análisis microbiológico

Se realizó un análisis para determinar la presencia de coliformes totales y fecales en la muestra utilizada de aguas sanitarias proporcionadas por Esva a 37 °C y 45 °C respectivamente en el departamento de bioprocesos del departamento de Ingeniería Química en la Universidad de Concepción. Se determinó el número de células mediante el método del Número Más Probable (Carpenter, 1977). Obteniendo los siguientes resultados.

Parámetro	Unidad	Resultados
Coliformes totales (37 °C)	NMP/ 100 ml	< 3
Coliformes fecales (45 °C)	NMP/ 100 ml	< 3

**Tabla 5.1 Resultados de coliformes presentes en aguas sanitarias de Esva**

Los coliformes designan a un grupo de especies bacterianas que tienen importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y alimentos. Se caracterizan por ser aerobias o anaerobias facultativas, bacilos gran negativos y no esporógenos, con capacidad de fermentar la lactosa con producción de gas en 24-48 horas a una temperatura de 37 °C. Este grupo está conformado por: *Escherichia*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*.

Los coliformes se encuentran en el intestino de los humanos y animales homeotermos (de sangre caliente) y también ampliamente distribuidos en la naturaleza (suelos, vegetales y semillas). No todos los coliformes son de origen fecal, por lo que se utilizó el método del número más probable (NMP), que es capaz de diferenciarlos. Así, se distinguen los coliformes totales, que componen la totalidad del grupo y los coliformes fecales, aquellos de origen intestinal.

El método del número más probable requiere la utilización de una serie de diluciones de la muestra de cultivo, en un medio que contenga sales biliares. Luego, se incuban las muestras, y pasado un tiempo, se examinan los tubos. Si hay presencia de bacterias coliformes, estas fermentarán la lactosa presente en el medio, resultando en la producción de ácido y gas, el cual se acumula en la campana Durham. Con estos datos de incidencia positiva/negativa, se puede calcular el número más probable de microorganismos presentes en la muestra original a partir de una tabla estadística. Para diferenciar los coliformes el método consta de dos etapas; una presuntiva (uso de caldo Lauril sulfato) que da

indicios de la presencia de coliformes totales y otra confirmativa (uso de caldo lactosado bilis verde brillante), donde se determina la presencia o ausencia de coliformes fecales.

De la muestra analizada se pudo observar que, en las diluciones de  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  ninguna presentó formación de gas, lo que indica la ausencia de coliformes.





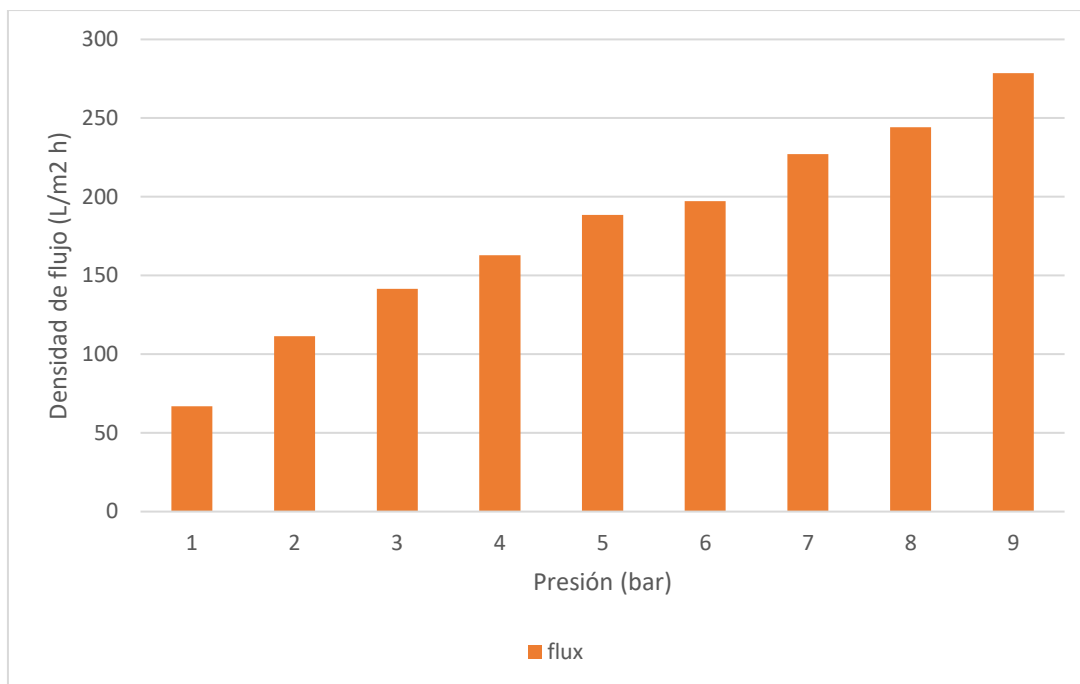
## 6. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados y análisis de la sección experimental. En primer lugar se analiza la eficiencia de las membranas usando como parámetro la densidad de flujo obtenida, luego se analiza como el ensuciamiento de la membrana afecta al rendimiento de esta, se analizan las propiedades físicas, química y microbiológicas de los permeados obtenidos a diferentes presiones y finalmente se comparan los parámetros obtenidos con ambas membranas, esto con el fin de cuantificar el grado de modificación de las membranas de OR para evaluar la factibilidad de su uso como membranas de ultrafiltración.

