



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE UN PLAN DE RECICLAJE Y TRATAMIENTO DE  
AGUAS PARA LA CIUDAD DE RANCAGUA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA**

**CECILIA ANDREA HERNÁNDEZ LOYOLA**

**PROFESOR GUÍA:**

FELIPE DÍAZ ALVARADO

**PROFESOR CO-GUÍA:**

JORGE UGARTE HUMERES

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

J. CRISTIAN SALGADO HERRERA

VALERIA PROBOSTE SOBARZO

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniera Civil Química  
POR: Cecilia Andrea Hernández Loyola  
FECHA: 10/05/2017  
PROFESOR GUÍA: Felipe Díaz Alvarado

## **EVALUACIÓN DE UN PLAN DE RECICLAJE Y TRATAMIENTO DE AGUAS PARA LA CIUDAD DE RANCAGUA**

El aumento de la demanda de los recursos hídricos y las limitaciones que presenta su extracción en diferentes zonas del mundo, son problemas del desarrollo humano causados principalmente por el aumento de la población y los efectos del cambio climático en el planeta. El estrés hídrico que generado por la actividad humana e industrial, genera la necesidad de buscar nuevas fuentes de agua es fundamental para el desarrollo futuro de la humanidad. Países como Singapur, Israel y Estados Unidos, entre otros, han implementado el reciclaje de las aguas servidas generadas en su territorio como solución y como una fuente sustentable del recurso hídrico.

El siguiente trabajo tiene como objetivo evaluar la implementación de un sistema de reciclaje de aguas servidas en la ciudad de Rancagua. Se realiza entonces, un análisis de prefactibilidad a nivel técnico y económico, a nivel conceptual, donde se estudian las tecnologías involucradas, dimensionamientos del proceso, costos principales asociados al proyecto, entre otros.

El proceso propuesto para el proyecto de reciclaje de aguas consiste en un tratamiento avanzado de aguas que incorpora oxidación avanzada para la reducción de compuestos orgánicos, ultrafiltración y osmosis inversa para la separación de partículas y elementos contaminantes, y finalmente desinfección mediante cloro gas. Las etapas mencionadas permiten obtener agua reciclada dentro de los parámetros de calidad exigidos para el agua potable, según la normativa chilena. Como resultado, se propone una inyección de los flujos de agua reciclada a la red de agua potable, correspondientes a 20.217 m<sup>3</sup>/día, el 58% de la demanda de agua potable local.

Respecto a la evaluación económica del proceso, se realiza un análisis tarifario de los montos que actualmente cobra la sanitaria de la zona con el fin de construir estimar los costos del agua reciclada. A partir del desglose de la tarifa de la empresa ESSBIO, correspondiente a \$470,79 por metro cúbico de agua potable consumido, se calculan los costos del agua reciclada, dependientes de la distancia entre la planta de rproducción de agua reciclada y la distancia hasta el punto de inyección en la red de agua potable. Además, se realiza un análisis de sensibilidad en los flujos de caja del proyecto para diferentes escenarios. Finalmente, se analiza el efecto del proyecto sobre los caudales del estero La Cadena, cauce donde actualmente son vertidos los efluentes provenientes de la planta de tratamiento de aguas servidas de Rancagua. Como resultado se observa una disminución del 1,9% en su caudal, además, de la disminución de las efectos ambientales producto de la mejora en la calidad de los efluentes que se inyectan a su cauce.

Se concluye que proyectos como el propuesto deben ser analizados en detalle, con el fin de buscar soluciones a los escenarios ambientales que vive Chile, sobretodo en materia hídrica.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al terminar este trabajo cierro los ojos y hago memoria de la niña que hace un poco más de 6 años atrás salía de la burbuja llena de muchas más mujeres, que como ella llegaba a ese extraño y desconocido mundo que es la universidad. Aquel lugar no hubiese sido el mismo son todas las miradas, risas, conversaciones, abrazos de pasillo, reclamos, y tantos otros gestos de todos aquellos que han sido y son parte de mi etapa como universitaria.

Quiero agradecer a mis padres, María Cecilia y Mario, por entregarme la fortaleza, el amor, el apoyo y la vida. Sin ustedes nada hubiese sido posible, para ustedes son y serán todos mis logros. También, agradecer a mi hermana María Paz, mi cómplice y compañera, gracias por soportarme.

A Felipe, por ser mi compañero de vida durante todos estos años. Gracias por todo tu amor, por los momentos buenos y malos, por los consejos, los abrazos y los besos en los momentos en que todo parecía negro. Gracias por querer ser parte de mi vida.

Gracias a mis amigos. A aquellos que vienen desde el plan común, que pese que nuestras carreras nos distancien siempre están; a Gabriel, Feña, Manche, Nacho, Leyton, Mati E.

A mis amigos IQBT's, gracias a ustedes me llevo los mejores recuerdos de la carrera. A Natalia, Marcelo, Mauricio, Mariana, Stefan, Galia, Camila y Carolina; en especial a Fernando y Patricio, compañeros y partners eternos.

Gracias a todo el equipo de Diseño Sustentable. Gracias por dejarme ser parte de un grupo humano hermoso, con grandes sueños y metas. Sigán creciendo y construyendo un mundo mejor, mi corazón siempre va estar con ustedes.

Gracias a todo el equipo de Difusión Colegios de la facultad, a cada uno de los monitores compañeros de charlas, ferias, tours, y millones de actividades.

Gracias al Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, en particular a sus estudiantes, quienes le dan vida a la salita. En especial, quiero dar las gracias a quienes fueron parte del CEIQBT 2016 y la Semana IQBT 2015, gracias por darme el espacio y la confianza para participar en dos hermosos proyectos.

Gracias a mi Comisión de Título, por sus recomendaciones y comentarios, que contribuyeron a las enseñanzas y crecimiento de este trabajo. En particular, agradecer a Jorge Ugarte por aceptar la invitación a sumarse a este trabajo en una etapa avanzada, gracias por los consejos y observaciones realizadas.

Quiero agradecer especialmente al Profesor Felipe Díaz Alvarado. Muchas gracias por sus consejos, confianza y amistad. Gracias por enseñarnos a creer en que se puede hacer Ingeniería de otra forma, gracias por darnos el espacio para crecer como los profesionales que siempre soñamos ser.

Muchas gracias a TODOS los que han sido parte de este proceso, gracias por creer en mí.

# TABLA DE CONTENIDO

---

1	Introducción .....	4
1.1	Antecedentes .....	4
1.1.1	Uso del recurso hídrico.....	4
1.2	Reciclaje de aguas.....	6
1.2.1	Aguas servidas y reciclaje de aguas .....	6
1.2.2	Estado del arte: el reciclaje de aguas en el mundo .....	8
1.2.3	Situación en Chile.....	10
1.3	Caso en estudio .....	12
1.3.1	Importancia y proyecciones.....	12
1.4	Objetivos.....	13
1.4.1	Objetivo general .....	13
1.4.2	Objetivos específicos.....	13
1.4.3	Alcances.....	13
2	Antecedentes y alternativas tecnológicas .....	14
2.1	Procesos y tratamientos para el reciclaje de aguas .....	14
2.1.1	Tratamiento de aguas residuales.....	14
2.1.2	Tratamiento avanzado de aguas.....	15
2.2	Proceso de reciclaje de aguas: contexto internacional.....	17
2.2.1	Namibia .....	17
2.2.2	Australia .....	18
2.2.3	Singapur.....	20
3	Propuesta para sistema de reciclaje de aguas .....	23
3.1	Caracterización del agua reciclada.....	24
3.2	Configuración del proceso de reciclaje de aguas.....	26
3.2.1	Determinación del proceso .....	27
3.2.2	Diagrama de bloques del proceso.....	27
3.2.3	Descripción de las etapas del proceso .....	28
4	Evaluación de la propuesta.....	33

4.1	Evaluación técnica .....	33
4.1.1	Balance de masa del proceso .....	34
4.1.2	Dimensionamientos .....	35
4.1.3	Flowsheet.....	44
4.1.4	Balance de energía.....	44
4.2	Evaluación económica .....	47
4.2.1	Costos de inversión.....	47
4.2.2	Costos operacionales .....	48
4.2.3	Análisis tarifario .....	50
4.2.4	Análisis del flujo de caja del proyecto.....	62
4.2.5	Discusiones.....	64
4.3	Evaluación ambiental.....	66
4.3.1	Situación actual del uso de aguas y descargas de la PTAS en la zona de Rancagua.....	66
4.3.2	Calidad del agua reciclada.....	69
4.3.3	Discusiones.....	70
5	Discusiones generales .....	71
6	Conclusiones .....	73
7	Bibliografía.....	75
Anexos.....		80
A.	Ciclo del agua en Singapur .....	80
B.	Puntos y aplicaciones del agua reciclada en la ciudad de Sídney.....	81
C.	Proceso de reciclaje de aguas en Singapur .....	82
D.	Parámetros de calidad del agua reciclada en Singapur .....	83
E.	Límites máximos para la descarga de Residuos líquidos a cuerpos fluviales .....	84
F.	Comparación de parámetros de calidad de efluentes de PTAS .....	85
G.	Tamaño de partículas y porosidad para Ultrafiltración .....	87
H.	Balance de Masa .....	88
H.1	Oxidación Avanzada .....	88
H.2	Ultrafiltración .....	90
H.3	Osmosis Inversa .....	91

H.4 Cloración .....	93
H.5 Balances de masa por elemento.....	94
I. Simulación membranas de osmosis inversa .....	95
J. Localización geográfica planta de reciclaje de aguas.....	96
J.1 Cuenca del Río Rapel, encerrado en negro la subcuenca del Río Cachapoal.....	96
J.2 Distancia entre planta de producción de agua potable y planta de tratamiento de aguas servidas.....	97
J.3 Perfil de elevación geográfica .....	98
K. Flujo de caja.....	99
K.1 Flujo de caja escenario A .....	99
K.2 Flujo de caja escenario B.....	100
L. Flowsheet del proceso .....	101

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

### 1.1.1 Uso del recurso hídrico

El agua, elemento vital para el desarrollo de la vida humana y las actividades que ello implica, es el foco de este trabajo. La superficie del planeta está compuesta en un 70% de agua, de esta porción sólo el 3% corresponde a agua dulce. Además, parte importante de ese porcentaje se encuentra en casquetes de hielo y glaciares, por lo que únicamente el 1% del agua dulce superficial es aprovechable [1].

La demanda de agua a nivel mundial es un factor que va en aumento producto del crecimiento de la población. Este crecimiento ha significado un incremento en la producción de alimentos, bienes y energía, además del traslado poblacional hacia las grandes ciudades, actividades que requieren alto consumo de agua y generan mayor presión sobre las fuentes hídricas existentes. Expertos del *World Resources Institute* (WRI) han realizado estudios sobre las zonas que presentan estrés hídrico en el planeta en el proyecto *Aqueduct*, donde además se desarrollan análisis sobre la evolución de esta situación hacia el año 2040. Dentro de las regiones en situación de estrés hídrico se encuentran el norte de África, Asia occidental, zonas de América del Norte y la región occidental de América del Sur [2]. En la Figura 1 se puede observar el mapa con las zonas que poseen estrés hídrico en el mundo, poniendo atención a la región de Sur América donde se ubica Chile, y el avance del estrés hídrico hacia el sur del continente.

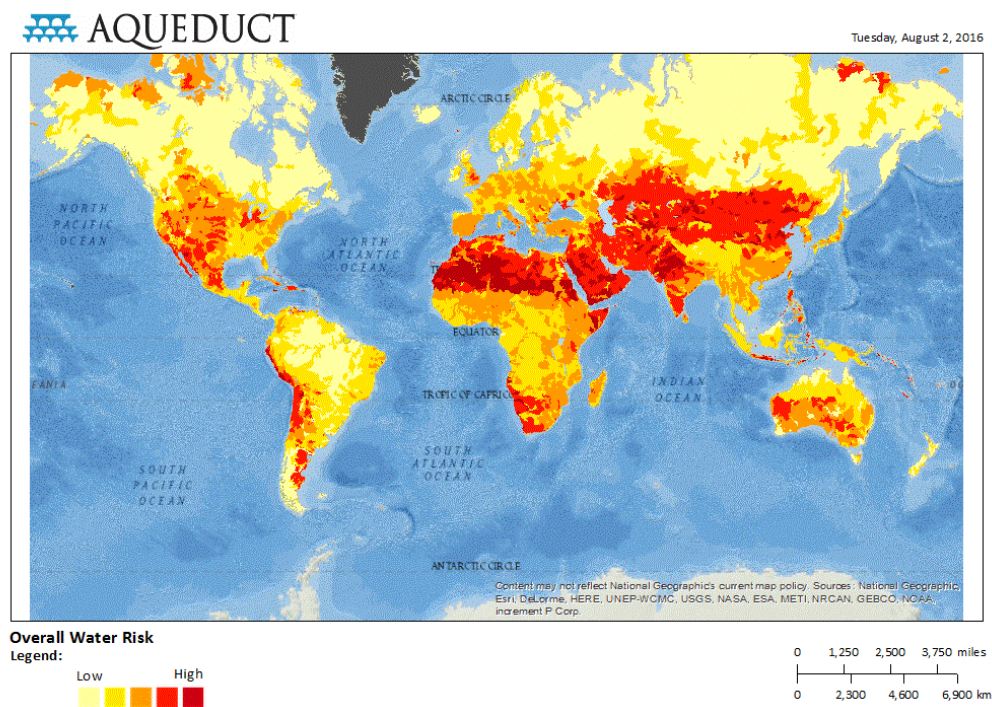


Figura 1: Zonas que presentan estrés hídrico, año 2016 [2].

A nivel nacional, pese a que se han realizado grandes avances en materia medioambiental, en temas relacionados con el uso del recurso hídrico existen oportunidades de mejora que no han sido implementadas (*“Chile cuida su agua”, Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2015*[3]). Del total de agua disponible en el territorio nacional, según estimaciones del Ministerio de Obras Públicas, el 82% es utilizado en el sector Agropecuario, un 7% en el área Industrial, un 3% en la Minería y un 8% es utilizado para los servicios de Agua Potable y Saneamiento[1]. Además, es importante mencionar que la geografía chilena tiene efectos directos sobre la distribución y disponibilidad del agua en las diferentes regiones que componen el país. La Figura 2 muestra la comparación entre los caudales de agua que deben ser extraídos para el desarrollo de las diferentes actividades que desarrolla la región, frente al caudal de agua que efectivamente se encuentra disponible para ser utilizado. Esta disponibilidad hace referencia a las fuentes de agua dulce en cada región, por lo que en aquellas zonas donde la demanda de agua es superior a ella se deben buscar formas alternativas de obtener el recurso, como la desalinización de agua de mar en el norte del país.

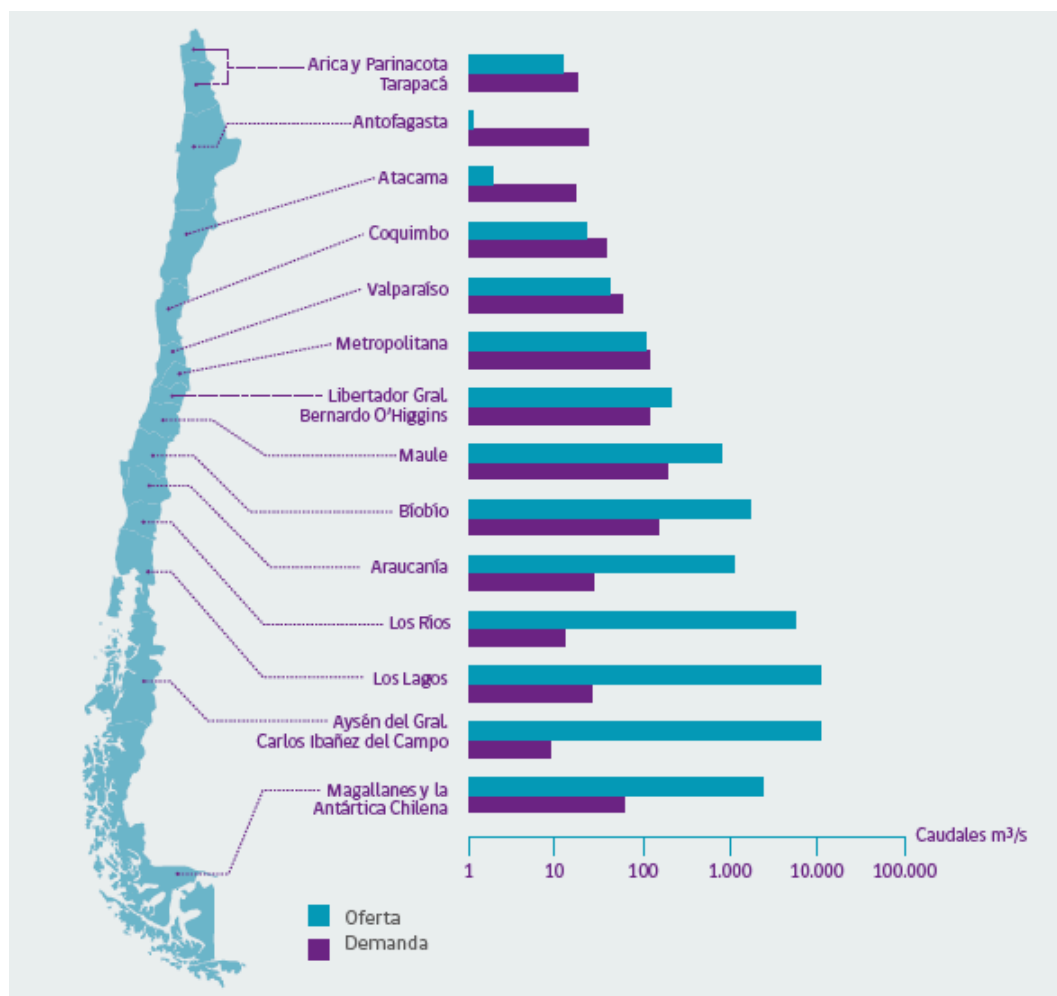


Figura 2: Disponibilidad y extracción de agua por región y por habitantes en Chile (2009) [4].



Las diferencias evidenciadas entre la extracción y disponibilidad permiten realizar análisis sobre el uso del recurso hídrico a lo largo del país, dadas las características de cada zona y las diferentes actividades que cada región desarrolla con menor o mayor énfasis. Por ejemplo, en el norte de Chile las fuentes de agua dulce son escasas y el desarrollo de la población requiere grandes volúmenes de ella, ya sea para las actividades domésticas como agua potable y riego, o para fines industriales donde las empresas mineras son predominantes. Sin embargo, para el riego de áreas verdes, actividades recreacionales o actividad industrial, el uso de agua potable es en muchos casos poco eficiente, debido a su disponibilidad reducida y la existencia de otros usos de primera necesidad.

¿Es posible entonces encontrar nuevas fuentes de agua que permitan dar soluciones a las necesidades del desarrollo de la población sin comprometer el abastecimiento de las futuras generaciones? El desafío consiste en disminuir el impacto sobre el recurso hídrico y favorecer su sostenibilidad en el tiempo.

## **1.2 RECICLAJE DE AGUAS**

### **1.2.1 Aguas servidas y reciclaje de aguas**

El escenario nacional e internacional planteado anteriormente ha generado la necesidad de buscar nuevas fuentes hídricas que promuevan y mejoren la sostenibilidad del recurso. Es en este contexto que la reutilización y reciclaje de aguas surge como una alternativa para la obtención de agua para diversos usos.

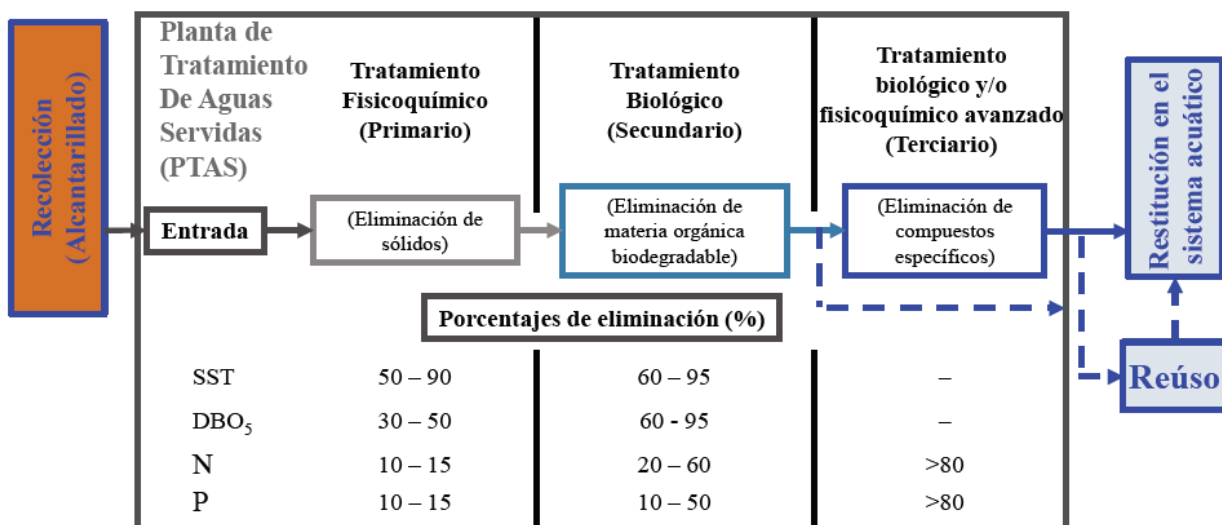
Se entenderá como aguas servidas al conjunto de caudales integrado por las aguas residuales domésticas desechadas, producto de la actividad cotidiana de las personas y que además no poseen valor económico para algún proceso o actividad, además de los residuos industriales líquidos (RILes) que han sido previamente tratados y vertidos al alcantarillado. Dentro de los flujos que componen las aguas servidas se pueden identificar dos tipos: aguas grises y aguas negras. Por un lado, las aguas grises corresponden a la parte de las aguas servidas domésticas libre de materias fecales y desagües de la cocina, mientras que las aguas negras corresponden al agua de evacuación de heces y orina (en algunos casos se incluyen las aguas de la cocina)[5].

Las aguas servidas son dispuestas en un sistema de alcantarillado encargado de transportarlas a plantas de tratamiento donde se acondicionarán para una posterior liberación a efluentes superficiales (ríos, canales de riego, etc). Este tipo de agua se caracteriza por la presencia de agentes patógenos que pueden ser perjudiciales para la salud de las personas. A continuación, en la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales características fisicoquímicas y concentraciones de sustancias presentes en aguas servidas.

Tabla 1: Concentraciones de parámetros característicos en aguas servidas urbanas, promedios en basados en la caracterización de aguas en EEUU, Europa y Latinoamérica[5].

Parámetro	Unidad	Rango
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	250 - 1600
Demanda Biológica de Oxígeno en 5 días (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	110 - 800
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	120 - 450
Nitrógeno Total (N)	mg/L	20 - 85
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	12 - 50
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	mg/L	20 - 80
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	< 1
Fósforo Total (P)	mg/L	2- 23
Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	3 - 14
Coliformes Fecales (CF)	NMP/100 mL	1*10 <sup>3</sup> - 2*10 <sup>8</sup>

Los tratamientos convencionales de aguas servidas, o aguas residuales urbanas, se componen de tres partes principales: recolección, tratamiento y evacuación. La recolección consiste en el sistema de alcantarillado urbano. El proceso de tratamiento consiste en una serie de etapas que realizan un tratamiento físico-químico al agua para cumplir con las normas de calidad del Reglamento Sanitario. Finalmente, la evacuación consiste en la restitución del agua tratada al ciclo hidrológico. El tratamiento recibido es capaz de reducir diferentes porcentajes de los parámetros mostrados en la Tabla 1, donde el valor de ellos condiciona el tipo de uso o disposición que el agua podrá tener, permitiendo el reúso y reciclaje de aguas. En la Figura 3 se puede observar las diferentes etapas que componen el tratamiento de aguas servidas y los porcentajes de reducción de los parámetros en ellas.



El reciclaje de aguas es un proceso que está siendo estudiado e implementado en diversos lugares del mundo, y consiste en la obtención de agua potable a partir del tratamiento adecuado de las aguas residuales urbanas. El reciclaje y reúso de aguas residuales tratadas permite valorizar un residuo líquido que se elimina a través de los sistemas de tratamiento existente (PTAS urbanas, rurales y emisarios submarinos). Las tecnologías y las dimensiones de las unidades de tratamiento utilizadas para este fin permiten la producción de agua con diferentes estándares de calidad fijados por los requerimientos del agua de salida, tales como como aguas para la agricultura, riego, procesos industriales, recarga de reservas de agua (embalses o pozos subterráneos), y la potabilización que representa el tratamiento más riguroso de reciclaje. Las ventajas del reciclaje de aguas hacen referencia a ahorros en términos de recursos hídricos y económicos[6]. Este proceso representa una alternativa de manejo más sustentable del recurso hídrico, debido a los beneficios que se nombran a continuación:

- I. Conservación de los suministros de agua de alta calidad provenientes de fuentes naturales o potabilización, debido a la sustitución por el agua reciclada.
- II. Reducción del impacto en el medioambiente debido a la disminución en la descarga de aguas con mayores concentraciones de compuestos (reducción de los flujos de aguas servidas o residuales urbanas).
- III. Beneficio económico, el ahorro de agua de mayor calidad generaría impactos positivos en las cuentas del agua en zonas urbanas, ahorros también que zonas rurales debido a los contenidos de nutrientes que se puedan tener en un agua destinada a riego lo que disminuiría los fertilizantes a utilizar.

### 1.2.2 Estado del arte: el reciclaje de aguas en el mundo

Existen diversos ejemplos internacionales donde el agua reciclada ocupa un lugar importante entre las fuentes hídricas disponibles.

El país pionero en reciclaje de aguas es **Namibia**. Durante los años 60, debido a la escasez y dificultad para acceder a fuentes de aguas seguras, en la ciudad de Windhoek se construyó la primera planta de reciclaje de aguas: *Goreangab Water Reclamation Plant*[7]. Esta planta aprovechaba la calidad de los efluentes generados por la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad para la producción de agua reciclada, o como se le conoce en el mundo *reclaimed water*. En el año 2002 se inauguró una nueva planta de reciclaje de aguas, llamada *New Goreangab*, la cual emplea un sistema de multibarrera de nueve pasos encargados de garantizar la calidad y requerimientos del agua reciclada que permitan su consumo como agua potable, esto significa eliminar todo contaminante que represente riesgos para la salud de los consumidores. La nueva planta de reciclaje de aguas produce diariamente un volumen de 21.000 m<sup>3</sup> de agua potable, de alta calidad, lo que corresponde al 25% del total de agua consumida en Windhoek[8].

**Australia** representa otros de los ejemplos internacionales en esta materia. Las graves sequías que se produjeron a mediados de los años 90 en el país obligaron a sus autoridades a tomar medidas y regulaciones que aseguraran el abastecimiento a la población del recurso hídrico en el corto y largo plazo. Las primeras medidas apuntaron a utilizar los efluentes provenientes del tratamiento de las aguas residuales urbanas para satisfacer la demanda del sector agrícola, posteriormente se comenzó a explorar y a desarrollar nuevos sistemas de tratamiento avanzado de agua que permitieran el uso indirecto de las aguas recicladas en la industria, regadío de complejos deportivos, recarga de sistemas naturales de abastecimiento de agua cruda (embalses, napas subterráneas), entre otros, dependiendo de las normativas estatales[9].

Otro ejemplo a destacar es el caso de **Singapur**. El país ubicado en el Sudeste Asiático, debido a su geografía, presenta importantes problemas asociados al abastecimiento de agua dulce, hechos que han llevado a sus autoridades a explorar nuevas tecnologías, entre ellas: desalinización de agua de mar, importación de agua potable desde países vecinos, y la recolección y almacenamiento de aguas provenientes de las precipitaciones[10]. Sin embargo, debido a la superficie del país (718 km<sup>2</sup>, inferior a la superficie del lago Llanquihue[11]) y su geografía, la construcción de embalses y acuíferos de almacenamiento presenta grandes dificultades, sumado a los altos costos que representa el proceso de desalinización de agua de mar. Ante esto, el año 2003 comenzó la operación de un nuevo sistema encargado de reciclar las aguas provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS). El agua reciclada producida en Singapur, conocida como *NEWater*[12], posee tres destinos para su utilización:

- Uso indirecto para la obtención de agua potable: Cerca del 15% del agua reciclada producida se mezcla con las reservas de agua cruda<sup>1</sup> para su posterior potabilización y distribución a los consumidores.
- Uso directo de agua “no potable”: Desde etapas intermedias del proceso de reciclaje de agua, se extraen flujos que alimentan usos industriales o agrícolas del recurso hídrico.
- *NEWater*: Agua destinada al consumo humano. Esta agua reciclada posee parámetro de calidad mayores que los establecidos por la EPA o la *World Health Organization* (WHO)[13].

En el Anexo A se puede observar un esquema del ciclo del agua en Singapur.

Otro de los ejemplos internacionales en materia de reciclaje de aguas es **Israel**. Israel es un país que, debido a condiciones geográficas como la aridez de su territorio, sufre de graves problemas de sequía, motivo por el cual las autoridades del país han debido impulsar nuevos proyectos y estrategias dirigidas a la creación de nuevas tecnologías que den solución a la falta de agua dulce. Estas tecnologías van desde el riego a goteo, reutilización de aguas, desalinización de agua de mar y reciclaje de aguas, procesos que han llevado a Israel a convertirse en líderes en tecnologías de aguas[14]. Hoy en día, cerca del 70% de las aguas servidas son recicladas y utilizadas en el sector agrícola. Pese a que el agua reciclada que es capaz de producir Israel posee

---

<sup>1</sup> Agua cruda: Agua en su estado natural, que no ha sido sometida a tratamiento.

una calidad similar a su agua potable, esta agua se destina principalmente a usos donde no sea necesaria el agua potable con el objetivo de reducir la demanda de las fuentes de agua dulce. El reciclaje de aguas urbanas ha liberado a Israel de la dependencia de la lluvia para la producción de alimentos de consumo local y de exportación.

### 1.2.3 Situación en Chile

Chile ha alcanzado niveles de cobertura en el tratamiento de las aguas residuales cercanos al 99% en sectores urbanos, ubicándolo a la altura de países desarrollados en la materia, contando con 283 sistemas de tratamiento de aguas residuales autorizados y monitoreados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), a lo largo del territorio nacional. Sin embargo, el reciclaje y reúso de agua es un desarrollo pendiente[15]. En la Figura 4 se puede observar la distribución de la disposición de las aguas tratadas en el país.

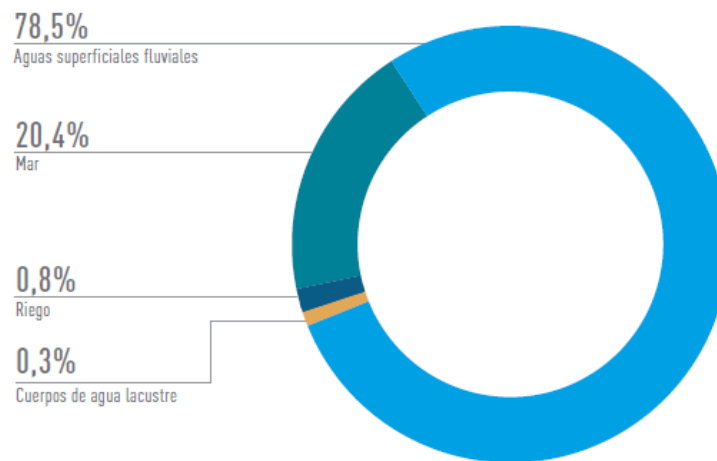


Figura 4: Disposición de las aguas post tratamiento, en Chile [15].

A nivel legislativo se están realizando gestiones que permitan tener una normativa que regule la reutilización de aguas grises domésticas libres de materias fecales. La reutilización de aguas que propone esta iniciativa busca llegar al nivel domiciliario y a instituciones públicas a lo largo de todo el país, como colegios, riego a escala municipal, etc [16].

Además del proyecto de ley existente, en la región de Antofagasta se han desarrollado proyectos con el fin de reutilizar el agua servida generada en la ciudad para poder abastecer del recurso a zonas industriales ubicadas hacia el interior del territorio, zonas donde el abastecimiento de agua es difícil o posee un alto costo, como es la implementación de plantas desalinizadoras de agua. Adicionalmente, autoridades regionales y organismos privados han elaborado un Plan Maestro que propone la instalación de una planta de tratamiento para los emisarios submarinos que genera la ciudad de Antofagasta, con el fin de obtener agua apta para el riego de áreas verdes [17].

El escenario actual del país en relación con los recursos hídricos disponibles, y el uso al que son destinados, requiere plantear nuevas iniciativas permitan asegurar el abastecimiento a la

población, con ello facilitar el desarrollo de la agricultura y otros sectores productivos altamente demandantes de aguas, pensando en el futuro. Así como Namibia, Australia e Israel han debido lidiar con la sequía y la escasez de forma directa, el norte grande del país ya comienza a sufrir sus efectos.

## 1.3 CASO EN ESTUDIO

Se propone evaluar la instalación de una planta de reciclaje de aguas, incorporando procesos existentes para el tratamiento de aguas servidas y posteriormente el tratamiento avanzado de aguas, utilizando como base teórica la experiencia internacional. La evaluación busca determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la planta, además de elaborar propuestas sobre los posibles usos del agua obtenida.

Para la realización de este proyecto se elige como caso base un flujo de aguas servidas, tratadas, generadas en una localidad del país, donde el reciclaje de aguas represente una fuente alternativa de agua.

El caso a estudiar corresponde a la empresa ESSBIO S.A., en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

La empresa, además de prestar servicios en la región de O'Higgins, tiene cobertura en las regiones del Maule y el Biobío, alcanzando cerca de 770.356 personas al año 2015 [18]. El foco de ese trabajo se centrará en flujos de aguas residuales urbanas que son tratadas en la planta de tratamiento de aguas servidas de la localidad de Rancagua, servicio sanitario que llega a cerca de 300.000 habitantes de la zona[19].

Respecto a las características de los efluentes a procesar, estas aguas cumplen con las exigencias que establece el Decreto Supremo n°90, sobre la descarga de efluentes en aguas superficiales[20]. El tratamiento realizado a las aguas residuales es de lodos activados. Actualmente, la descarga del efluente es realizada al estero La Cadena, ubicado aguas abajo de la planta de tratamiento, cauce que posteriormente llega como afluente al río Cachapoal [21].

### 1.3.1 Importancia y proyecciones

El proyecto que se propone en este trabajo de título resulta de interés para el caso en estudio debido a las actividades económicas que se realizan en la región. La Región de O'Higgins abarca 11,4% de la superficie nacional dedicada a cultivos, según el censo agropecuario de 2007.

Dentro de los principales usos se encuentran: frutales (26,4%), plantaciones forestales (24,8%), cereales (19,5%) y viñas (12%). Estos cuatro usos concentran el 82,7% de los suelos de cultivo de la región [22].

Estos antecedentes, junto a las proyecciones del *World Resources Institute* acerca del estrés hídrico que sufre el planeta, permiten pensar en el planteamiento de planes que aseguren la continuidad de las actividades productivas que permiten el desarrollo económico de la región. Además, cabe señalar que las características de la región donde propone el proyecto son replicables en la zona centro del país (desde la cuarta a la séptima región): actividades productivas dedicadas a la agricultura, una densidad demográfica en alza, y aumento del estrés hídrico dada la creciente demanda del recurso. Por lo tanto, propuestas como la que este proyecto plantea, generan posibles soluciones a la situación hídrica que el país vive y seguirá desarrollando en el futuro.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

El objetivo general del proyecto es evaluar un plan de reciclaje de aguas residuales urbanas que pueda ser implementado en la región de O'Higgins, específicamente acoplado a la planta de tratamiento de aguas servidas ubicada en la localidad de Rancagua. El propósito de este reciclaje es, en un futuro, disminuir la presión sobre las fuentes naturales de agua a través de la inyección de agua reciclada que cumpla con los estándares y normativas de calidad para su consumo como agua potable.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

A continuación, se listan los objetivos específicos del este trabajo.