### 6.1 Eficiencia del proceso

Diferencias en la densidad de flujo media de permeación por la membrana y la eficiencia de la membrana oxidada pueden presentar importantes efectos económicos en el tratamiento de aguas sanitarias. Por lo tanto, es necesario optimizar el proceso de ultrafiltración, utilizando la membrana bajo condiciones de operación que resulten en un mínimo de tiempo de filtración, un mínimo de ensuciamiento y un máximo en la densidad de flujo de permeación.

La Figura 6.2 evidencia un aumento en la densidad de flujo de permeado a mayor presión transmembrana. De acuerdo con la Ley de Darcy (Coulson y Richardson, 1991), la densidad de flujo de permeado aumenta proporcionalmente respecto a la presión transmembrana. Este aumento es lineal hasta llegar a la presión crítica (Field et al., 1995). Aumentando la presión aún más hasta llegar a la presión límite, la densidad de flujo de permeado varía hasta ser independiente de la presión transmembrana, con un predominio de los fenómenos de polarización de concentración y “fouling” de la membrana (Kuo y Cheryan, 1983)



**Figura 6.1 Permeabilidad de la membrana modificada en agua destilada**

La densidad de flujo inicial de permeación de agua destilada ( $J_0$ ) bajo condiciones de operación se determinó en duplicado con una probeta y un cronómetro. La densidad de flujo media de permeación de aguas sanitarias ( $J_{ave}$ ) se calculó según

$$J_{ave} = \frac{\sum_1^n J_i}{n} \quad (\text{ec 6.1})$$

<b>Presión transmembrana (bar)</b>	<b>Densidad de flujo promedio (<math>L/m^2h</math>)</b>
2.5	73.25
3.5	122.32
5.0	147.14

**Tabla 6.1 Densidad de flujo media a distintas presiones transmembrana para una membrana modificada de ósmosis inversa.**

Se determinaron diversos parámetros para evaluar la eficiencia del proceso y el comportamiento de la membrana. La densidad de flujo del permeado (J) se calculó a partir de la cantidad de permeado recolectado durante 30 segundos por  $m^2$  de área superficial de membrana. La reducción en la densidad de flujo (FR) durante la UF se calculó según

$$FR = \frac{J_{ave}}{J_0} 100\% \quad (\text{ec 6.2})$$

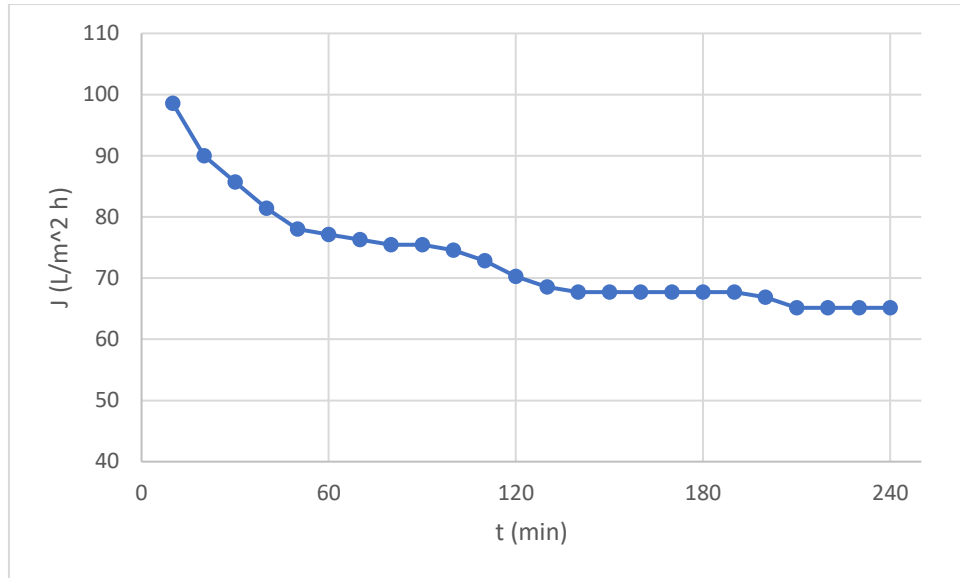
Presión transmembrana (bar)	Reducción en la densidad de flujo
2.5	74.31%
3.5	79.28%
5.0	88.49%

**Tabla 6.2 Reducción en la densidad de flujo a distintas presiones transmembrana para una membrana modificada de ósmosis inversa.**

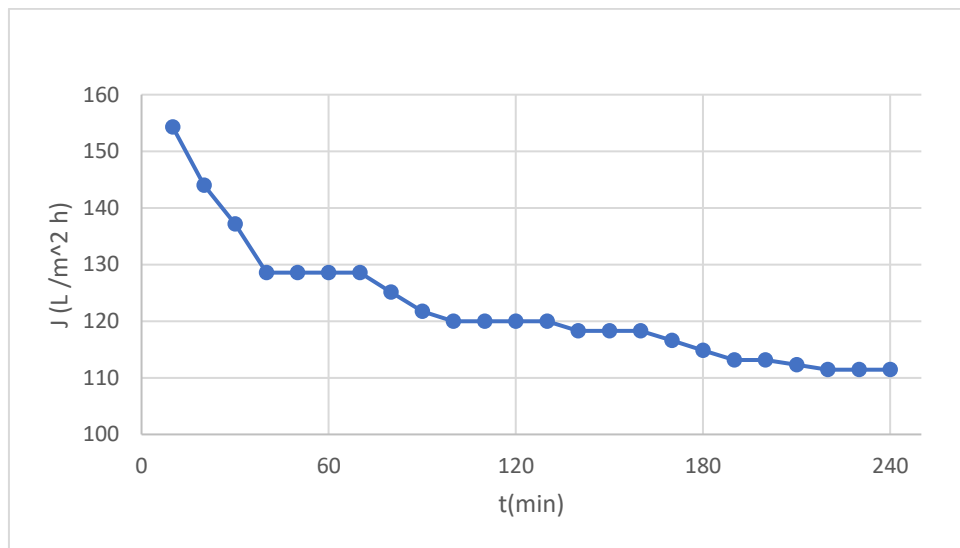
La ausencia de una correlación directa entre la eficiencia del proceso y el ensuciamiento de la membrana sugiere que los grandes esfuerzos por minimizar el ensuciamiento de esta resultan en una pérdida de la eficiencia del proceso. Los efectos negativos del ensuciamiento de la membrana se pueden disminuir mediante la elección de las condiciones apropiadas del proceso de ultrafiltración, en especial la presión transmembrana adecuada.