- I. Evaluar técnicamente las alternativas de reciclaje de agua existentes.
- II. Definir el sistema a implementar, en base a las alternativas de tratamiento aplicables al caso en estudio.
- III. Evaluar económicamente el plan de reciclaje de aguas a partir del estudio de indicadores y comparaciones relacionadas con los escenarios sin planta de reciclaje y con ella.
- IV. Evaluar ambientalmente el plan de reciclaje de aguas, abordando los cambios que el proyecto genera sobre la zona donde se propone implementar.
- V. Generar recomendaciones sobre las alternativas de tratamiento de aguas servidas para su reciclaje en el sistema de agua de la comuna.

### **1.4.3 Alcances**

El alcance de este trabajo consiste en proponer un proceso que permita obtener agua reciclada, considerando el contexto donde se enmarca el proyecto: la ciudad de Rancagua.

La propuesta incluye una evaluación técnica, que considera los balances de masa y energía del proyecto, así como también los dimensionamientos de las principales unidades operacionales que integran el proceso productivo, generando un diagrama de flujos (flowsheet).

Además de la evaluación técnica se realiza una evaluación económica del proyecto, con el fin de conocer los costos de capital que requiere su implementación. Esta evaluación es exploratoria, hace énfasis en los costos de inversión y un análisis del régimen tarifario del agua producida.

Finalmente, se realiza una evaluación ambiental que considere los impactos energéticos y los impactos en el consumo de agua que generará el proyecto.



## 2 ANTECEDENTES Y ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

---

### 2.1 PROCESOS Y TRATAMIENTOS PARA EL RECICLAJE DE AGUAS

Para entender los procesos que conducen al reciclaje de aguas, en este trabajo se describen los tratamientos involucrados en el consumo de agua, poniendo atención a los tratamientos de aguas servidas.

Se pueden diferenciar tres tipos de tratamientos: tratamiento de agua convencional (potabilización de agua), tratamiento de aguas residuales y tratamiento avanzado de aguas [23].

El tratamiento convencional de aguas hace referencia a los procesos encargados de transformar el agua cruda, obtenida desde fuentes naturales de abastecimiento, en agua potable. Las etapas involucradas en estos procesos incluyen sedimentación, coagulación, floculación, filtración y desinfección.

Sobre el tratamiento de aguas residuales, tal como se mencionó en secciones anteriores, corresponde al acondicionamiento de las aguas residuales urbanas para su posterior liberación a cursos de agua naturales.

El tratamiento avanzado de aguas corresponde a procedimientos posteriores a los tratamientos convencionales de aguas residuales, donde se busca alcanzar estándares de calidad que permitan emplear el agua en diferentes usos, que requieren o no contacto directo con el ser humano. Las tecnologías existentes para este tipo de tratamientos permiten obtener aguas que pueden utilizarse desde regadío hasta agua potable. Es aquí donde se centra la atención de este trabajo, debido al alto potencial para generar aguas recicladas dentro de la sociedad [23].

El reciclaje de aguas requiere de al menos dos de los tipos de tratamientos descritos anteriormente. Para efectos de este trabajo se decide estudiar las tecnologías relacionadas con el tratamiento de aguas residuales y tratamiento avanzado de aguas, estableciendo como supuesto que el agua a reciclar proviene directamente desde usos urbanos (aguas servidas, industriales y de regadío presentes en el alcantarillado municipal).

#### 2.1.1 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos, biológicos y/o fisicoquímicos (o combinaciones de los anteriores), con el objetivo de reducir la carga de contaminantes presentes en el agua, para poder adecuarlas a las normas de descarga a los cuerpos receptores [24].

Los objetivos específicos de estos tratamientos son:

- Reducción de sólidos.
- Reducción de materia orgánica biodegradable.
- Eliminación de compuestos específicos.

En la Figura 5 se muestra un esquema de la clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales.

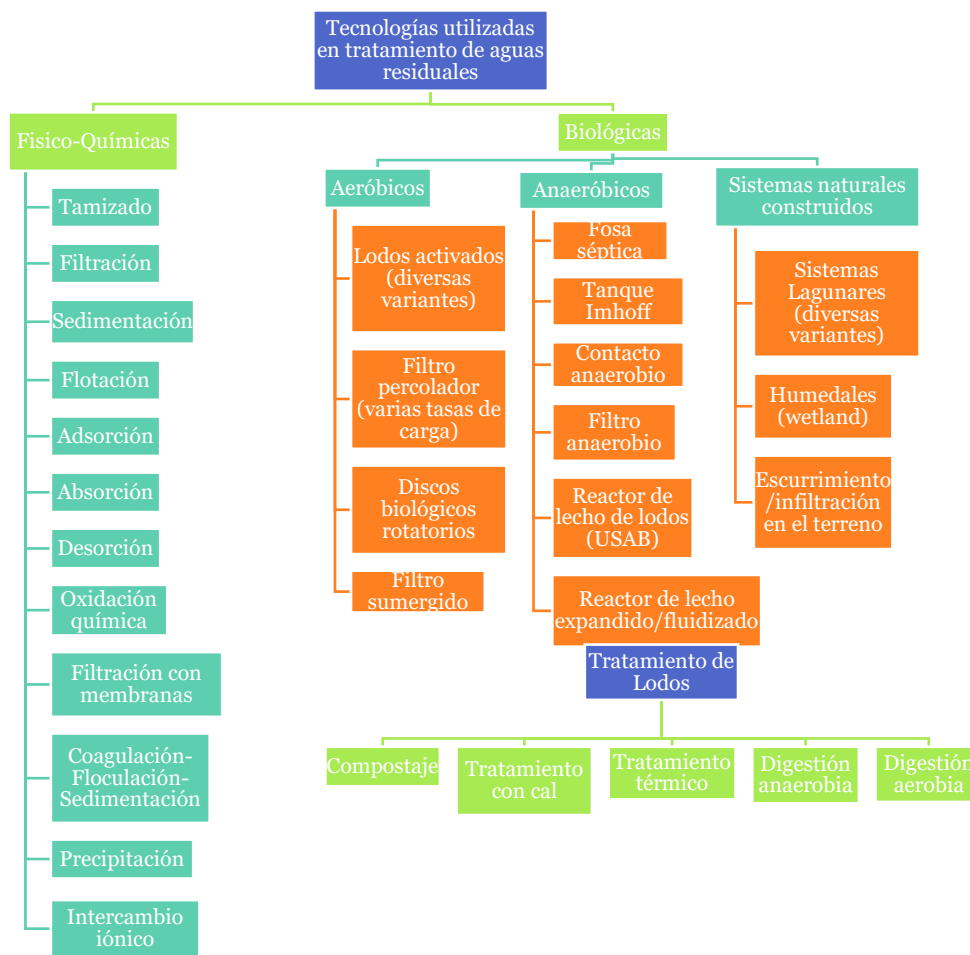


Figura 5: Clasificación de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, más utilizadas en Chile [25].

Tal como se observa en el esquema de la Figura 5, el tratamiento de aguas residuales debe incluir un tratamiento de lodos o el material contaminante removido desde el agua. El flujo y calidad de estos lodos dependerán de las características del agua residual a tratar, la humedad que ellos posean, y también de la configuración del sistema de tratamiento.

### 2.1.2 Tratamiento avanzado de aguas

Los tratamientos avanzados de aguas permiten acondicionar los flujos de agua alimentados al proceso a los niveles de calidad necesarios, según sea el uso del agua de salida del tratamiento. De esta forma, se pueden nombrar algunos de los objetivos de los tratamientos avanzados [23]:

- Reducción de la concentración de sólidos suspendidos que permanecen en el agua residual tratada.
- Reducción de sólidos o químicos disueltos, tales como sales inorgánicas, compuestos orgánicos y nutrientes.
- Eliminación de agentes patógenos y desinfección.
- Estabilización del agua mediante la restauración de su alcalinidad, pH y dureza.

A partir estos objetivos se puede identificar las operaciones unitarias que componen el tratamiento y los tipos de tecnologías necesarias, tal como se muestra en la Figura 6.

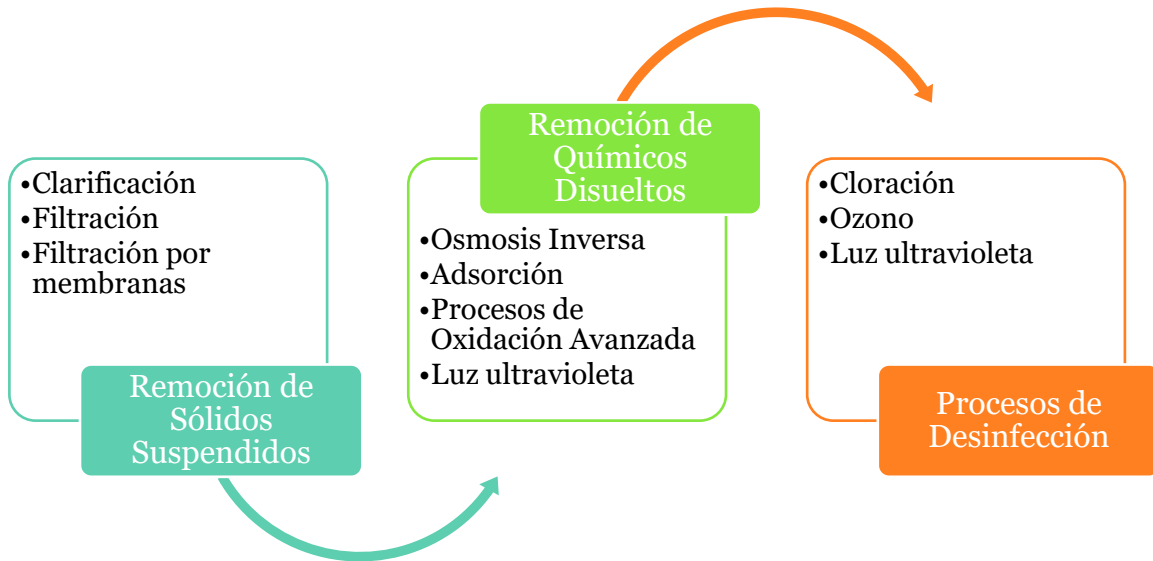


Figura 6: Operaciones y tecnologías utilizadas en tratamientos avanzados de agua [23].

El orden de estas etapas sigue la lógica de buscar eliminar, en primera instancia, aquellos compuestos y moléculas presentes en mayor concentración utilizando procesos mecánicos. Posteriormente se busca eliminar los compuestos disueltos en el agua mediante procesos fisicoquímicos o químicos, dependiendo de las características de las partículas. Finalmente, a través de procesos químicos se busca desinfectar y eliminar microorganismos u orgánicos, que sigan presentes en el flujo de agua a tratar.

El capítulo 3 de este trabajo presenta una propuesta para la elaboración del proceso de reciclaje de aguas, utilizando como referencia los principios expuestos en el presente capítulo.

## 2.2 PROCESO DE RECICLAJE DE AGUAS: CONTEXTO INTERNACIONAL

Tal como se mencionó en la introducción de este trabajo, existen diversos ejemplos a nivel internacional en materia de reciclaje de aguas.

En esta sección se profundizará en tres casos, de los anteriormente nombrados, que servirán como modelos para el proyecto en estudio. Estos casos corresponden a los sistemas de reciclaje de aguas implementados en Namibia, Australia y Singapur. El caso de Israel pasa a segundo plano debido a los complejos sistemas de distribución diferenciada del suministro de agua potable, reciclada y desalinizada.

### 2.2.1 Namibia

Si se habla sobre la historia del reciclaje de aguas en el mundo, Namibia es uno de los pioneros en esta materia. Desde el año 1968, en la ciudad de Windhoek opera la planta de reciclaje de aguas *Goreangab Water Reclamation Plant* (GWRP)[7].

Windhoek es la capital de Namibia, país ubicado en el Suroeste de África. Esta ciudad se caracteriza por ser pionera en la recuperación y/o reciclaje de aguas a nivel mundial. En términos geográficos, se caracteriza por ser una zona rodeada de desiertos, aun así, posee temporadas de lluvias que son responsables de abastecer los reservorios de agua superficial de la ciudad. En 1958, el suministro de agua potable comenzó a depender de la planta *Goreangab*, sin embargo, el abastecimiento de agua no era suficiente, debido a lo limitado del recurso. Así fue como en el 1968 la planta de agua potable fue ampliada y transformada para poder recibir como nueva fuente de agua a los flujos provenientes de la planta de aguas residuales de la ciudad: *Gammams Wastewater Treatment Plant*[23]. GWRP trata las aguas residuales municipales, mezcladas con las fuentes superficiales de agua de la ciudad, su capacidad inicial fue de 4.000 m<sup>3</sup>/día llegando a tratar 7.000 m<sup>3</sup>/día, los flujos producidos equivalen al menos al 12% de la producción de agua potable para la ciudad de Windhoek (en 1997 se llegó a producir hasta el 18% del total de la demanda)[23].

Para mejorar la calidad del suministro de agua y aumentar la capacidad de producción de esta, en 2002 fue terminada una nueva planta de reciclaje de aguas, instalada junto a la antigua GWRP. La nueva planta cuenta con una capacidad de producción de 8 millones m<sup>3</sup>/día, alcanzando a proveer cerca del 35% de la demanda de agua y capaz de aumentar este suministro al 50% en condiciones de sequía.

El diseño de la nueva planta de reciclaje de agua sigue el concepto de un sistema multibarreras. En este sistema, un cierto número de barreras son dispuestas y configuradas, dependiendo de los riesgos para los usuarios, asociados a ciertas sustancias o contaminantes presentes en el agua[7]. El proceso al que es sometida el agua consiste en coagulación/floculación, seguido de flotación y filtración, posteriormente el agua es tratada con ozono y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), seguida de una filtración con carbón activado granular. Finalmente, las últimas barreras del sistema consisten en una ultrafiltración, estabilización del agua y desinfección con cloro. En la Figura 7 se puede observar un esquema del sistema de múltiples barreras implementado en la planta de reciclaje de aguas.

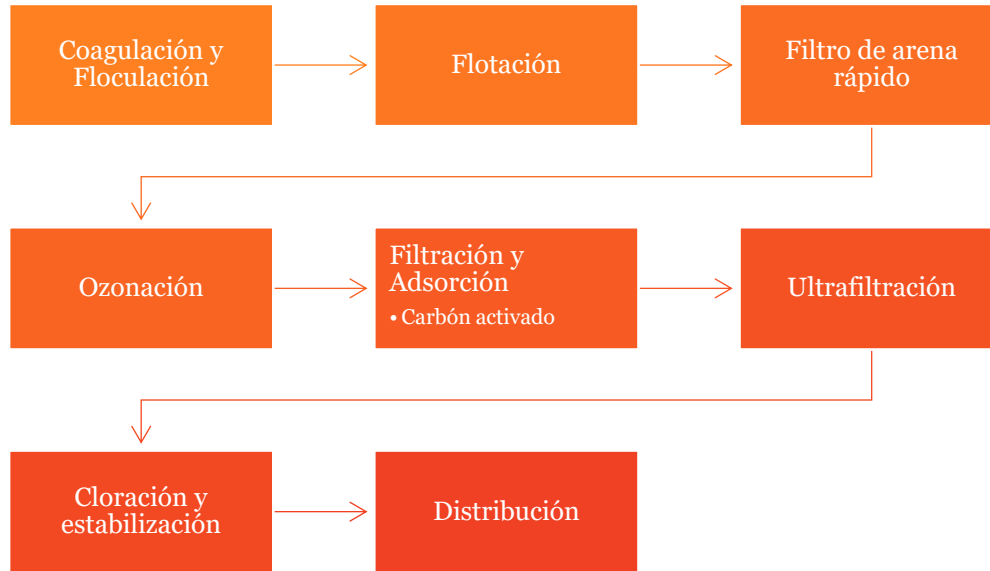


Figura 7: Sistema de múltiples barreras en Windhoek, Namibia [7].

Este ejemplo genera interés en su estudio, debido a las condiciones geográficas, políticas y económicas que vive Namibia, país donde fueron capaz de buscar solución a la escasez hídrica en el llamado Tercer Mundo. Si bien, las características de Chile distan a nivel socioeconómico, es importante notar que la adaptación es fundamental para la creación de nuevas iniciativas hídricas.

### 2.2.2 Australia

El caso australiano, relativo al reciclaje, nace también de la geografía y el clima del país. Australia está ubicado en el continente más pequeño del mundo, Oceanía, y al mismo tiempo es el sexto país más grande en la tierra. Posee diferentes zonas geográficas y climáticas, siendo el clima desértico o semiárido el predominante, donde alrededor de 1,4 millones de km<sup>2</sup> de su superficie están cubiertos de desiertos [26]. Entre los años 1997 y 2009 se produjo la llamada *Sequía del Milenio*, evento que impactó la mayor parte de Australia. La capacidad de respuesta y adaptación del país permiten reconocerlo como una de los ejemplos globales en términos de la gestión de su recurso hídrico. Como resultado, Australia ha modificado su institucionalidad y las políticas públicas para conseguir una gestión integrada de sus recursos hídricos [26].

La reutilización y el reciclaje de aguas comienza con la observación de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas servidas, ubicadas en diferentes regiones del país. La calidad de estos flujos permitía realizar directamente la reutilización para fines de regadío en los sectores agrícolas, zonas recreacionales como campos de golf u otros, evitando de esta manera las consecuencias de la sequía y el racionamiento de agua [27].

Actualmente, cerca del 15% de los efluentes del sistema de alcantarillados son reciclados. Respecto a este reciclaje, existen grandes diferencias entre el tipo de uso (o reúso) que se les da a

los flujos de agua reciclada, dependiendo del estado donde se realice este proceso. La región de Australia Meridional recicla cerca del 20% de su agua residual, mientras que el Territorio Capital y Territorio del Norte reciclan menos del 10% de su agua. Los mayores porcentajes de reciclaje de agua se llevan a cabo en los territorios regionales. En muchos de estos casos el porcentaje de reutilización de los efluentes provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas llega al 100% debido a la necesidad de regadío perteneciente al sector agrícola [28].

Si se analiza un caso particular de las ciudades australianas, Sídney en el año 2010 logró un ahorro de 33 mil millones de m<sup>3</sup> de agua al año gracias a la utilización de agua reciclada, en aplicaciones que antes ocupaba el agua potable. En el Anexo B se muestran los puntos y aplicaciones donde es utilizada el agua reciclada en la ciudad de Sídney [29].