## 6.2 Ensuciamiento de la membrana

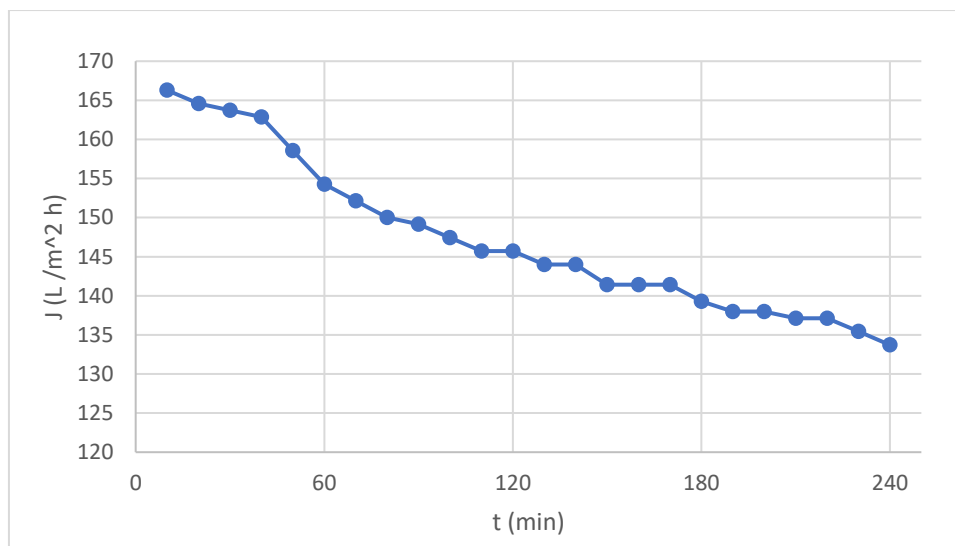
La ultrafiltración en flujo cruzado de aguas sanitarias presenta el comportamiento típico de la densidad de flujo de permeado, esto es una reducción de aproximadamente el 10% de la densidad de flujo inicial durante los primeros 10 minutos, seguido por un decaimiento más lento (Fig. 6.4)



**Fig. 6.2** Densidad de flujo de permeado con membrana modificada v/s tiempo con agua sanitaria de Esval a 2.5 bar



**Fig. 6.3** Densidad de flujo de permeado con membrana modificada v/s tiempo con agua sanitaria de Esval a 3.5 bar



**Fig. 6.4 Densidad de flujo de permeado con membrana modificada v/s tiempo con agua sanitaria de Esval a 5 bar**

Las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 presentan los efectos de las condiciones operacionales (presión transmembrana) en el ensuciamiento de la membrana.

Se puede apreciar que, tanto para 2.5 como para 3.5 bar el ensuciamiento de la membrana parece haber llegado a un punto constante, lo que se refleja en los valores constantes de densidad de flujo durante los últimos 30 minutos de análisis, sin embargo, a la presión transmembrana de 5 bar dicha curva no parece haber llegado a un valor constante durante las 4 horas de análisis.

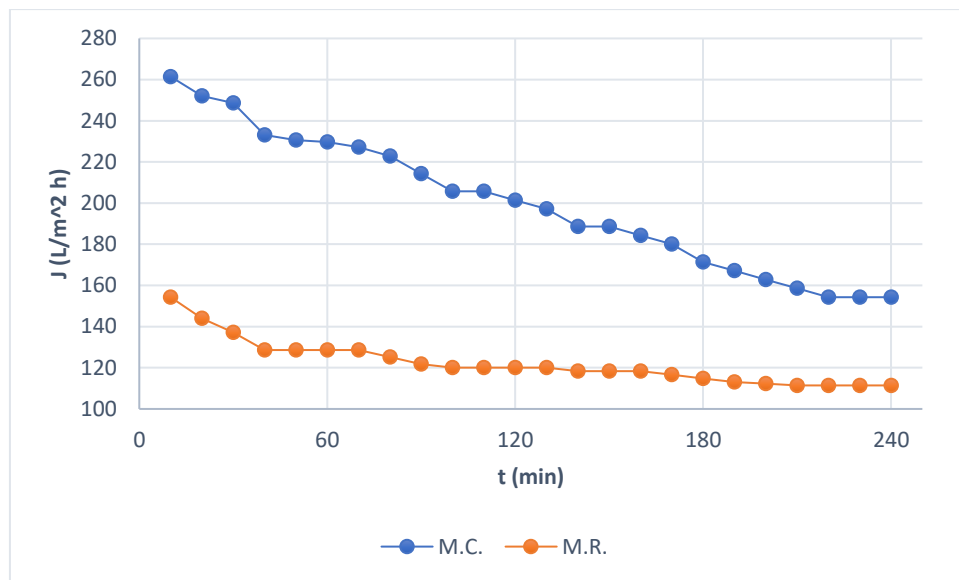
Además, a medida que aumenta la presión de operación disminuye la pérdida de la densidad de flujo debido al ensuciamiento de la membrana al cabo de 4 horas de operación.