Respecto al tipo de agua que es producida mediante el proceso de reciclaje, el país australiano ha elaborado una guía donde se definen los usos, características y lineamientos relacionados con el producto, y donde además se busca educar a la población acerca de la importancia que tiene la producción de agua reciclada en el país[9]. En la *Guía Australiana para el Reciclaje de Agua* se define al agua reciclada como aquella que ha sido tratada para “un propósito establecido”, es decir, los estándares de calidad del agua tratada deberán ser los adecuados para el uso que donde se desee emplear, es en este punto donde se instala el esquema multibarreras empleado para el tratamiento de aguas. El enfoque multibarreras, al igual que en el caso de Windhoek, se aplica a afluentes de agua provenientes de diferentes fuentes (alcantarillado, ríos, embalses, etc) con tal de asegurar la reducción de contaminantes químicos y/o biológicos presentes en el agua. En la Figura 8 se puede observar el sistema multibarreras empleado en Australia para el reciclaje de aguas.

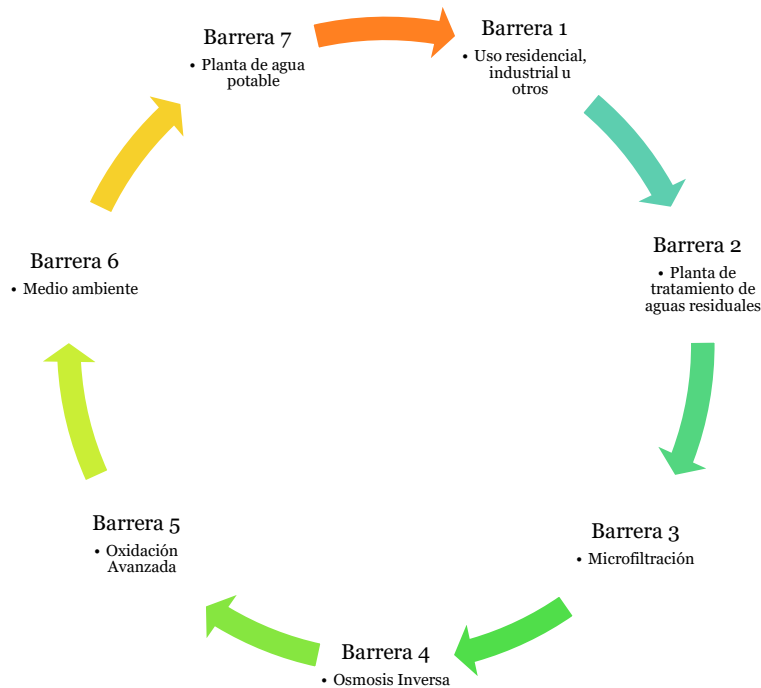


Figura 8: Diagrama del proceso multibarrera empleado en Australia [23].

A diferencia del esquema utilizado en Windhoek, las múltiples barreras empleadas en Australia buscan devolver el agua a su ciclo natural, retornando los efluentes al medio ambiente, agente que representa la sexta barrera del esquema. Sin embargo, las tecnologías empleadas en etapas anteriores incluyen los procesos de tratamiento de las aguas residuales, microfiltración, osmosis inversa y oxidación avanzada.

El caso australiano resulta interesante de analizar debido a las similitudes que se pueden establecer con Chile. Ambos países poseen una diversidad de zonas climáticas que obligan a las autoridades a desarrollar nuestras iniciativas o políticas orientadas a satisfacer las necesidades de la población, en este sentido Australia es un referente para el caso chileno, adoptando medidas que se ajustan al contexto y características del caso. Además, resulta interesante estudiar la estructuración y detalle de los procesos involucrados en el reciclaje de aguas australiano, que además de adoptar medidas, han elaborado manuales y guías que permitan a otros países del mundo considerar proyectos similares.

### 2.2.3 Singapur

Singapur es un pequeño país insular del Sudeste Asiático, de 718 km<sup>2</sup> de superficie y una población de 5,5 millones de habitantes. En materia de recursos hídricos, el país se caracteriza por sus limitadas fuentes por lo que, al igual que los casos anteriormente mencionados, se han debido establecer y promover mecanismos de innovación e investigación que aseguren la sostenibilidad del agua.

El consumo de agua potable diario es de 2 millones de m<sup>3</sup> (demanda al 2016), y se espera que la demanda se duplique al año 2060 [30]. Además, del total de agua consumida se estima que el 45% de esta es destinada al sector residencial y el 55% restante al sector industrial del país. Respecto a las fuentes de abastecimiento de agua que posee Singapur se pueden identificar cuatro[31], estas son:

1. Cuencas hidrográficas locales
2. Agua importada: El agua es conducida a Singapur a través de tuberías provenientes de Malasia.
3. Agua reciclada: También conocida localmente como NEWater, es producida desde el 2003 y su proceso consiste en la purificación de aguas residuales. Actualmente, Singapur cuenta con cuatro plantas de agua reciclada, las que cubren el 30% de la demanda nacional.
4. Desalinización: Este consiste en un proceso que permite procesar el agua de mar para obtener agua potable. En comparación con la producción de NEWater, este proceso es más costoso.

Proyecciones de la Agencia Nacional de Aguas de Singapur (PUB) buscan disminuir los volúmenes de agua importada al país y aumentar la producción de agua reciclada. En la Figura 9 se pueden observar las proyecciones de la agencia.

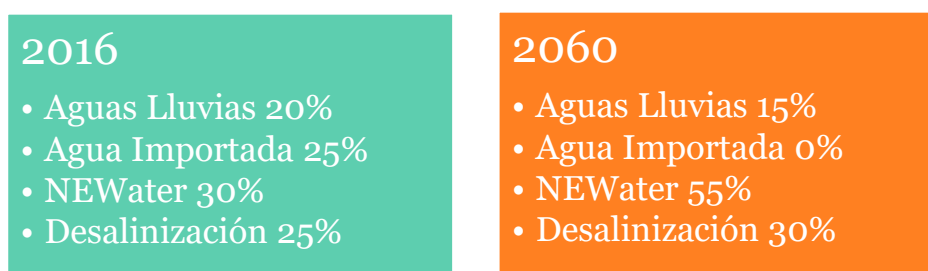


Figura 9: Proyección del suministro de agua en Singapur para el año 2060 [30].

La producción del agua reciclada, NEWater, se realiza a partir de la recolección de los flujos de agua provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, posteriormente es procesada una serie de etapas, que incluyen:

1. Microfiltración: En esta etapa el agua cruza membranas que filtran y retienen en su superficie sólidos suspendidos, partículas coloidales, bacterias, virus y protozoos. El agua de salida, filtrada, contiene sales disueltas y moléculas orgánicas[13].
2. Osmosis Inversa: Esta etapa emplea una membrana semi-permeable que permite sólo el paso de pequeñas moléculas, en particular las moléculas de agua. Otros elementos contaminantes, tales como bacterias, virus, metales pesados, nitratos, cloro, sulfatos, productos empleados para desinfección, hidrocarburos aromáticos, pesticidas, entre otros, no logran atravesar la membrana[13].



3. Desinfección UV: El agua que ingresa a la desinfección UV ya posee altos estándares de calidad, por lo que esta etapa sirve para asegurar la labor de la Osmosis Inversa. La desinfección UV se encarga de “desactivar” los organismos remanentes en el agua, y con ello garantizar la pureza del agua[13].
4. Almacenamiento y balance de pH: La última etapa consiste en la adición de químicos alcalinos que restauren el pH del agua para su consumo en los diferentes usos que NEWater puede tener[13].

En el Anexo C se puede observar el proceso completo realizado en Singapur para el reciclaje de su agua, y la producción de NEWater. Además, el Anexo D presenta la Tabla 19, donde se presentan las concentraciones de los elementos presentes en el agua reciclada producida.

El caso del reciclaje de aguas en Singapur representa una referencia para Chile debido a la integración que este proceso ha recibido por parte de la planificación a nivel país, acoplando la solución a la falta de recursos hídricos a la estructura de las redes de agua del país. Además, a lo mencionado se suman los esfuerzos realizados en materia de innovación tecnológica y políticas públicas enfocadas a que el nuevo recurso tenga una total aprobación por parte de una población dispuesta a beber el agua reciclada.

### 3 PROPUESTA PARA SISTEMA DE RECICLAJE DE AGUAS

A partir de los antecedentes expuestos en la sección anterior se buscan relaciones entre los contextos donde se han implementado sistemas de múltiples etapas para el reciclaje de aguas y el caso en estudio, como referencias que permitan sostener la propuesta de un proceso de reciclaje de aguas en Rancagua.

Las características a comparar son:

- Población beneficiada con el proyecto.
- Características climáticas.
- Disponibilidad de los recursos hídricos.
- Uso del agua reciclada.

En la Tabla 2 se comparan características mencionadas anteriormente.

Tabla 2: Comparación de casos en estudio

Indicador	Namibia	Australia	Singapur	Rancagua
<b>Volumen de población beneficiada</b>	325.000 habitantes	4,5 millones <sup>2</sup>	5,5 millones de habitantes	300.000 habitantes
<b>Características climáticas</b>	Clima desértico	Mediterráneo	Tropical	Templado, con cuatro estaciones
<b>Disponibilidad y acceso al agua</b>	Recurso limitado, largos periodos de sequía, dependencia de reservorios naturales	Recurso limitado, largos periodos de sequía, dependencia de reservorios naturales	Recurso limitado, depende de importaciones y reservas naturales	Recursos hídricos naturales, río Cachapoal
<b>Uso del agua reciclada</b>	Uso directo e indirecto, descarga en sistema de agua potable	Uso indirecto, redes de agua potable y agua reciclada separadas	Uso directo e indirecto, redes separadas de agua reciclada	Riego, uso recreacional y agua potable

Los casos presentados muestran grandes diferencias con el contexto donde se desea implementar el sistema de reciclaje de aguas, sin embargo, analizando la situación que vive Chile hoy en día, y las proyecciones sobre la disponibilidad y acceso a los recursos hídricos en el futuro, este escenario posee grandes semejanzas con los casos estudiados:

- Desde la VII Región de Chile al norte del país, la condición de estrés hídrico es un problema latente, presentando zonas áridas y con baja disponibilidad de agua. La Figura 10 muestra las proyecciones realizadas por el *World Resources Institute* sobre el estrés hídrico en el mundo, para el año 2030.

---

<sup>2</sup> Se considera la población de la ciudad de Sídney [36]

- La población en el territorio chileno sigue creciendo año a año, elevando la demanda del recurso hídrico, situación similar a lo que ha ocurrido en los ejemplos internacionales presentados.

## AQUEDUCT

Thursday, December 1, 2016

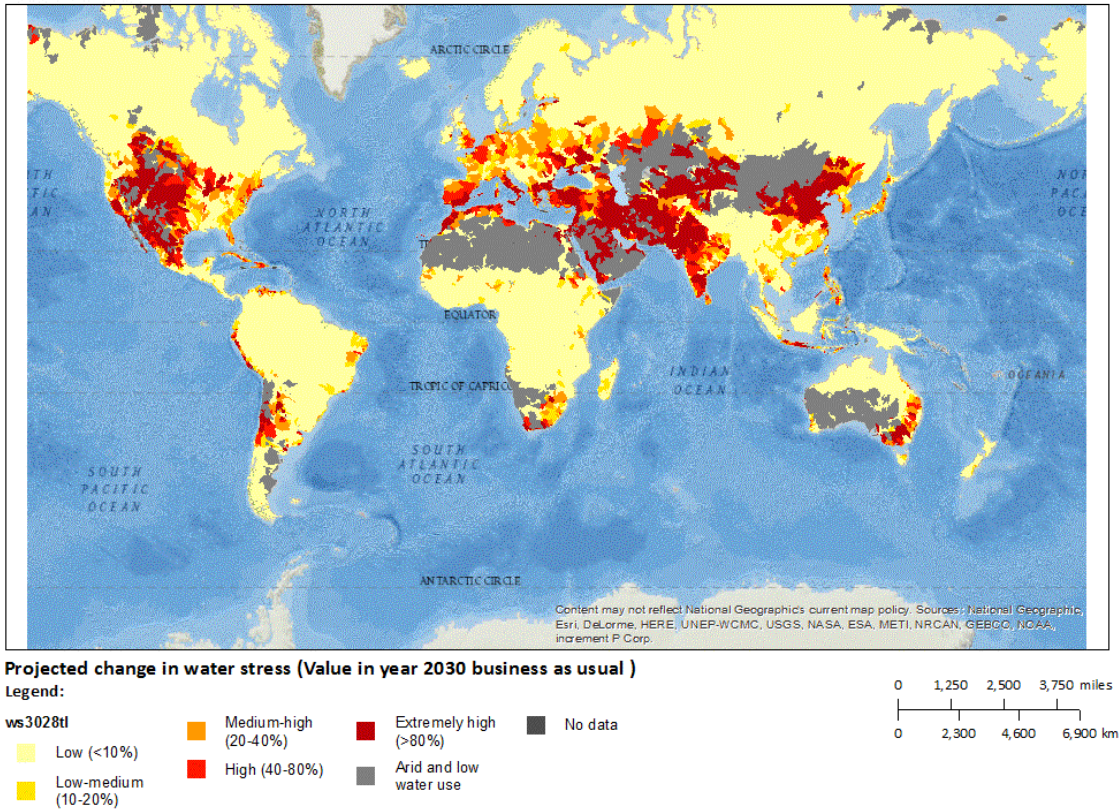


Figura 10: Situación de estrés hídrico en el mundo, año 2030 [2].

Estos antecedentes muestran la necesidad de que en el país se implementen proyectos encargados de enfrentar la situación hídrica global y favorecer la sostenibilidad del recurso.

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RECICLADA

La caracterización de las aguas recicladas a producir se realiza a través de una comparación entre los parámetros de calidad que deben tener los efluentes provenientes de PTAS, el agua de riego y recreación con contacto directo normada por la NCh n°1333[32] y los requisitos de calidad para agua potable, normados por la NCh n°409 [33]. Además, se complementa la información relacionada con los requisitos para el agua potable con los parámetros establecidos con la Organización Mundial de Salud (WHO)[34].

De esta forma, los parámetros expuestos en la Tabla 3 permiten establecer los límites de las sustancias presentes en el agua reciclada a lo largo de su proceso productivo. Además, la última

columna de la tabla presentada propone los límites máximos a los que aspira el proceso de reciclaje, con el objetivo de poder producir agua potable.

Tabla 3: Límites máximos permitidos de contaminantes y otros elementos en aguas.

Elemento	Unidad	Límites máximos permitidos para:					Agua reciclada (este trabajo)
		DS 90 [20] <sup>3</sup>	NCh 1333: Regadío [32]	NCh 1333: Contacto directo [32]	NCh 409: Agua Potable [33]	WHO 2011 (4ta edición) [34]	
<b>Aceites y Grasas</b>	mg/L	20		10			-
<b>Aluminio</b>	mg/L	5	5			-	-
<b>Arsénico</b>	mg/L	0,5	0,1		0,01	0,01	<b>0,01</b>
<b>Boro</b>	mg/L	0,75	0,75			2,4	<b>0,75</b>
<b>Cadmio</b>	mg/L	0,01	0,01		0,01	0,003	<b>0,003</b>
<b>Cianuro</b>	mg/L	0,2	0,2		0,05		<b>0,05</b>
<b>Cloruros</b>	mg/L	400	200		400		<b>400</b>
<b>Cobre Total</b>	mg/L	2	0,2		2	2	<b>2</b>
<b>Coliformes Fecales</b>	NMP/100 ml	1000	≤1000	1000	-	<1	-
<b>Cromo Hexavalente</b>	mg/L	0,05			0,05		<b>0,05</b>
<b>DBO5</b>	mg O2/L	35					-
<b>Fluoruro</b>	mg/L	1,5	1		2	1,5	<b>1,5</b>
<b>Fósforo</b>	mg/L	10					-
<b>Hidrocarburos Fijos</b>	mg/L	10					-
<b>Hierro Disuelto</b>	mg/L	5	5		0,3		<b>0,3</b>
<b>Índice de Fenol</b>	mg/L	0,5			0,002		<b>0,002</b>
<b>Manganeso</b>	mg/L	0,3	0,2		0,1		<b>0,1</b>
<b>Mercurio</b>	mg/L	0,001	0,001		0,001		<b>0,001</b>
<b>Molibdeno</b>	mg/L	1	0,01				-
<b>Níquel</b>	mg/L	0,2	0,2			0,07	<b>0,07</b>
<b>Nitrógeno Total Kjeldahl</b>	mg/L	50					-
<b>Pentaclorofenol</b>	mg/L	0,009					-
<b>PH</b>	Unidad	6,0-8,5		6,5 - 8,3	6,5-8,5	6,5-9,5	<b>6,5-8,5</b>
<b>Plomo</b>	mg/L	0,05	5		0,05	0,01	<b>0,01</b>
<b>Poder Espumógeno</b>	mm	7					-
<b>Selenio</b>	mg/L	0,01	0,02			0,04	<b>0,01</b>
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	mg/L	80					-

<sup>3</sup> En el Anexo E se adjunta la Tabla 20 con el detalle de los límites máximos permitidos en las descargas de efluentes a cuerpos de agua superficiales.