<b>Presión de operación (bar)</b>	<b>Pérdida de densidad de flujo al cabo de 4 horas</b>
2.5	33.9%
3.5	27.8%
5.0	19.6%

**Tabla 6.3 Pérdida en la densidad de flujo de permeado con la membrana modificada al cabo de 4 horas de filtración debido al ensuciamiento de la membrana.**

### 6.3 Comparación entre membrana modificada de ósmosis inversa y membrana comercial de ultrafiltración

A modo de obtener un criterio de comparación entre la membrana modificada de ósmosis inversa y la membrana comercial de ultrafiltración es que se superponen los perfiles de densidad de flujo del permeado a 3.5 bar de ambas membranas durante las 4 horas en que se realizaron los ensayos para analizar su comportamiento de mejor manera.



**Fig. 6.5 Comparación de densidad de flujo en el tiempo entre membrana modificada y membrana comercial con agua sanitaria de Esval a 3.5 bar**

De la figura 6.5 se puede observar que claramente la densidad de flujo en la membrana de ultrafiltración es mayor que en la membrana reciclada, teniendo la diferencia mayor a los 30 minutos, donde la membrana modificada de OR alcanza el 55.17% de la densidad de flujo de permeado obtenido por la membrana de UF y una diferencia mínima a las 4 horas de filtrado, equivalente al 72.22% del permeado obtenido con la membrana de UF. Por otro lado, la membrana de ultrafiltración presenta un ensuciamiento más pronunciado, mientras que en la membrana modificada la densidad de flujo es más estable llegando a un valor constante de  $111.42 \text{ L/m}^2\text{h}$ . Además, se evidencia que la membrana modificada presenta un rendimiento menor que la membrana comercial en cuanto a densidad de flujo.

## 6.4 Calidad del agua

Al filtrar con membranas modificadas, específicamente oxidadas, se debe verificar que la calidad del permeado sea similar a la calidad del permeado obtenido a partir de una membrana comercial de ultrafiltración sin modificar. Para establecer una comparación entre ambas membranas se utilizarán parámetros como pH, contenido de cloruro, conductividad y turbidez de cada permeado.

Las tablas 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 presentan las características del agua tratada mediante filtración con ambos tipos de membranas a diferentes presiones transmembrana.

<b>Parámetro</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Permeado de membrana UF</b>	<b>Permeado de membrana modificada de OR</b>
Turbidez (NTU)	19.2	0.48	0.19
pH	7.27	7.41	7.4
Contenido de cloruro (ppm)	62.8	47	7
Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	422.6	606	65.5
TDS (ppm)	211.4	302.4	32.77

**Tabla 6.4 Características de aguas sanitarias a 2 bar**

<b>Parámetro</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Permeado de membrana UF</b>	<b>Permeado de membrana modificada de OR</b>
Turbidez (NTU)	19.2	0.43	0.16
pH	7.27	7.45	7.4
Contenido de cloruro (ppm)	62.8	59.6	9
Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	422.6	701.4	98.7
TDS (ppm)	211.4	351	49.22

**Tabla 6.5 Características de aguas sanitarias a 3 bar**



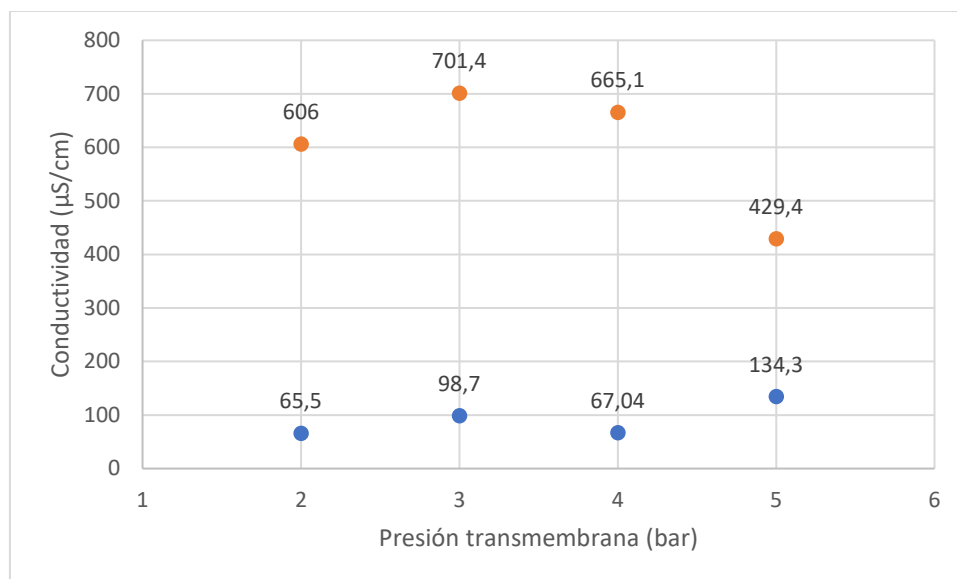
<b>Parámetro</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Permeado de membrana UF</b>	<b>Permeado de membrana modificada de OR</b>
Turbidez (NTU)	19.2	0.41	0.15
pH	7.27	7.45	7.47
Contenido de cloruro (ppm)	62.8	62	9.2
Conductividad (µs/cm)	422.6	665.1	67.04
TDS (ppm)	211.4	332.9	33.6