<b>Sulfatos</b>	mg/L	1000	250		500		<b>500</b>
<b>Sulfuros</b>	mg/L	1					
<b>Temperatura</b>	C°	35		30			
<b>Tetracloroetano</b>	mg/L	0,04			0,04	0,04	<b>0,04</b>
<b>Tolueno</b>	mg/L	0,7			0,7	0,7	<b>0,7</b>
<b>Triclorometano</b>	mg/L	0,2					<b>0,2</b>
<b>Xileno</b>	mg/L	0,5			0,5		<b>0,5</b>
<b>Zinc</b>	mg/L	3	2		3		<b>3</b>
<b>Sólidos disueltos totales</b>	mg/L		500		1500		<b>500</b>
<b>Cloro Residual</b>	mg/L				0,2		<b>0,2</b>
<b>Color</b>				Ausencia de colorantes artificiales	-	-	<b>-</b>
<b>Olor</b>				-	-	-	<b>-</b>
<b>Turbiedad</b>	NTU				2	5	<b>2</b>

### 3.2 CONFIGURACIÓN DEL PROCESO DE RECICLAJE DE AGUAS

A partir de las diferentes tecnologías disponibles para el tratamiento avanzado de aguas, presentadas en la Figura 6, se seleccionan aquellas que han demostrado mayor adaptación en los diferentes casos estudiados en este trabajo. De esta manera, la configuración del proceso de reciclaje de aguas propuesto se construye a partir de la comparación de las tecnologías empleadas en los procesos existentes, tomando en cuenta los estándares de calidad del agua de entrada, correspondientes a los establecidos por el DS n°90, donde se establecen los límites máximos para las descargas de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas a cuerpos de aguas superficiales [20], para ser comparados con las características de las aguas de entrada de los ejemplos internacionales presentados en la sección 2.2. Cabe destacar que esta configuración toma el caso genérico de calidad de los efluentes, por lo que para casos particulares deberán considerarse análisis de calidad de agua para una evaluación técnica acabada.

En el Anexo F se presenta una tabla comparativa de los parámetros de calidad para efluentes de PTAS para los casos de Chile, Singapur y Namibia. De esta comparación se establecen las etapas del proceso que permiten la reducción de los contaminantes críticos para obtener el producto deseado, estableciéndose que la calidad del agua reciclada permita a este nuevo suministro ser utilizada y considerada como agua potable. Estudios posteriores podrían permitir determinar en mayor detalle, las condiciones y etapas donde sería posible obtener agua destinada a otros usos; como el regadío, recreacional, etc.

### **3.2.1 Determinación del proceso**

A partir de la información presentada acerca de la calidad del agua y la descripción de los procesos implementados en Singapur, Namibia y Australia se establece que los parámetros críticos a reducir y eliminar desde las aguas de ingreso al proceso de reciclaje a implementar, corresponden a:

- Demanda biológica de oxígeno
- Sólidos disueltos totales
- Sólidos suspendidos totales
- Concentraciones de metales pesados
- Coliformes fecales y elementos patógenos

Para la reducción de la DBO<sub>5</sub>, se utilizan tecnologías encargadas de eliminar los compuestos orgánicos, correlacionados con este parámetro, presentes en el agua responsables de consumir el oxígeno disuelto. Estas tecnologías pueden ser la oxidación avanzada e incorporación de químicos que reaccionan con la materia orgánica, para luego ser removidos por separaciones mecánicas.

En cuanto a los sólidos suspendidos y disueltos, estos elementos pueden ser reducidos y eliminados gracias a la utilización de membranas filtrantes, las cuales dependiendo de la apertura de sus poros establecerán el tamaño de las partículas retenidas.

Respecto a los metales presentes en el agua, su concentración puede ser modificada mediante reacciones de oxidación y posteriormente ser separados mediante filtros de membrana.

Finalmente, los elementos patógenos, virus, bacterias, coliformes fecales u otros que pueden estar presentes en los flujos de agua son eliminados en diversas etapas. Tales orgánicos, pueden reaccionar en los procesos de oxidación, ser removidos por las membranas filtrantes y la osmosis inversa, para ser eliminados definitivamente en etapas de desinfección, evitando de esta forma surgimiento de nuevos microorganismos aguas abajo del proceso. Estas acciones permitirían obtener las condiciones necesarias para que, junto con una operación responsable, se garantice la seguridad para la salud de los consumidores.

### **3.2.2 Diagrama de bloques del proceso**

La construcción del diagrama de bloques del proceso se lleva a cabo utilizando como referencia los pasos descritos en la Figura 6: remoción de sólidos disueltos, remoción de químicos disueltos y finalmente, desinfección.

Dado que los efluentes de la PTAS han recibido tratamiento para eliminar sólidos suspendidos y materia orgánica (Figura 3), el proceso de reciclaje se centra en operaciones específicas para la reducción de los orgánicos que permanecen presentes, además de sólidos y químicos disueltos.

El proceso comienza con el almacenamiento del agua que ingresa al proceso, con el objetivo de mantener un flujo constante y homogéneo, que asegure la correcta operación del proceso. La

siguiente etapa corresponde a una oxidación de los compuestos orgánicos presentes en el flujo de alimentación. Posteriormente, se propone una etapa de ultrafiltración para la reducción de los sólidos suspendidos y compuestos producidos en la oxidación, además de permitir el pretratamiento del agua para su paso por las membranas de osmosis inversa. Es importante destacar que el orden de las etapas mencionadas también posee efectos sobre la operación de los equipos: la oxidación de los compuestos orgánicos, previa a la ultrafiltración, evita la formación de películas o films biológicamente activas sobre las membranas, efecto que podría disminuir su vida útil y además la eficiencia de separación de los equipos.

Continuando con el proceso de reciclaje de aguas, la etapa de osmosis se encarga de reducir en mayor porcentaje todas aquellas partículas indeseadas (químicos disueltos, sales, metales pesados). Finalmente se agrega una etapa de cloración que asegure la inactivación de sustancias orgánicas (microorganismos) que todavía puedan estar presentes en el agua, a pesar de haber pasado las etapas previas, y que asegure las concentraciones de cloro residual exigidas por la autoridad sanitaria [33].

A continuación, la Figura 11 presenta el diagrama de bloques del proceso de reciclaje de aguas propuesto para el tratamiento de las aguas provenientes de la PTAS de Rancagua.



Figura 11: Diagrama de bloques propuesto para el reciclaje de aguas

### 3.2.3 Descripción de las etapas del proceso

En esta sección se explicará con mayor detalle las funciones de cada una de las etapas del proceso de reciclaje de aguas.

### a. Oxidación Avanzada y Desinfección UV

Esta tecnología consiste en el uso de un agente oxidante, tales como: ozono ( $O_3$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), catalizadores y otros, donde a través de procesos fisicoquímicos se realiza la remoción específica de compuestos orgánicos que permanecen en los efluentes de aguas residuales tratadas. El proceso de oxidación ocurre en fase líquida y es un sistema continuo, donde se mezcla el agua residual con los agentes oxidantes, estos agentes promueven la generación *in situ* de radicales hidroxilos ( $OH\cdot$ ), fuerte oxidante, que es capaz de degradar y remover los elementos contaminantes como: Índice de Fenol, color, Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX), compuestos orgánicos persistentes, Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y precursores de Trihalometanos (THM)[35]. La Figura 12 muestra un ejemplo de la acción de la Oxidación Avanzada sobre un compuesto orgánico.

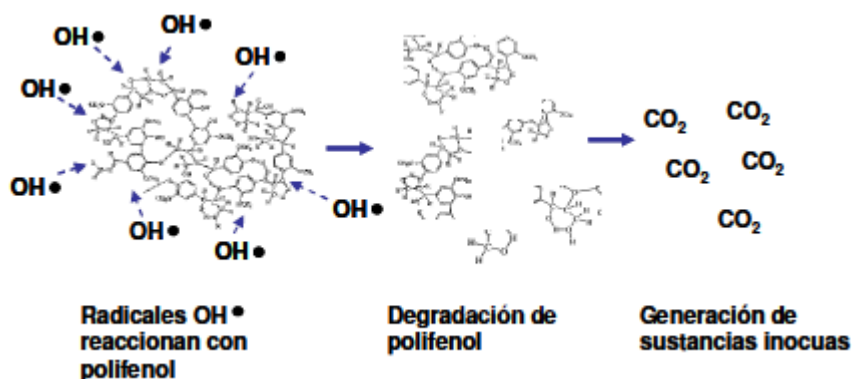


Figura 12: Ejemplo Oxidación Avanzada en fenoles[35].

La oxidación avanzada, mediante el empleo de  $H_2O_2$  posee múltiples ventajas sobre la utilización de otros agentes. Entre ellas se puede nombrar su capacidad para ser usado en un amplio rango de temperaturas y pH, alta selectividad de oxidación para contaminantes del agua y buena solubilidad en soluciones acuosas [36]. Además, el uso de este tipo de reacciones reduce el uso de cloro y otro tipo de químicos empleados para la eliminación de compuestos orgánicos en agua, minimizando el impacto ambiental ligado a su uso, y la generación de productos peligrosos para la salud de los consumidores.

Para aumentar la efectividad de la reacción de oxidación se utilizan lámparas de radiación UV, debido a su efecto fotocatalítico sobre los componentes orgánicos, siendo transformados en compuestos inofensivos.

La desinfección mediante luz ultravioleta (Desinfección UV) transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio a los contaminantes biológicos presentes en el agua. La radiación UV penetra las paredes celulares de los organismos, llegando a dañar su material genético (ADN o ARN), lo que impide la reproducción celular del mismo. La inactivación de microorganismos no tiene otros efectos en las aguas a tratar[37].

Los sistemas de radiación UV se pueden clasificar en diferentes tipos:



1. Tipo reactor UV
2. Tipo lámparas UV

En la Figura 13 se puede observar el funcionamiento de un sistema de desinfección mediante radiación UV.



Figura 13: Esquema desinfección por radiación UV[37]

## b. Ultrafiltración

La ultrafiltración(UF) corresponde a un proceso de separación entre sólidos y líquidos, donde sólidos suspendidos y macromoléculas son retenidos mediante la utilización de membranas y diferencia de presiones, para ser separados de un líquido. La filtración con este tipo de membrana depende directamente del tamaño de los poros del medio filtrante, característica que variará según el material y su fabricación, así como la aplicación donde se emplee la membrana [38]. Para el caso particular del proceso propuesto en este trabajo, la ultrafiltración es un proceso de gran importancia para el pretratamiento del agua que posteriormente ingresará a los sistemas de osmosis inversa, ya que al utilizar membranas entre 0.1 y 0.001  $\mu\text{m}$  de diámetro, se asegura la separación de partículas que saturarían las membranas de osmosis inversa, etapa siguiente del proceso.

El tratamiento realizado por la ultrafiltración no es capaz de eliminar iones polivalentes, sales o solutos de bajo peso molecular, por lo que es empleada como pretratamiento, ya que contribuye a prolongar la vida útil de las membranas posteriores y de diámetro de poros menores. Además, reduce la turbiedad y presencia de coloides, así como también los elementos carbonatados y bacterias.

La Figura 14 muestra un diagrama del funcionamiento de las membranas de Ultrafiltración. Además, en el Anexo G se adjunta un diagrama con los tamaños de partículas que son separados por las membranas de ultrafiltración.

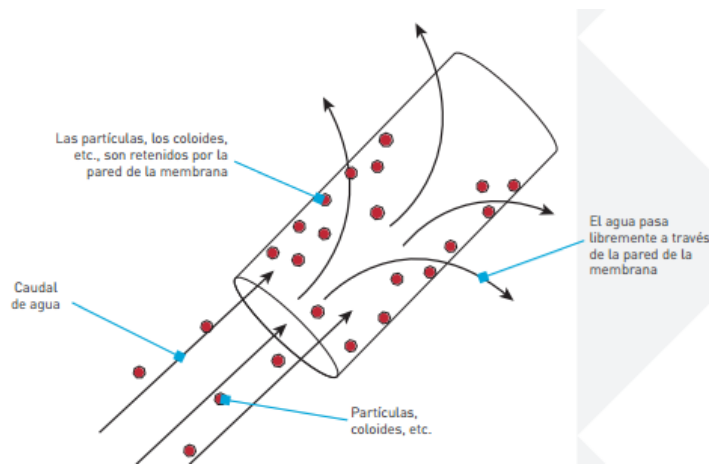


Figura 14: Diagrama del sistema de Ultrafiltración[38].

Existen diversos tipos de membranas que se pueden usar en un sistema de ultrafiltración: orgánicas como membranas de polisulfona, fluoruro de polivilideno, poliamida con configuraciones en fibra capilar, plana, espiral, tubular o fibra hueca. También inorgánicas con base de óxido de zirconio, aunque estas últimas son de uso en aguas industriales.

### c. Osmosis Inversa

Se habla de osmosis natural cuando ponemos en contacto, a través de una membrana, agua salada y agua destilada, un tiempo después se obtendrá un equilibrio entre un líquido y otro. El agua que atraviesa la membrana es empujada por la presión osmótica de la solución más salada y el equilibrio del proceso se alcanza cuando la presión hidrostática del agua destilada iguala a la presión osmótica. Ahora bien, la osmosis inversa (OI) es el fenómeno reversible de osmosis natural y representa el nivel uno de los niveles de filtración más finos, capaz de rechazar partículas de hasta 0.0001 mm, mediante una membrana semipermeable, por un proceso de difusión controlada [39]. En la Figura 15 se muestra un esquema del proceso de OI.

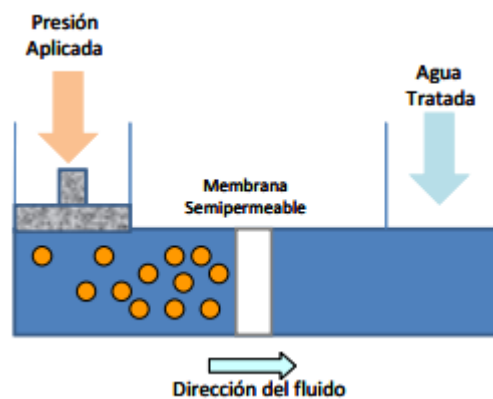


Figura 15: Esquema representativo del proceso de Osmosis Inversa[40].

De esta forma, la OI reduce la concentración de sales como fosfato, nitrato, sulfato e iones metálicos, bromo, mercurio, patógenos, turbiedad, DBO<sub>5</sub>, compuestos orgánicos, índice de fenol, Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX), Trihalometanos (THM), color, pesticidas, entre otros. También se reduce indirectamente la concentración de aceites y grasas, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables, y Poder Espumógeno[40].

#### **d. Cloración**

El proceso de cloración consiste en la adición de productos clorados en el agua, para la eliminación de microorganismos remanentes en ella que hayan sobrevivido a las etapas de tratamiento anteriores. En este proceso se fija un tiempo de reacción del cloro sobre los compuestos orgánicos, de tal forma que su eficacia sobre los contaminantes. Además, gracias al exceso de cloro en su dosificación, se forman subproductos que permiten que su efecto desinfectante se mantenga en el tiempo (cloro residual) [41].

El tratamiento del agua por cloración permite eliminar de forma sencilla y poco costosa la mayor parte de bacterias, virus y otros microorganismos responsables de enfermedades como la disentería, las fiebres tifoideas y el cólera. Sin embargo, es incapaz de destruir ciertos microorganismos parásitos patógenos. La cloración, por lo tanto, desinfecta el agua, pero no la purifica por completo, lo que justifica su acople a otros mecanismos de tratamiento.

Como se mencionó anteriormente, el reciclaje de aguas permite obtener agua con diferentes estándares de calidad, dependiendo del tipo de uso donde será destinada. Para el caso de aguas destinadas a regadío, etapas de desinfección pueden ser omitidas dependiendo de las normativas sanitarias que rijan su uso. Sin embargo, otros usos, tales como el uso recreacional o de contacto directo, requieren aguas desinfectadas debido a que el usuario mantiene contacto directo, a través de su piel u otros órganos, con el agua reciclada.

## 4 EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA

El siguiente capítulo presenta las evaluaciones técnica, económica y ambiental del proyecto. La construcción de la evaluación técnica se realiza a partir de la definición del caso base en estudio. Posteriormente, tanto la evaluación económica como ambiental, indagarán en aquellos aspectos que podrían generar mayor interés, tales como el consumo energético, ahorro de agua, costos de capital, entre otros.

### 4.1 EVALUACIÓN TÉCNICA

En esta sección se presenta la evaluación técnica del proceso de reciclaje de aguas provenientes de la planta de tratamiento de aguas servidas de la localidad de Rancagua.

Para comenzar la evaluación se define el límite de batería del proyecto. Este abarca desde la recepción de los efluentes de la PTAS que ingresan al proceso de reciclaje para finalizar con la distribución de los flujos de agua reciclada desde tres puntos del proceso, para ser utilizadas en regadío, uso recreacional y agua potable. La Figura 16 muestra un esquema global de los procesos involucrados, encerrando en línea punteada las etapas que abarca el proyecto.

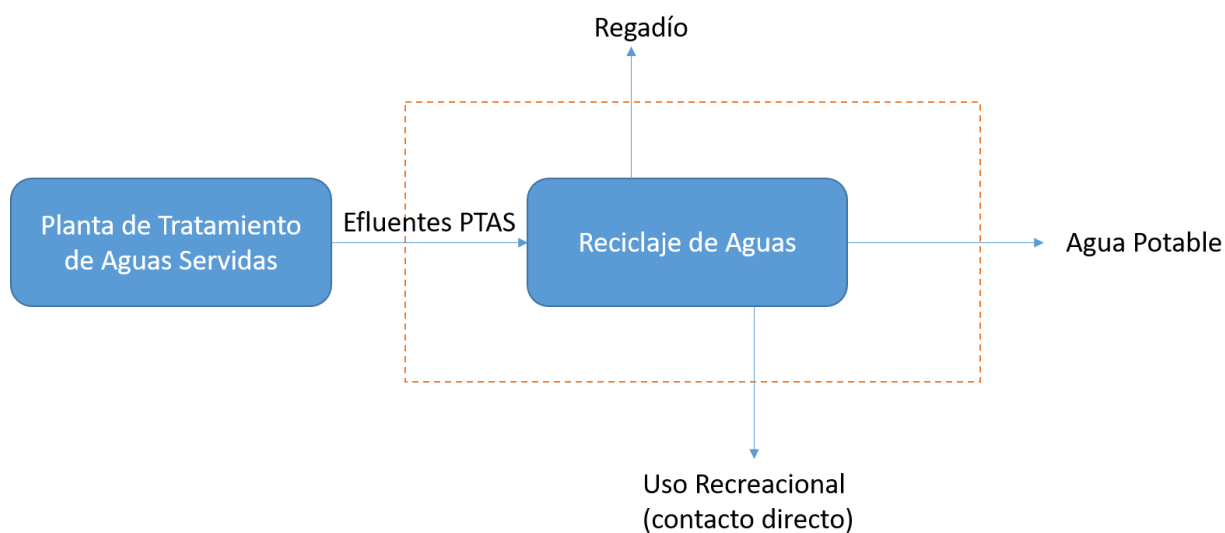


Figura 16: Límite de batería del proyecto

El agua utilizada para regadío no requiere de tratamientos intensivos en la eliminación de partículas, permitiendo la extracción de flujos del proceso en etapas previas a la OI o la cloración. En el caso del agua para uso recreacional, esta no debe contener concentraciones de compuestos orgánicos que pongan en riesgo la salud de quien entre en contacto directo con ella (esta agua no es apta para su consumo como agua potable).

El producto final del proceso correspondería a agua reciclada con calidad de agua potable (concentraciones de elementos dentro de los límites establecidos en la NCh°409). Este flujo de agua sería inyectado a la red de distribución de agua potable y no a la fuente de agua cruda (Río Cachapoal, en este caso) o la planta de producción de agua potable, por lo que el proyecto tampoco

incluye una distribución total del suministro, sino solamente su transporte hasta el punto de inyección.

#### 4.1.1 Balance de masa del proceso

A continuación, se presenta el balance de masa del proceso. Los datos presentados son obtenidos a partir del escenario donde es reciclado el 100% de los efluentes provenientes de la PTAS de la ciudad de Rancagua. El flujo de entrada al proceso de reciclaje de agua corresponde a 392,65 l/s [42].

##### 4.1.1.1 Balance de masa global

La Figura 17 muestra el diagrama de bloques del proceso. En él, se identifican los flujos de entrada y salida de cada una de sus etapas.

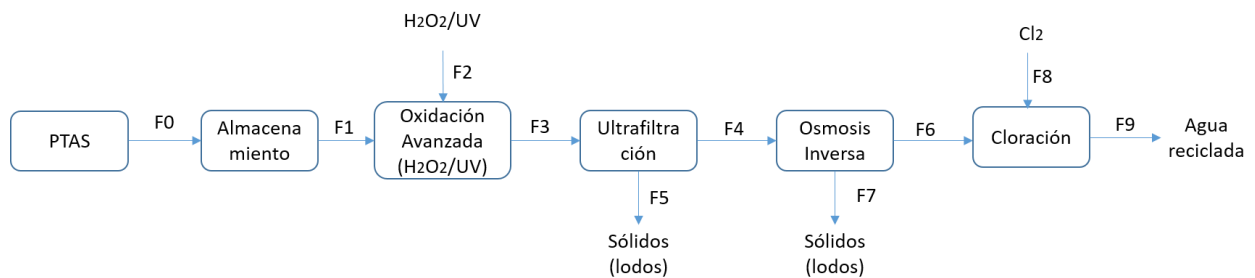


Figura 17: Diagrama de bloques del proceso

Las especies que transporta cada uno de los flujos del proceso se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Especies en los flujos del proceso

Flujo	Especies
F0	Agua PTAS
F1	Agua PTAS
F2	Peróxido de Hidrógeno
F3	Agua tratamiento 1
F4	Agua tratamiento 2
F5	Lodos tratamiento 1
F6	Agua tratamiento 3
F7	Lodos tratamiento 2
F8	Cloro (g)
F9	Agua reciclada

En la Tabla 5 se presenta el balance de masa global del proceso, donde se obtiene un flujo de 234,92 kg/s de agua reciclada.

Tabla 5: Balance de masa global del proceso.

<b>Entradas</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salidas</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
F0	392,65	kg/s	F5	1,12	kg/s
F2	$7,853 \cdot 10^{-3}$	kg/s	F7	156,61	kg/s
F8	$4,69 \cdot 10^{-4}$	kg/s	F9	234,92	kg/s
	<b>392,66</b>	<b>kg/s</b>		<b>392,66</b>	<b>kg/s</b>

En el Anexo H se muestran los cálculos realizados para la obtención del balance de masa global del proceso y cada una de sus etapas. Además, en el Anexo H.5 se adjunta la tabla con los balances por especie.

#### 4.1.2 Dimensionamientos

En la siguiente sección se detallan las características principales de operación de cada una de las etapas del proceso que permiten calcular las dimensiones principales de los equipos que forman parte de ellas. Los resultados obtenidos permiten individualizar las operaciones, para realizar posteriormente una evaluación económica de la inversión del proceso.

##### 4.1.2.1 Almacenamiento de agua

La primera etapa del proceso de reciclaje de aguas considera la acumulación del agua proveniente de la PTAS en un estanque de almacenamiento. El objetivo de esta etapa es mantener un flujo de agua constante y homogéneo a lo largo del proceso, que garantice una operación sin interrupciones. Además, se diseña un estanque capaz de mantener la alimentación de agua al proceso por un periodo de 12 horas ante detenciones forzosas de la planta.

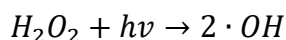
El volumen del estanque de almacenamiento es calculado mediante la Ecuación Ec. 1:

$$V = Q_{F0} * 43200 \frac{s}{día} * 1 \text{ día} * 1,2 = 20.355 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 1}$$

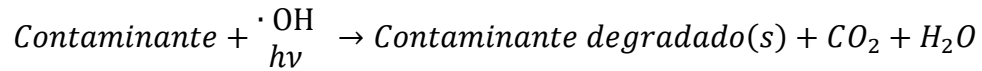
##### 4.1.2.2 Oxidación Avanzada

La etapa de oxidación avanzada que se propone consiste en la adición de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) al flujo de agua a tratar. Dentro del reactor se deberán ubicar lámparas UV, cuya radiación actúa como fotocatalizador para las reacciones de oxidación avanzada de los compuestos orgánicos presentes en el agua. De esta forma, las reacciones principales que se desarrollan en esta etapa se representan por las siguientes ecuaciones [36]:

1. Fotólisis del peróxido de hidrógeno en radicales hidroxilos.



2. Conversión de contaminantes producto de la absorción de radiación UV o reacción con radicales ( $\cdot OH$ )



Donde  $h\nu$  corresponde a la energía emitida por las lámparas, con  $h$  equivalente a la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia de la radiación.

Los contaminantes degradados serán removidos en etapas posteriores del proceso.

#### 4.1.2.2.1 Dimensionamiento del reactor de oxidación avanzada

El equipo donde se lleva a cabo la oxidación avanzada se dimensiona como un reactor de tipo flujo pistón debido a que su forma y operación favorecen el contacto entre el fluido y los fotones emitidos por las lámparas UV. La Figura 18 muestra un diagrama del reactor.

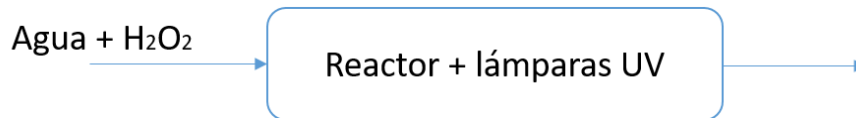
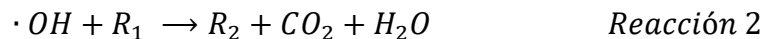
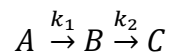


Figura 18: Diagrama reactor de oxidación avanzada

Dadas las múltiples reacciones que ocurren en la oxidación [43], se simplifica el sistema en sus dos reacciones principales para el dimensionamiento. Las reacciones son:



De esta manera, se dimensiona un reactor flujo pistón para el estado estacionario del sistema, con reacciones en serie de la forma:



Donde

$$A = \text{H}_2\text{O}_2$$

$$B = \cdot\text{OH}$$

$$C = \text{R}_2$$

Para obtener la ecuación de diseño del reactor, se realiza el balance de masa para el compuesto  $A$  en un diferencial de volumen. La Figura 19 se muestra el balance de masa del reactor, para una unidad diferencial de su volumen ( $dV$ ):

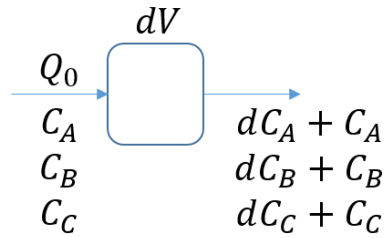


Figura 19: Balance de masa diferencial en reactor flujo pistón

Entonces, se tiene:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación}$$

$$0 = Q_0 C_A - Q_0 (C_A + dC_A) + r_A dV$$

$$0 = -Q_0 dC_A + r_A dV$$

$$dC_A = r_A d\left(\frac{V}{Q_0}\right) = r_A d\tau = -k_1 C_A d\tau$$

$$\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = -k_1 \int_0^\tau d\tau$$

Así, el balance de masa de A en el reactor da como resultado:

$$C_A = C_{A0} \exp(-k_1 * \tau) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$$\tau = \frac{V}{Q_0} \quad \text{Ec. 3}$$

representa el tiempo de residencia del reactor.

De la misma forma, se repite el procedimiento para los balances de masa de B y C. Reemplazando la concentración de A, se obtiene:

$$C_B = C_{A0} \left(\frac{k_1}{k_2 - k_1}\right) [\exp(-k_1 \tau) - \exp(-k_2 \tau)] \quad \text{Ec. 4}$$

$$C_C = C_{A0} \left\{ 1 - \exp(-k_1 \tau) - \left(\frac{k_1}{k_2 - k_1}\right) [\exp(-k_1 \tau) - \exp(-k_2 \tau)] \right\} \quad \text{Ec. 5}$$

Los parámetros utilizados para obtener el volumen del reactor son:



Tabla 6: Parámetros para diseño de reactor de oxidación avanzada

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Concentración inicial $H_2O_2$	20	$\frac{mg}{L}$	[44]
$k_1$	0,049	$min^{-1}$	[45]
$k_2$	0,32	$min^{-1}$	[44]
$Q_0$	392,65	$\frac{L}{s}$	[42]

A partir de la Ecuación 5 se despeja el tiempo de residencia en el reactor, obteniendo:

$$\tau = 17,62 \text{ minutos}$$

Desde la Ecuación 3 se despeja el volumen del reactor:

$$\tau = \frac{V}{Q_0} \Rightarrow V = \tau * Q_0 = 17,62 \text{ min} * 0,39265 \frac{m^3}{s} * 60 \frac{s}{min}$$

$$V = 415,11 m^3$$

Ec. 6

Finalmente, el volumen de reactor obtenido se amplifica en un factor de 1,2 para dar márgenes de seguridad al diseño del equipo, resultando un reactor de volumen igual a  $498 m^3$ .

#### 4.1.2.3 Ultrafiltración

Las unidades donde se llevará a cabo la operación de ultrafiltración se dimensionan mediante la elección del tipo de membrana a utilizar.

Para esta etapa se decide trabajar con membranas de tipo orgánica con configuración de fibra hueca debido a su operación y la facilidad para el lavado de los módulos [46].

Las membranas elegidas pertenecen a la empresa *DOW Chemicals* y son fabricadas en fluoruro de polivinilideno hidrofílico (H-PVDF) de doble pared, este material permite reducir los índices de ensuciamiento por materiales orgánicos, y provee una gran resistencia mecánica, térmica y química [47].

Las fibras huecas tienen un diámetro interior de 0,70 mm y exterior de 1,30 mm y se disponen en haces de fibras colocados en el interior de cilindros de U-PVC en vertical, obteniendo un módulo compacto. En el caso del modelo SFX-2860 se obtiene una superficie filtrante de  $51 m^2$  con un volumen de 35 litros y un peso de 48 kg.

Las membranas funcionan con un flujo radial, de fuera hacia dentro: el agua filtrada se recoge en el interior de las fibras y las partículas quedan retenidas en el exterior. Este sistema se utiliza para evitar la obstrucción de las fibras por los contaminantes presentes en el agua de

alimentación, y permite una mayor carga contaminante que los sistemas que funcionan de dentro hacia fuera.

El módulo de ultrafiltración SFX-2860 tiene que operar a una presión máxima de 3 bar, con una temperatura comprendida entre 1 y 40°C, en un rango de pH entre 2 y 11. En estas condiciones se puede trabajar con un flux comprendido entre 40 y 120 m<sup>2</sup>/h.

#### 4.1.2.3.1 Dimensionamiento unidades de ultrafiltración

Para el dimensionamiento se considera que la configuración de las membranas consiste en bastidores compuestos por 86 módulos de ultrafiltración cada uno.

Se calcula el flujo de filtrado que cruza el área superficial de las membranas, a partir del flux promedio de trabajo:

$$F_m = \frac{120 \frac{m^2}{h} + 40 \frac{m^2}{h}}{2} = 80 \frac{m^2}{h} \quad \text{Ec. 7}$$

Posteriormente se calcula el área total de filtrado necesaria, su cálculo se realiza a partir del flujo de agua a filtrar y el flujo de filtrado calculado anteriormente, tal como se muestra en la Ecuación 8:

$$Q_e = 392,7 \frac{l}{s} = 1413,7 \frac{m^3}{h}$$

$$\Rightarrow A_{ft} = \frac{Q_e}{F_m} = \frac{1413,7 \frac{m^3}{h}}{0,08 \frac{m}{h}} = 17671,1 m^2 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$Q_e$ : Flujo de agua a filtrar

$A_{ft}$ : Área filtrado total

Luego, se calcula el número de módulos de ultrafiltración que se deberán emplear, considerando que cada uno de ellos tiene un área de filtrado ( $A_{fm}$ ) de 51 m<sup>2</sup>, el número de módulos será:

$$N^{\circ} \text{módulos UF} = \frac{A_{ft}}{A_{fm}} = \frac{17671,1 m^2}{51 m^2} = 347 \text{módulos} \quad \text{Ec. 9}$$

Se utiliza el factor de seguridad 1,2 para sobreestimar el número de membranas y poseer instalaciones de respaldo en caso de mantención y otros imprevistos. El número total de membranas de ultrafiltración a utilizar será de 416.

Cómo se mencionó anteriormente, la configuración de las membranas es un arreglo de bastidores, de 86 módulos cada uno. El paso siguiente consiste en estimar el número de bastidores que deberá contemplar el proceso, su cálculo se muestra en la Ecuación 10:

$$N^{\circ} \text{ de bastidores} = \frac{N^{\circ} \text{ módulos UF}}{86} = \frac{416}{86} \approx 5 \text{ bastidores} \quad \text{Ec. 10}$$

De esta manera, el diseño del proceso deberá considerar 5 bastidores de membranas de ultrafiltración.

#### 4.1.2.4 Osmosis Inversa

Similar a la etapa de ultrafiltración, el dimensionamiento de las unidades de osmosis inversa se realiza a partir de la elección de las membranas apropiadas para el tipo de agua a tratar, considerando una evaluación técnica preliminar.

Se eligen las membranas de osmosis inversa modelo BW30HR-440 de la empresa *DOW Chemicals*. Este tipo de membranas son utilizadas para la producción de agua industrial desmineraliza, agua potable municipal y reutilización de agua [48]. Estas membranas poseen una configuración en forma espiral enrollado, permitiendo tener un área activa de 41 m<sup>2</sup>. En cuanto a su operación, el flujo promedio de permeado producido es de 48 m<sup>3</sup>/d, con un porcentaje de rechazo de sales del 99,4% y una presión máxima de operación de 83 bar [49].

##### 4.1.2.4.1 Dimensionamiento unidades de osmosis inversa

Se requiere conocer el número de membranas de deben ser utilizadas para la etapa de osmosis inversa. Este valor se obtiene a partir de la siguiente expresión [50]:

$$N = \frac{Q_p}{J * A_{act}} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$Q_p$ : Flujo de permeado que se desea obtener de la operación de las membranas  $\left[ \frac{m^3}{d} \right]$

$A_{act}$ : Área activa  $[m^2]$

$J$ : Flujo específico, se define como el flujo producido de agua desalada por unidad de superficie de membrana instalada y unidad de tiempo  $\left[ \frac{m^3}{m^2 * d} \right]$

El flujo de permeado que se obtiene con la osmosis inversa depende del porcentaje de recuperación del sistema. A escala industrial, este porcentaje se encuentra entre el 50 y 80%, y se refiere al flujo de permeado obtenido en relación al total del flujo de alimentación. La recuperación depende de las características del agua de alimentación, y de la operación de los equipos de osmosis inversa [51].

El porcentaje de recuperación para efectos de este trabajo es del 60%, evaluando de esta manera un escenario cercano al peor caso de recuperación (50%).

$$Q_p = Q_{oi} * rec\% = 33828,7 \left[ \frac{m^3}{d} \right] * 0.60 = 20297,2 \left[ \frac{m^3}{d} \right] \quad \text{Ec. 12}$$

Donde  $Q_{oi}$  corresponde al flujo de agua alimentado a la etapa.

A continuación, se calcula  $J$ , en base a las características de las membranas BW30HR-440:

$$J = \frac{Q_{per}}{A_{act}} = \frac{48}{41} \left[ \frac{m^3}{m^2 * d} \right] = 1,17 \left[ \frac{m^3}{m^2 * d} \right] \quad \text{Ec. 13}$$

Donde  $Q_{per}$  corresponde al flujo de permeado indicado por la ficha técnica de las membranas.

Así, el número de membranas será:

$$N = \frac{Q_p}{J * A_{act}} = \frac{20297,2 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}{1,17 \left[ \frac{m^3}{m^2 * d} \right] * 41[m^2]} \approx 423 \text{ membranas} \quad \text{Ec. 14}$$

Adicionalmente, para efectos de la correcta operación del proceso se estima el número total de membranas con un factor de seguridad de 1,2. Finalmente, el número de membranas de osmosis inversa a utilizar en el proceso será de 508 unidades, cada una con un área activa de 41 m<sup>2</sup>, como se mencionó anteriormente.

#### 4.1.2.5 Cloración

El sistema de cloración a utilizar en el proceso se dimensiona a partir de los requerimientos establecidos por la normativa nacional en lo que respecta a concentraciones mínimas de cloro libre residual en las redes de distribución de agua potable. Además, se considera que en esta etapa la calidad del agua producida debe corresponder a los establecido en la NCh n°409.

Se utiliza gas cloro ( $\text{Cl}_2$ ) como agente desinfectante, cuya concentración de entrada deberá ser de 2 mg/L considerando que la concentración de cloro libre residual que debe permanecer en la red de agua es de 0,2 mg/L[33].