**Tabla 6.6 Características de aguas sanitarias a 4 bar**

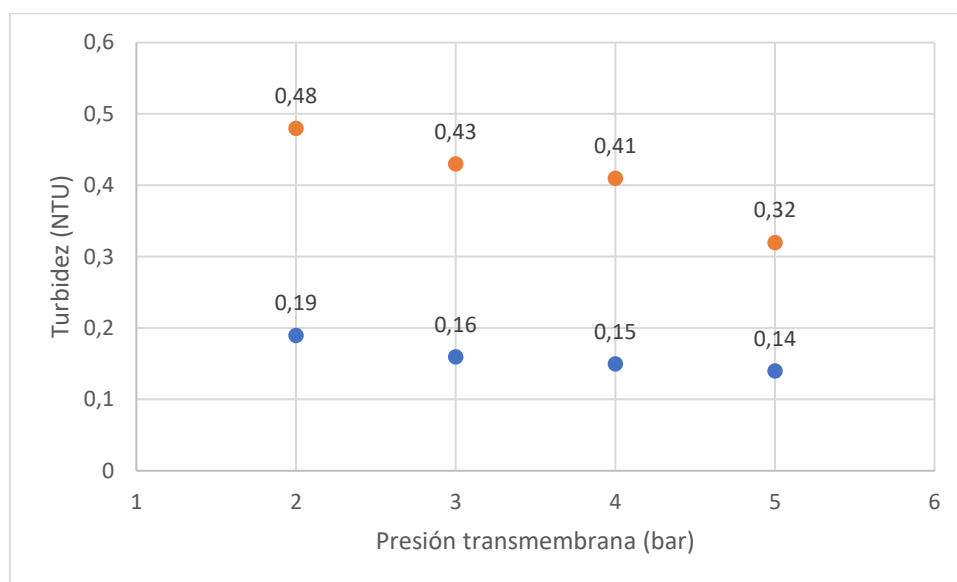
<b>Parámetro</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Permeado de membrana UF</b>	<b>Permeado de membrana modificada de OR</b>
Turbidez (NTU)	19.2	0.32	0.14
pH	7.27	7.22	7.5
Contenido de cloruro(ppm)	62.8	62	15.5
Conductividad (µs/cm)	422.6	429.4	134.3
TDS (ppm)	211.4	214.6	67.1

**Tabla 6.7 Características de aguas sanitarias a 5 bar**

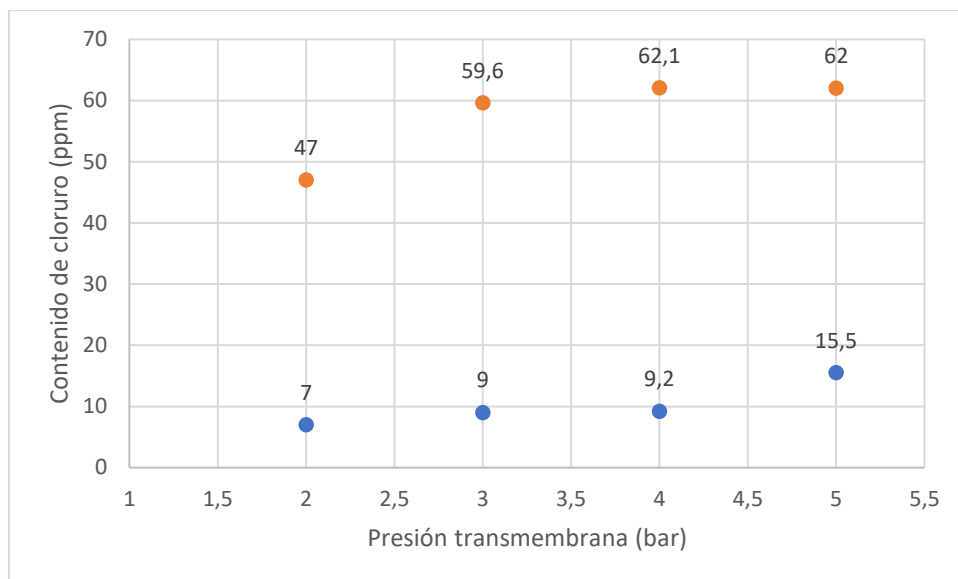
Para un mejor entendimiento y a modo de visualizar de forma más clara la diferencia obtenida en cada propiedad a las distintas presiones es que se presentan los gráficos de los diferentes parámetros evaluados a diferentes presiones.