A partir de bibliografía se estima el tiempo de contacto necesario entre el cloro y el agua en tratamiento, que permita obtener un porcentaje del 99% de inactivación y eliminación de agentes biológicos y compuestos orgánicos que puedan ser dañinos para la salud de las personas [41]. La Resolución 666 del Ministerio de Obras Públicas establece los tiempos mínimos de contacto para la obtención de agua potable, estos son:

Tabla 7:Tiempo de contacto mínimo para la desinfección de agua[52]

Fuente de agua	pH del agua	Tiempo mínimo de contacto [minutos]
Superficiales, drenes y norias	menor a 8	30
Superficiales, drenes y norias	igual o mayor a 8	45
Subterráneas tipo sondaje	menor a 8	20
Subterráneas tipo sondaje	igual o mayor a 8	30

#### 4.1.2.5.1 Dimensionamiento de reactor de cloración

Se establece para el dimensionamiento de los estanques de contacto, en adelante reactor de cloración, que el tiempo de contacto mínimo será de 45 minutos, considerando el escenario más desfavorable para la desinfección del agua (debido a las condiciones de pH y fuente de extracción). De esta forma, se calcula el volumen del reactor, donde:

$V$ : volumen del estanque [ $\text{m}^3$ ]

$Q$ : flujo de agua de alimentación [ $\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$ ]

$\theta$ : tiempo de contacto [ $\text{min}$ ]

Así, el volumen está dado por la expresión [53]:

$$V = Q * \theta$$

$$\Rightarrow V = 635 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 15}$$

Por lo que el reactor de cloración tendrá un volumen de 761  $\text{m}^3$ , considerando el factor de seguridad utilizado en los equipos anteriormente dimensionados.

#### 4.1.2.6 Estanques de almacenamiento

Además de los equipos principales que componen el proceso, se incluyen dos estanques de almacenamiento. Estos equipos serán utilizados para la acumulación de los flujos concentrados provenientes de la ultrafiltración y osmosis inversa.

#### 4.1.2.6.1 Dimensionamiento estanque n°1: Descarte ultrafiltración

El dimensionamiento del estanque se realiza a partir del flujo de agua con alta concentración de sólidos separados por la etapa de ultrafiltración, se considera un tiempo de residencia de los flujos entrantes al estanque de 12 horas, y el factor de seguridad de 1,2. Con estas consideraciones, el volumen del estanque de almacenamiento n°1 será:

$$V_{T1} = Q_{F3} * 43200 \frac{s}{día} * 1 \text{ día} * 1,2 = 58 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 16}$$

#### 4.1.2.6.2 Dimensionamiento estanque n°2: Descarte osmosis inversa

De la forma en que se calculan las dimensiones del estanque n°1, el estanque n°2 tendrá un volumen de:

$$V_{T2} = Q_{F5} * 43200 \frac{s}{día} * 1 \text{ día} * 1,2 = 8119 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 17}$$

#### 4.1.2.7 Resumen dimensionamientos

La Tabla 8 muestra un resumen de los dimensionamientos de las unidades principales del proceso propuesto.

Tabla 8: Resumen dimensionamientos

Etapa	Equipo	Dimensión característica	Valor	Unidad
Almacenamiento n°1	Estanque	Volumen	20.355	m <sup>3</sup>
Oxidación Avanzada	Reactor	Volumen	498	m <sup>3</sup>
Ultrafiltración	Filtro de membranas	Número de membranas	416	Unidad
Osmosis Inversa	Filtro de membranas	Número de membranas	507	Unidad
Cloración	Reactor	Volumen	761	m <sup>3</sup>
Almacenamiento n°2	Estanque	Volumen	58	m <sup>3</sup>
Almacenamiento n°3	Estanque	Volumen	8.119	m <sup>3</sup>

#### 4.1.2.8 Discusiones

El dimensionamiento del reactor de oxidación avanzada puede ser considerado como una aproximación de lo que el equipo real representaría espacialmente, esto debido a que para su cálculo se utilizan simplificaciones en su cinética de reacción que pueden condicionar el tiempo de residencia del fluido, generando una oxidación parcial de los compuestos orgánicos y no el ideal (98% de reducción). Otro elemento a considerar es el seguimiento de los elementos que se desean

oxidar dentro del equipo, para efecto de los cálculos sólo se considera la conversión de los sólidos totales disueltos debido a que son éstos los que presentan una mayor concentración dentro del flujo de agua a tratar.

Sobre las etapas de ultrafiltración y osmosis inversa, al tratarse de procesos de separación que emplean para su funcionamiento membranas sometidas a altas presiones de operación, durante la vida del proyecto deberán ser sometidas a una mantención constante, por lo que el sobredimensionamiento del número de módulos necesarios es de gran importancia para mantener el funcionamiento continuo de la planta.

En el caso del reactor de cloración cabe mencionar que los cálculos realizados buscan sobredimensionar el equipo que el proceso requeriría en la realidad, esto debido a los parámetros de calidad que presenta el agua al llegar a esta etapa del proceso. Desde la etapa de oxidación avanzada, muchos de los contaminantes (como virus, bacterias y otros agentes microbiológicos) comienzan a ser inactivados, posteriormente la ultrafiltración y osmosis inversa separan hasta un 90% de estas sustancias del agua, llegando hasta la cloración en concentraciones inferiores a los  $10^{-13}$  mg/L.

La incorporación de los estanques de almacenamiento n°2 y n°3 al dimensionamiento del proceso se decide como medida de seguridad para mantener la autonomía del suministro durante un periodo de 12 horas. La calidad del producto contenido en ambos estanques difiere, pero en ambos casos representan una fuente de agua constante; ya sea como agua de riego o uso recreacional, el agua reciclada proveniente del estanque n°2, o como una inyección a la red de agua potable, el agua proveniente del estanque n°3.

### **4.1.3 Flowsheet**

En el Anexo L a este trabajo, se adjunta el flowsheet del proceso realizado gracias a la utilización del software AutoCAD.

### **4.1.4 Balance de energía**

El balance de energía del proceso se presenta como el consumo energético de las etapas de oxidación avanzada, ultrafiltración y osmosis inversa. Estas operaciones necesitan de suministros externos de energía para su funcionamiento.

#### **4.1.4.1 Oxidación Avanzada**

En el caso de la oxidación avanzada, el consumo de energía es realizado por las lámparas para la emisión de radiación UV. Estos equipos poseen un consumo energético promedio de 22 W, además se considera que el sistema diseñado emplea una lámpara UV por metro cúbico de reactor[54], por lo que el arreglo final contempla 498 unidades de radiación. Dado lo anterior, el cálculo del consumo energético de la potencia requerida, queda expresado se la siguiente forma:

$$E_{OA} = 22 \text{ W} * 498 \text{ unidades} = 10,956 \text{ kW}$$

#### 4.1.4.2 Ultrafiltración y Osmosis Inversa

Para la etapa de ultrafiltración y osmosis inversa se utiliza como referencia la modelación del sistema realizada en el software *ROSA* de la empresa *DOW Chemicals*[55]. El programa permite obtener los parámetros de operación de la etapa, utilizando como elementos de entrada el flujo a tratar, el porcentaje de recuperación y el tipo de membrana a utilizar. En el caso particular de este trabajo, se estima la demanda energética de la etapa de ultrafiltración como proporción del consumo en la osmosis inversa, esto debido a sus principios de operación y las características de las membranas que componen cada una de ellas.

Los datos de entrada utilizados para la simulación de la etapa de osmosis inversa corresponden a los utilizados en el dimensionamiento:

Flujo de alimentación:  $Q_{in} = 0,3915 \text{ m}^3$

Porcentaje de recuperación:  $rec\% = 60\%$

Tipo de membrana: BW30-440i

De esta forma, la energía requerida para la operación de las membranas de osmosis es igual a  $1755,49 \frac{kWh}{m^3}$ . Multiplicando este resultado por el flujo de agua a tratar se obtiene:

$$E_{OI} = 1755,49 \frac{kWh}{m^3} * 0,3915 \frac{m^3}{s} = 2474414,2 \text{ kW}$$

Tal como se mencionó anteriormente, la demanda energética de la etapa de ultrafiltración se estima como el 50% del requerimiento de la  $E_{OI}$ , obteniendo:

$$E_{UF} = 2474414,2 \text{ kW} * 0,5 = 1237207,1 \text{ kW}$$

En el Anexo I se adjuntan los resultados de la simulación realizada.

#### 4.1.4.3 Resumen balance de energía

En la Tabla 9 se resumen los resultados de las demandas energéticas de las etapas anteriormente señaladas.

Tabla 9: Resumen balance de energía

<b>Etapa</b>	<b>Demanda energética</b>	<b>Unidad</b>
Oxidación Avanzada	10,956	<i>kW</i>
Ultrafiltración	1237207,1	<i>kW</i>
Osmosis Inversa	2474414,2	<i>kW</i>



#### ***4.1.4.4 Discusiones***

La demanda energética del sistema de lámparas UV puede modificarse en función de la configuración de ellas dentro de los reactores de oxidación. En la industria se ofrecen equipos que incorporan arreglos con múltiples lámparas y sistemas de dosificación de peróxido de hidrógeno, que pueden mejorar la performance de la etapa y la eficiencia de las reacciones involucradas.

Respecto a las etapas de filtración mediante membranas, la simulación realizada a través del software de la empresa proveedora de las membranas propone un escenario idealizado de la operación de sus equipos, por lo que el consumo de energía puede ser subestimado. Además, en esta simulación no se consideran todos los contaminantes que se encuentran presentes en el tipo de agua que se está tratando, lo que también podría generar diferencias con la operación real de las etapas.

Otro aspecto a considerar en el balance de energía, es la omisión de los equipos de bombeo cuya potencia ampliaría el consumo energético del proceso. Queda pendiente, para posteriores etapas de este estudio, la inclusión de los equipos necesarios para el transporte de los fluidos del proyecto.

## **4.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA**

Esta sección tiene como objetivo dar a conocer los resultados de la evaluación económica del proceso de reciclaje de aguas.

Esta evaluación tiene un fin comparativo con el escenario actual. Así, el análisis busca establecer una relación directa entre las tarifas cobradas por la sanitaria ESSBIO por concepto de producción de un metro cúbico de agua potable y los costos de producción asociados a la obtención de cada metro cúbico de agua reciclada.

Para ello, se siguieron los siguientes pasos:

1. Determinación de los costos asociados a la compra de equipos e insumos que componen el proceso.
2. Estimación de los costos directos e indirectos del proyecto.
3. Determinación del costo energético por concepto de operación del proceso.
4. Construcción de tarifa de producción de agua reciclada.
5. Comparación entre tarifa de agua potable y agua reciclada.

Los siguientes apartados detallan las etapas de la evaluación realizada.

### **4.2.1 Costos de inversión**

A continuación, se muestran los supuestos y resultados de la estimación de costos por concepto de compra de equipos e insumos.

#### **4.2.1.1 Equipos e insumos**

Se presentan los costos de los equipos principales, necesarios para la operación de la planta de reciclaje de aguas. En la Tabla 10 se muestran los valores calculados.

Tabla 10: Costos de inversión en los equipos involucrados en el proceso de reciclaje de aguas

Etapa	Equipo	Dimensiones	Unidades	Costo estimado (CLP)	Referencia
Oxidación Avanzada	Reactor PFR	498	$m^3$	22.542.760	[56]
	Tratamiento UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>4</sup>	0,007853	$\frac{kg}{s}$	14.046.081	[57]
Ultrafiltración	Membranas de ultrafiltración	416	Unidad	151.226.486	[58]
Osmosis Inversa	Membranas de osmosis inversa	508	Unidad	207.810.627	
Cloración	Reactor CSTR	761	$m^3$	759.764.192	[59]
Almacenamiento	Estanque almacenamiento n°1	20.355	$m^3$	1.175.501.250	[59]
	Estanque almacenamiento n°2	58	$m^3$	72.569.168	[59]
	Estanque almacenamiento n°3	8.119	$m^3$	468.865.753	[59]

En la Tabla 11 se muestran los costos correspondientes al requerimiento de insumos, en forma de flujo monetario.

Tabla 11: Precio de Insumos

Insumo	Precio Unitario [USD/kg]	Precio Total [CLP/hora]	Referencia
Peróxido de Hidrógeno	1,39	5.180.307	[60]
Cloro gas	0,3	335	[61]

## 4.2.2 Costos operacionales

En esta sección, se presenta la estimación de los costos directos e indirectos del proyecto a partir de la inversión inicial, en representación de los costos operacionales del proyecto.

### 4.2.2.1 Estimación de costos directos e indirectos

Para el cálculo de los costos directos e indirectos del proyecto, se utiliza como base el total de los costos correspondientes a equipos e insumos, bajo el supuesto de que son estos ítems los que representan la inversión que la empresa deberá realizar. El resto de los costos para la

---

<sup>4</sup> El costo del tratamiento realizado por las lámparas generadoras de radiación UV está dado por la energía para la fotocatalisis del peróxido de hidrógeno[57].

implementación y operación de la planta, se estiman desde porcentajes que son mostrados en la Tabla 12, donde además se presentan los resultados de este cálculo.

Tabla 12: Porcentajes para la estimación de costos directos e indirectos, y resultados.

	<b>Proporción sobre el costo de inversión (%)</b> [62]	<b>CLP</b>
<b>Costos Directos</b>		
Equipo comprado	-	2.872.326.320
Instalación equipos	10	287.232.632
Instrumentación y control	5	143.616.316
Piping	11,5	330.317.526
sistema eléctrico	6	172.339.579
Construcciones	10,5	301.594.263
Mejores de terreno	3,5	100.531.421
Instalaciones de servicio	14	402.125.684
Terreno	1,5	43.084.894
<b>Costos Indirectos</b>		
Ingeniería y supervisión	12,5	359.040.790
Gastos de construcción	10	287.232.632
Honorarios contratista	4	114.893.052
Contingencia	10	287.232.632
	<b>Total</b>	<b>5.701.567.745</b>

#### 4.2.2.2 Costos de energía

En base a los requerimientos energéticos mostrados en la sección 4.1.4, se calculan los costos de la energía eléctrica. El valor del kWh es establecido por la empresa proveedora del suministro, en este caso la empresa ENEL, cuyo monto es de \$112,36<sup>5</sup> [63].

La Tabla 13 presenta los resultados del cálculo de los costos por concepto de energía eléctrica para la operación del proceso.

---

<sup>5</sup> Valor del kWh a la fecha Marzo 2016, en CLP

Tabla 13: Costos de energía eléctrica requerida por el proceso

<b>Etapa</b>	<b>Demanda energética [kWh]</b>	<b>Costo [CLP]</b>
Oxidación Avanzada	10,956	1231,02
Ultrafiltración	343,67	38614,61
Osmosis Inversa	687,34	77229,22
<b>Total</b>	<b>1041,96</b>	<b>175612,26</b>

### 4.2.3 Análisis tarifario

A través de los costos del proyecto, presentados en el apartado anterior, se realiza un análisis para comparar directamente el proceso de reciclaje de aguas y el proceso de producción de agua potable convencional. Para ello se construye la tarifa de agua reciclada siguiendo las líneas de la determinación de las tarifas que las sanitarias cobran a sus clientes por concepto de producción y distribución de agua potable y alcantarillado<sup>6</sup>.

#### 4.2.3.1 ¿Cómo se configuran las tarifas de agua?

Según lo establecido por la Ley General de Servicios Sanitarios [64], se entenderá por producción de agua potable a *la captación y tratamiento de agua cruda, para su posterior distribución en las condiciones técnicas y sanitarias establecidas por las normas respectivas*. Además, se entenderá por distribución de agua potable a *la conducción del agua producida hasta su entrega en el inmueble del usuario*. Las tarifas correspondientes a estas actividades varían para cada empresa y son determinadas mediante un Decreto Tarifario que tiene vigencia de cinco años, compuesto principalmente de dos partes:

1. Cargo fijo: Su valor es determinado de acuerdo a los costos que se generan por la ejecución de los procesos de lecturas de medidores, facturación, reparto de boletas, recaudación, emisión de documentos de cobro, despacho de los mismos, oficinas comerciales, atención de reclamos, informática y gastos asociados a la administración general imputable a los clientes, es decir, aquellos costos del servicio que no dependen del volumen consumido de agua potable o descargado de aguas servidas. Este cobro debe efectuarse independiente del consumo realizado, incluso si no lo hubiere[65].
2. Costos variables: Porción de la tarifa que depende directamente del volumen de agua consumida por el usuario. Además, puede variar entre el período punta y no punta. Este cargo considera los costos de inversión, operación y mantenimiento de las obras de infraestructura necesarias para la producción y la distribución de agua potable (captaciones, conducciones, plantas de tratamiento, plantas elevadoras, estanques, redes, etc.). También considera proporcionalmente gastos asociados a la Administración General del servicio [66].

---

<sup>6</sup> Para efectos de este trabajo sólo se considera la porción de la tarifa correspondiente al agua potable.

La construcción de la tarifa de agua reciclada se basará entonces en los costos variables.

#### **4.2.3.2 Tarifas de los servicios de producción y distribución de agua potable de la empresa ESSBIO**

Las tarifas cobradas por la empresa ESSBIO en la zona de Rancagua son fijadas mediante el decreto tarifario de febrero de 2012, para el periodo 2012-2016. En él, se fijan las fórmulas para el cálculo de los costos variables del consumo de agua potable [67].

En la Tabla 14 se indican los costos fijados por la sanitaria, para las localidades de Rancagua, San Fernando, Graneros, Machalí y Rengo.

Tabla 14: Tarifas de producción y distribución de agua potable [68].

Costos fijos [\$]	Costos variables [\$/m3]		
	Cargo fijo (CF)	Período No Punta	Período Punta
675	471,71	469,87	1.060,51

El periodo no punta representa las lecturas del 01 de abril al 30 de noviembre, mientras que el periodo punta aquellas lecturas realizadas entre el 01 de diciembre y el 31 de marzo. Para efectos de este trabajo, se decide agrupar los periodos punta y no punta a través del promedio de ambos valores, por lo que el precio de los costos variables corresponderá a \$470,79, en consumo regular, y \$1.060,51 en sobreconsumo.

En adelante se decide trabajar sólo con el fragmento de costos variables (promedio entre horario no punta y punta), porción de la tarifa que contiene los costos asociados a inversión, operación, mantenimiento de obras de infraestructura y gastos proporcionales a la administración general del servicio.