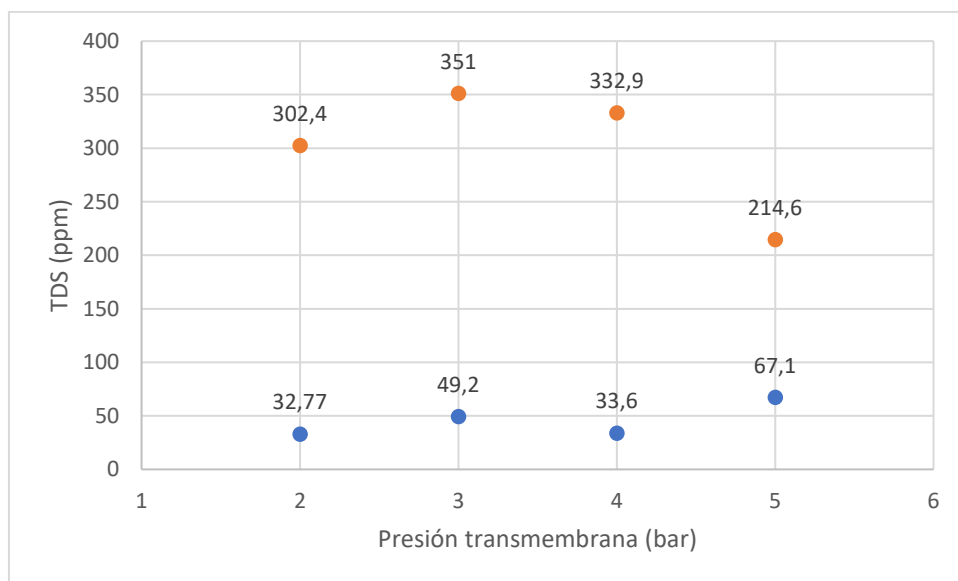
**Fig. 6.6** Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF



**Fig 6.7** Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF



**Fig 6.8 Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF**



**Fig 6.9 Comparación en la conductividad del permeado obtenido en la membrana reciclada y la de UF.**

Los valores de conductividad del permeado expresados en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  oscilaron en ambos casos, donde los valores obtenidos con la membrana comercial de UF superaron enormemente a los valores obtenidos a partir de la membrana modificada, que solo obtuvo un 10.08 % de dicho valor a la presión de 4 bar.

Los valores de turbidez expresados en Ntu en ambos casos se comportaron inversamente proporcional a la presión transmembrana, además si bien nuevamente los valores obtenidos con la membrana comercial de ultrafiltración son mayores que los obtenidos con la membrana modificada, la diferencia no fue tan grande como lo ocurrido con la conductividad, obteniendo un 36.6% menos de turbidez a la presión transmembrana de 4 bar.

El contenido de cloruro medido en ppm en ambos casos se comportó proporcional a la presión transmembrana, obteniendo un valor máximo de 62.1 ppm en la membrana comercial de ultrafiltración y 15.5 ppm en la membrana modificada de ósmosis inversa, que solo obtuvo un 14.8% del valor esperado nuevamente a 4 bar.

El contenido de TDS medido en ppm oscila sin presentar una tendencia clara para ambos casos, donde se obtuvo un valor máximo de 351 ppm en la membrana comercial de ultrafiltración y 67.1 ppm en la membrana modificada, donde obtuvo un 10.1 % del valor obtenido con la membrana de UF a la presión transmembrana de 4 bar.

Además, se puede observar que la calidad del permeado obtenido con ambas membranas es buena, ya que la totalidad de los datos obtenidos se encuentra en rangos normales, como lo es el pH, turbidez, TDS, contenido de cloruro y conductividad. Por otro lado, se observa que la membrana modificada retiene casi la totalidad de iones, lo que se puede evidenciar al observar los valores de conductividad, contenido de cloruro y TDS presentes en el permeado de la membrana modificada.

Cuya propiedad no es común en membranas de ultrafiltración, sino en membranas de nanofiltración y ósmosis inversa, por lo que se podría pensar que la membrana modificada obtenida se comporta como una especie de membrana intermedia entre ultrafiltración y nanofiltración.



## 7. Conclusiones

La disminución en la densidad de flujo del permeado durante la ultrafiltración de aguas sanitarias se explica por el ensuciamiento de la membrana, el cual disminuye con el aumento de la presión de operación, como lo refleja la tabla 6.3.

En cuanto a las condiciones de operación, dado que las aguas sanitarias son un desecho y las membranas oxidadas son reusadas es que se desea minimizar los costos en el tratamiento de agua, por lo que se debe operar a una presión máxima de 5 bar, esto con el fin de utilizar una bomba lo más pequeña y barata posible.

Las aguas sanitarias tratadas mediante ultrafiltración con membranas recicladas se comportaron de forma correcta, obteniendo todos los parámetros dentro de su rango normal, más aún se comparó de forma favorable en cuanto a la calidad del permeado, esto se vio reflejado en los valores de turbidez y TDS obtenidos, sin embargo, se comparó de forma desfavorable en cuanto a la densidad de flujo obtenida, siendo en promedio un 39.2% más bajo que el obtenido por una membrana comercial de UF.

La eficiencia de la membrana modificada de ósmosis inversa en términos de densidad de flujo es proporcional a la presión de filtración debido a que presenta un menor índice de reducción de flujo (FR) a medida que aumenta la presión de operación.

La turbidez en el permeado de la membrana modificada presentó valores sorprendentemente buenos en comparación con la membrana comercial de UF, alcanzando un 63.4% menos de Ntu.

En cuanto a la presión óptima de operación, cabe destacar que no existe, sin embargo, se puede elegir la presión de 5 bar si se desea maximizar la densidad de flujo de permeado que es proporcional al aumento de la presión o bien se puede elegir la presión de 4 bar que es donde la membrana modificada más se acerca al comportamiento de una membrana comercial de ultrafiltración.

Los valores de pH obtenidos con ambas membranas no presentaron ninguna relación con la presión, sin embargo, se encuentra en valores normales para ambos casos.

Se obtuvo valores de contenido de cloruro, conductividad y TDS, muy bajos y no corresponden a los esperados mediante una membrana de ultrafiltración, consiguiendo apenas un 10.84% de los TDS obtenidos con la membrana de UF, además el contenido de cloruro es extremadamente bajo en la filtración con la membrana modificada, llegando al valor límite de 7 ppm, mientras que con la

membrana comercial de UF se obtuvo un valor mínimo de 47 ppm, lo que conforma un 14.9% del cloruro filtrado a través de la membrana comercial de ultrafiltración.

Por ende, se concluye que la membrana modificada de ósmosis inversa utilizada en el estudio se alejó del comportamiento de una membrana comercial de UF, en especial al considerar la captación de iones.

En base a lo anterior se concluye que el proceso de modificación de la membrana no fue suficiente, ya que se impide el paso de iones, la cual es una característica de las membranas comerciales de ultrafiltración.

Por todo lo mencionado anteriormente se llega a la conclusión que las membranas modificadas no fueron oxidadas lo suficiente, por tanto se comportan como una especie de membrana intermedia entre ultrafiltración y nanofiltración, ya que es capaz de entregar agua con buenos parámetros, pero tiene problemas en la retención de iones y una menor densidad de flujo, aún así, es buena opción para obtener agua destinada a la agricultura u otras actividades domésticas en zonas donde sea difícil el acceso de agua o directamente no se cuente con uno; y al mismo tiempo se aprovecha de dar una segunda utilidad a las membranas de ósmosis inversa que hayan cumplido su vida útil, disminuyendo la cantidad de plásticos inertes desechados al medio ambiente.

Por último, a pesar de que la membrana modificada se comportó como una especie intermedia entre membrana de ultrafiltración y nanofiltración, se obtuvo como resultado agua de buena calidad, que puede ser usada en casos previamente mencionados, como para la agricultura en sectores rurales que no cuentan con acceso estable de agua debido a las condiciones geográficas o a la sequía del lugar.





## **8. Recomendaciones**

Se recomienda realizar un análisis de impactos económico y ambiental a fin de evaluar la factibilidad del proyecto y ayudar a las poblaciones rurales que se ven afectados constantemente por la sequía.

Por otra parte, se puede realizar un análisis similar para determinar la vida útil de las membranas modificadas de ósmosis inversa.

Además, se puede realizar un estudio similar con distintos tipos de aguas para otros usos.

Finalmente, se deja abierto a la búsqueda de nuevos métodos y tecnologías que permitan afrontar el problema de la sequía y poder construir un planeta mejor.



## 9. Glosario

F.R.	Reducción en la densidad de flujo
M.C.	Membrana comercial de ultrafiltración
M.R.	Membrana de ósmosis inversa modificada a la forma de membrana de ultrafiltración
NMP	Número más probable
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
O.R.	Ósmosis Inversa
TDS	Total de sólidos disueltos
UF	Ultrafiltración




## 10. Bibliografía

- Carpenter, P. L., 1977. Microbiology. 4° ed. W.B. Saunders Co., Philadelphia.
- Cheryan, M., 1998. Ultrafiltration and Microfiltration Handbook. Technomic, Lancaster.
- Coulson, J.M. y J.F. Richardson, 1991. "Membrane separation processes". p. 858-891. In: J.R. Backhurst y J.H. Harker (eds.). Chemical Engineering. Vol. 2. Pergamon Press, New York.
- Cross, R.A., 2002. "Optimum process design for ultrafiltration and crossflow microfiltration systems". *Desalination*. **145**, 159-163.
- Cuperus, F.P. y H.H. Nijhuis, 1993. "Applications of membrane technology to food processing". *Trends Food Sci. Technol.* **4**(9), 277-282.
- Field, R.W., D. Wu, J.A. Howell y B.B. Gupta, 1995. "Critical flux concept for microfiltration fouling". *J. Membrane Sci.* **100**, 259-272.
- Florentius de Bruijn J., 2005. "Ensuciamiento de membranas de ultrafiltración por jugo de manzana". Universidad de Concepción, Chile.
- Kuo, K.P. y M. Cheryan, 1983. "Ultrafiltration of acid whey in a spiral-wound unit: Effect of operating parameters on membrane fouling". *J. Food Sci.* **48**, 1113-1118.
- McGregor, W.C., 1986. "Selection and use of ultrafiltration membranes". p. 1-36. In: W.C. McGregor (ed.). Membrane Separations in Food Processing. Marcel Dekker, New York.
- Strathmann, H., 2001. "Membrane separation processes: Current relevance and future opportunities". *AIChE Journal*. **47** (5), 1077-1087
- Warczok, J., M. Fernando, F. López y C. Guell, 2004. "Concentration of apple and pear juices by nanofiltration at low pressures". *J. Food Eng.* **63** (1), 63-70.

## 11.Apéndice

### 11.1 Análisis de composición de aguas sanitarias de Esval.



LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO

EMPRESA  
INSTITUCIÓN  
DIRECCIÓN  
CILEMO  
ANÁLISIS SOLICITADO  
NÚMERO DE MUESTRAS  
TIPO  
DIRECCIÓN  
SERVICIO  
RUCO Y TÉRMINO DE ANÁLISIS  
CÓDIGO EXTERNO  
CÓDIGO INTERNO  
FECHA DE INFORME

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
SERVICIO LABORATORIO  
VÍCTOR LAMAR 1080  
CONCEPCIÓN  
DEPARTAMENTO  
DE  
AGUA POTABLE (APR)  
690M,  
LUNES 26 DE JULIO DE 2022  
22:01:02 - 15:08:22  
APRILYROSAS  
1080  
11 DE AGOSTO DE 2022

FONO: +56 9 9402 4802


INFORME N° 13354


PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS
ARSENICO <sup>1</sup>	mg/L	< 0,01
CALCIO	mg/L	26
HERRO	mg/L	0,33
MANGANESO	mg/L	< 0,05
NITRATO	mg/L	0,80
NITRITO	mg/L	0,080
SÓLIDOS DISUELTOS	mg/L	476
SÓDICE	mg/L	30
SULFATO	mg/L	62
CLORURO	mg/L	364

NOTAS  
1. SUBCONTRATACIÓN DE SERVICIOS A ENTIDAD AUTORIZADA.  
2. MUESTREO EFECTUADO POR PERSONAL DEL LABORATORIO.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS  
STANDARD METHODS, FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER.

ORIGINAL I-13354 PÁGINA 01 DE 01





PELANTARDO N° 750 - FONOS 41 2310903 - 994402351 - aqualab@outlook.es - CONCEPCIÓN - CHILE

### 11.2. Tabla estadística Mac Grady de número más probable para 3 tubos por dilución

Tabla Mac Grady para 3 tubos por dilución					
NC	NMP	NC	NMP	NC	NMP
000	0.0	201	1.4	302	6.5
001	0.3	202	2.4	310	4.5
010	0.3	210	1.5	311	7.5
011	0.6	211	2.0	312	11.5
020	0.6	212	3.0	313	16.0
100	0.4	220	2.0	320	9.5
101	0.7	221	3.0	321	15.0
102	1.1	222	3.5	322	20.0
110	0.7	223	4.0	323	30.0
111	1.1	230	3.0	330	25.0
120	1.1	231	3.5	331	45.0
121	1.5	232	4.0	332	110.0
130	1.6	300	2.5	333	110.0
200	0.9	301	4.0		140.0

NC = N<sup>o</sup> característico, NMP=N<sup>o</sup> más probable

### 11.3 Observación de resultado negativo por ausencia de gas en tubos con campana Durham.





#### 11.4 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana modificada de OR a 2.5 bar

Q (mL)	t (min)	Flux ( $L/m^2h$ )
11,5	10	98,57142857
10,5	20	90
10	30	85,71428571
9,5	40	81,42857143
9,1	50	78
9	60	77,14285714
8,9	70	76,28571429
8,8	80	75,42857143
8,8	90	75,42857143
8,7	100	74,57142857
8,5	110	72,85714286
8,2	120	70,28571429
8	130	68,57142857
7,9	140	67,71428571
7,9	150	67,71428571
7,9	160	67,71428571
7,9	170	67,71428571
7,9	180	67,71428571
7,9	190	67,71428571
7,8	200	66,85714286
7,6	210	65,14285714
7,6	220	65,14285714
7,6	230	65,14285714
7,6	240	65,14285714

### 11.5 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana modificada de OR a 3.5 bar.

Q (mL)	t (min)	Flux ( $L/m^2h$ )
18	10	154,2857143
16,8	20	144
16	30	137,1428571
15	40	128,5714286
15	50	128,5714286
15	60	128,5714286
15	70	128,5714286
14,6	80	125,1428571
14,2	90	121,7142857
14	100	120
14	110	120
14	120	120
14	130	120
13,8	140	118,2857143
13,8	150	118,2857143
13,8	160	118,2857143
13,6	170	116,5714286
13,4	180	114,8571429
13,2	190	113,1428571
13,2	200	113,1428571
13,1	210	112,2857143
13	220	111,4285714
13	230	111,4285714
13	240	111,4285714

### 11.6 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana de UF a 3.5 bar.

Q (mL)	t (min)	Flux ( $L/m^2h$ )
30,5	10	261,4285714
29,4	20	252
29	30	248,5714286
27,2	40	233,1428571
26,9	50	230,5714286
26,8	60	229,7142857
26,5	70	227,1428571
26	80	222,8571429
25	90	214,2857143
24	100	205,7142857
24	110	205,7142857
23,5	120	201,4285714
23	130	197,1428571
22	140	188,5714286
22	150	188,5714286
21,5	160	184,2857143
21	170	180
20	180	171,4285714
19,5	190	167,1428571
19	200	162,8571429
18,5	210	158,5714286
18	220	154,2857143
18	230	154,2857143
18	240	154,2857143

### 11.7 Datos obtenidos experimentalmente mediante membrana modificada de OR a 5 bar.

Q (mL)	t (min)	Flux ( $L/m^2h$ )
19,4	10	166,2857143
19,2	20	164,5714286
19,1	30	163,7142857
19	40	162,8571429
18,5	50	158,5714286
18	60	154,2857143
17,75	70	152,1428571
17,5	80	150
17,4	90	149,1428571
17,2	100	147,4285714
17	110	145,7142857
17	120	145,7142857
16,8	130	144
16,8	140	144
16,5	150	141,4285714
16,5	160	141,4285714
16,5	170	141,4285714
16,25	180	139,2857143
16,1	190	138
16,1	200	138
16	210	137,1428571
16	220	137,1428571
15,8	230	135,4285714
15,6	240	133,7142857