#### **4.2.3.3 Tarifa de producción de agua reciclada**

La determinación de la tarifa o precio del metro cúbico de agua reciclada se realiza a partir de los resultados de estimaciones de costos de inversión, producción y energía presentados en los apartados anteriores. De esta forma, la tarifa se divide en dos partes: la primera de ellas contiene la estimación de los costos operacionales, mientras que la otra porción contendrá los costos asociados a la distribución.

En primer lugar, se propone un horizonte de evaluación, dado por la vida útil de los equipos del proceso. Se estima que el proyecto total tiene una vida de 10 años antes de la obsolescencia de la tecnología y equipos utilizados. En base a este periodo, se calcula el flujo de dinero que se utiliza en función de la inversión del proyecto por hora, tal como se muestra a continuación:

---

<sup>7</sup> Consumo superior a los 40 m<sup>3</sup> o mayor al promedio de los meses de invierno [77].

$$\frac{(\text{Costos Dir} + \text{Costos Indir})}{10 \text{ años}} * \frac{1 \text{ año}}{87600 \text{ horas}} = 54.386 \frac{CLP}{\text{hora}} \quad \text{Ec. 18}$$

El paso siguiente consiste en obtener los costos del proyecto (directos e indirectos) por metro cúbico de agua producida. Para ello se divide el resultado de la Ecuación Ec. 18 por el flujo de agua que ingresa al proceso de reciclaje de agua en una hora, obteniendo:

$$\frac{54.386 \frac{CLP}{h}}{1413,54 \frac{m^3}{h}} = 38,48 \frac{CLP}{m^3} \quad \text{Ec. 19}$$

Estos \$38,48 representan la fracción de la tarifa por concepto de inversión. Para cuantificar el precio de la producción y energía se utiliza el costo energético de la operación del proceso, mostrado en la Tabla 13. Estos costos se dividen por el flujo de agua de alimentación al precio, obteniendo:

$$\frac{175.612,26 \frac{CLP}{h}}{1413,54 \frac{m^3}{h}} = 162,71 \frac{CLP}{m^3} \quad \text{Ec. 20}$$

Finalmente, sumando los resultados de las Ecuaciones Ec. 19 y Ec. 20, se obtiene la tarifa de producción de agua reciclada:

$$38,48 \frac{CLP}{m^3} + 162,71 \frac{CLP}{m^3} = 162,71 \frac{CLP}{m^3} \quad \text{Ec. 21}$$

Sin embargo, para poder comparar esta tarifa con los precios cobrados por la empresa sanitario por metro cúbico de agua potable se deben incluir los costos de distribución del suministro. Este monto se calcula mediante las fórmulas tarifarias decretadas por ESSBIO, de la forma:

$$CVAPP = CV2 * IN3 + CV5 * IN6$$

Donde:

*CVAPP* = cargo variable por consumo de agua en periodo punta

*CV2* = cargo variable por producción de agua potable en periodo punta

*CV5* = cargo variable por distribución de agua potable en periodo punta

*IN3* e *IN6* son índices calculados en función del IPC a la fecha y el IPC del año 2009.

Se utiliza como supuesto que la tarifa calculada en la Ecuación Ec. 21 representa los cargos asociados a *CV2* y *IN3*, por lo que se calcula el índice *IN6* dado que el cargo variable *CV5* se encuentra fijado por la empresa y equivale a \$169,55. Así, *IN6* = 1,16. Se obtiene que el cargo de distribución del suministro de agua es de \$196,05.

Con el cargo de distribución se construye una primera tarifa para el metro cúbico de agua reciclada:

$$T_{AR} = 162,71 \frac{CLP}{m^3} + 196,05 \frac{CLP}{m^3}$$
$$T_{AR} = 358,76 \frac{CLP}{m^3}$$

Ec. 22

#### **4.2.3.4 Estimación de la energía para la inyección del agua reciclada a la red**

Otra de los elementos a analizar en el proyecto propuesto tiene relación con la potencia que la nueva planta de generación de agua reciclada deberá emplear para poder distribuir el suministro a la población.

Se estudian dos escenarios de distribución: el primero de ellos es la distribución actual del suministro de agua potable realizada por la empresa sanitaria, desde su planta de producción hasta las casas colindantes a la planta de tratamiento de aguas servidas. Mientras que el segundo escenario, corresponde a la distribución del suministro de agua reciclada, con calidad de agua potable, desde la PTAS hasta las casas colindantes a la planta de producción de agua potable.

Los siguientes pasos fueron realizados para la construcción del análisis:

- Determinar ubicación de la actual planta de producción de agua potable que abastece a la ciudad de Rancagua.
- Determinar ubicación de la planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Rancagua, lugar donde se propone acoplar el proceso diseñado.
- Calcular distancia entre ambas plantas y su perfil de elevación geográfica.
- Estimación de la potencia empleada por bomba de distribución de agua, desde ambas plantas.

Además, este análisis busca representar de forma simplificada el sistema de distribución de aguas, con el fin de estudiar los requerimientos energéticos que implica la inyección del agua reciclada en la red de agua potable existente.

##### **4.2.3.4.1 Ubicación geográfica**

Mediante la utilización del software *Google Earth*, se localizan las dos plantas de tratamiento. Como se comenta en el apartado anterior, ambas se ubican en la subcuenca del río Cachapoal.

La planta de producción de agua potable de la localidad, se ubica al sur-este de la ciudad de Rancagua, cercano al límite con Machalí, mientras que la planta de tratamiento de aguas servidas se ubica hacia el noroeste de la ciudad de Rancagua, junto al estero La Cadena. Entre ambas plantas existe una distancia geográfica de 14,8 km en línea recta.



En el Anexo J.2 Distancia entre planta de producción de agua potable y planta de tratamiento de aguas servidas adjunta la imagen satelital obtenida a través del software empleado. Además, en ella se indica la distancia entre ambas plantas.

#### 4.2.3.4.2 Perfil de elevación

Un factor importante para la distribución del suministro de agua es la pendiente en la red, este elemento contribuye a marcar una base para la estimación del consumo energético que implica la inyección del agua reciclada a la red de agua potable.

Empleando las herramientas de *Google Earth* es posible obtener un perfil de elevación entre los puntos donde están ubicadas ambas plantas. De esta forma, se puede conocer sus alturas respecto al nivel del mar:

- Elevación Planta de agua potable = 602 m.s.n.m
- Elevación Planta de tratamiento de aguas servidas = 458 m.s.n.m

En el Anexo J.3 Perfil de elevación geográficas adjunta el perfil de elevación obtenido.

#### 4.2.3.4.3 Cálculo de la potencia

A continuación, se estiman las potencias empleadas para el transporte del suministro de agua en los casos anteriores.

El cálculo de la potencia se realiza en base a la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 + He = h_f + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

$V$ : velocidad del flujo a transportar  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$P$ : presión en el punto de estudio [Pa]

$z$ : elevación o altura del punto de estudio [m]

$He$ : altura de elevación de la bomba [m]

$h_f$ : pérdidas de carga del sistema [m]

$g$ : aceleración de gravedad  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\rho$ : densidad del fluido  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Los supuestos empleados para el cálculo de la potencia de la bomba de distribución fueron los siguientes:

1. Caudal constante
2. Flujo incompresible

3. Flujo laminar
4. Presión de entrada al sistema igual a la presión atmosférica
5. Pérdidas de carga iguales en ambos sentidos de distribución
6. Velocidad constante del fluido

#### 4.2.3.4.3.1 *Altura de elevación bomba, desde planta de agua potable a planta de tratamiento de aguas servidas*

En el punto de origen, los valores para los parámetros son:

- $P_1 = 101.325 [Pa]$ <sup>8</sup>
- $z_1 = 602 [m]$

Mientras que en el punto de destino:

- $P_2 = 147.000 [Pa]$ [69]
- $z_2 = 458 [m]$

Reemplazando estos valores en la Ecuación Ec. 23, y utilizando los supuestos descritos anteriormente, se obtiene:

$$He_1 = h_f + \left( \frac{(147.000 - 101.325) \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \right) + (458 - 602)[m] \quad \text{Ec. 24}$$

$$He_1 = h_f - 139,34 [m]$$

#### 4.2.3.4.3.2 *Altura de elevación bomba, desde planta de tratamiento de aguas servidas a inyección en planta de agua potable*

En el punto de origen, los valores para los parámetros son:

- $P_1 = 101.325 [Pa]$
- $z_1 = 458 [m]$

Mientras que en el punto de destino:

- $P_2 = 147.000 [Pa]$ [69]
- $z_2 = 602 [m]$

Reemplazando estos valores en la Ecuación Ec. 23, y utilizando los supuestos descritos anteriormente, se obtiene:

---

<sup>8</sup>Se asume que los estanques desde donde se inicia la distribución se encuentran abiertos, por lo que este valor corresponde a la presión atmosférica.

$$He_2 = h_f + \left( \frac{(147.000 - 101.325) \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \right) + (602 - 458)[m]$$

Ec. 25

$$He_2 = h_f + 148,66 [m]$$

#### 4.2.3.4.3.3 Potencia

Para obtener la diferencia de potencia entre el escenario actual y el reciclaje de aguas, se determina en primer lugar la diferencia de las alturas de elevación:

$$\Delta He = He_2 - He_1$$

$$\Delta He = h_f + 148,66 - h_f + 139,34 [m]$$

Ec. 26

$$\Delta He = 288 [m]$$

Luego, la potencia extra de la bomba está dada por la ecuación:

$$P = \frac{\rho g Q \Delta He}{\eta} \left[ \frac{mkg}{s} \right]$$

Ec. 27

Donde:

$Q$ : flujo transportado  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$

$\eta$ : rendimiento de la bomba [%] Se estima un rendimiento de un 70%.

Reemplazando los valores de los parámetros en la Ecuación 27, se obtiene el siguiente resultado:

$$P = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,234 \frac{m^3}{s} * 288 m}{0,7}$$

Ec. 28

$$P = 944.450,74 \left[ \frac{kgm^2}{s^3} \right] = 944.450,74 W \cong 950 kW$$

Al considerar que la planta de reciclaje de aguas entrega el suministro durante las 24 horas del día, se calcula la energía que la bomba de distribución emplearía para esta tarea:

$$E = 944,45 kW * 24 horas = 22.666,82 kWh$$

Ec. 29

Consumo que traducido a unidades económicas tendría un costo en CLP de:

$$\begin{aligned} \$E &= 22.666,82 \text{ kWh} * \$112,36 \\ \$E &= \$2.546.843 \end{aligned} \quad \text{Ec. 30}$$

Este resultado se interpreta como el costo adicional al que tendría que incurrir la empresa sanitaria para poder inyectar el flujo de agua reciclada a la red de agua potable instalada en la ciudad, a 14,8 km del punto de producción.

#### 4.2.3.4.4 Cálculo del precio del metro cúbico inyectado a la red

Una vez calcula la energía y su equivalente en costos, se calcula el precio que esta actividad tendrá al transportar cada metro cúbico producido.

Se considera que el suministro es entregado durante las 24 horas del día, por lo que el costo por hora se calcula en la Ecuación Ec. 31:

$$\text{Costos por hora} = \frac{\$E}{24 \text{ h}} = \frac{2.546.843 \text{ CLP}}{24 \text{ h}} = 106.118,5 \frac{\text{CLP}}{\text{h}} \quad \text{Ec. 31}$$

A partir de este resultado se calcula el precio por el transporte de un metro cúbico, considerando que el flujo producido es de 0,234 m<sup>3</sup>/s:

$$\begin{aligned} \text{Precio m}^3 &= \frac{106.118,5 \frac{\text{CLP}}{\text{h}}}{0,234 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \\ \text{Precio m}^3 &= 125,97 \frac{\text{CLP}}{\text{m}^3} \end{aligned} \quad \text{Ec. 32}$$

Con este valor, se construye una nueva tarifa para el precio del metro cúbico de agua reciclada, tarifa que incluye en su estructura los costos de inyectar la producción a una distancia determinada en la red de agua potable.

$$\begin{aligned} T_{AR2} &= T_{AR1} + 127,97 \frac{\text{CLP}}{\text{m}^3} \\ T_{AR2} &= 484,72 \frac{\text{CLP}}{\text{m}^3} \end{aligned} \quad \text{Ec. 33}$$

Debido a la estructura que configura estas tarifas, ellas representan los costos operacionales de la producción del agua reciclada, cuya unidad será el metro cúbico producido.

#### 4.2.3.5 *Análisis de costos de producción y tarifa del agua reciclada*

A partir de las tarifas calculadas anteriormente, se realizan comparaciones entre el precio actual, cobrado por la empresa ESSBIO, en relación al agua potable y los costos de producción del agua reciclada.

*a) Costos de producción del agua reciclada según distancia de inyección a la red de distribución*

Se considerará que el precio que cada consumidor deberá pagar a la empresa es de \$470,79 (valor presentado en la sección 4.2.3.2), por cada metro cúbico consumido.

En relación a los costos de producción del agua reciclada, este monto se compone de cuatro partes:

1. Costos operacionales: calculados en la sección 4.2.3.3, por concepto del proceso de reciclaje del agua.
2. Energía: calculados en la sección 4.2.3.4.4, correspondiente al transporte del flujo desde la PTAS a la red de agua potable.
3. Instalación de acueductos: costos proporcionales a la distribución del suministro de agua en la red, en relación a la distancia existente entre la PTAS y la inyección.
4. Distribución: calculados en la sección 4.2.3.3, asociados a la distribución del suministro en la red de agua potable.

De esta forma, en la Tabla 15 se presentan los valores que configuran los costos de producción del agua reciclada, y el costo total. Estos resultados se establecen según la distancia entre la producción del agua reciclada y su inyección en la red de agua potable.

Tabla 15: Costos de producción de agua reciclada

<b>Kilómetros Inyección a la red [km]</b>	<b>Costos operacionales [CLP]</b>	<b>Energía de transporte [CLP]</b>	<b>Instalación de acueducto [CLP]</b>	<b>Distribución [CLP]</b>	<b>\$ Total [CLP]</b>
0	162,71	0,00	0,00	196,05	<b>358,76</b>
1	162,71	8,51	0,13	196,05	<b>367,40</b>
2	162,71	17,02	0,27	196,05	<b>376,05</b>
3	162,71	25,53	0,40	196,05	<b>384,69</b>
4	162,71	34,05	0,53	196,05	<b>393,34</b>
5	162,71	42,56	0,67	196,05	<b>401,98</b>
6	162,71	51,07	0,80	196,05	<b>410,63</b>
7	162,71	59,58	0,93	196,05	<b>419,27</b>
8	162,71	68,09	1,06	196,05	<b>427,92</b>
9	162,71	76,60	1,20	196,05	<b>436,56</b>
10	162,71	85,12	1,33	196,05	<b>445,20</b>
11	162,71	93,63	1,46	196,05	<b>453,85</b>
12	162,71	102,14	1,60	196,05	<b>462,49</b>
13	162,71	110,65	1,73	196,05	<b>471,14</b>
14	162,71	119,16	1,86	196,05	<b>479,78</b>
15	162,71	127,67	2,00	196,05	<b>488,43</b>
16	162,71	136,19	2,13	196,05	<b>497,07</b>
17	162,71	144,70	2,26	196,05	<b>505,72</b>
18	162,71	153,21	2,40	196,05	<b>514,36</b>
19	162,71	161,72	2,53	196,05	<b>523,01</b>
20	162,71	170,23	2,66	196,05	<b>531,65</b>

La Figura 20 muestra una comparación entre las tarifas de los escenarios descritos en la Tabla 15, y el precio fijado por la empresa sanitaria para los consumidores del suministro. Estos resultados dan cuenta del aumento en los costos de producción a medida que el punto de inyección en la red de agua potable se aleja del proceso de reciclaje de aguas.

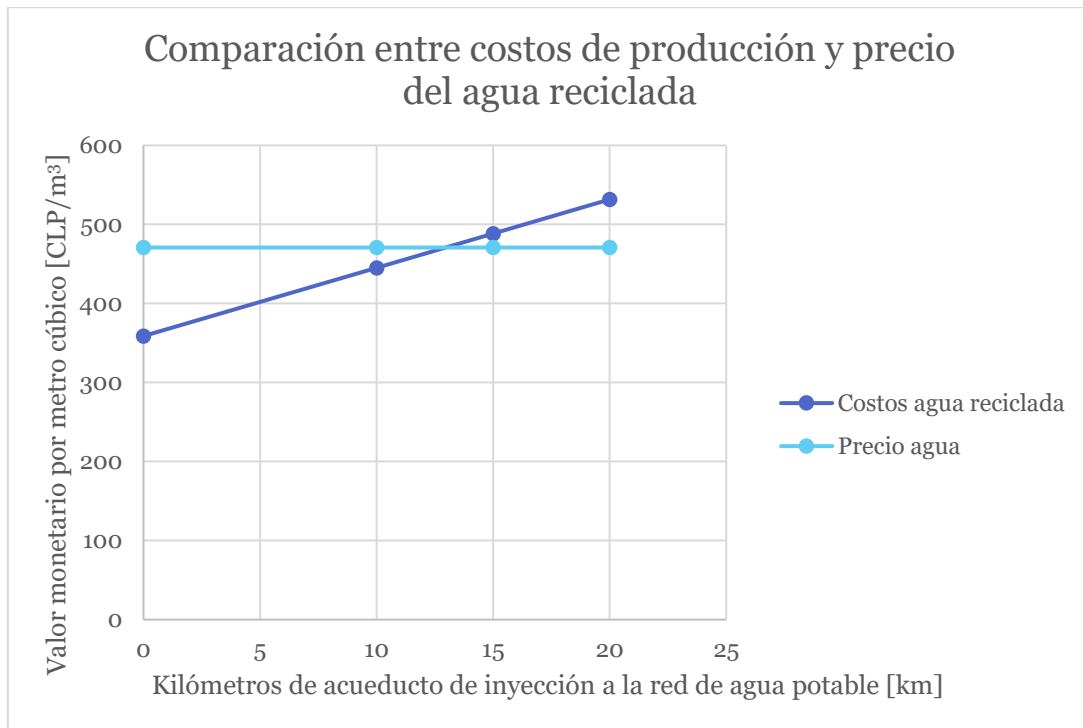


Figura 20: Comparación entre la tarifa de agua potable y agua reciclada.

En relación a estos resultados, se puede establecer una comparación con uno de los ejemplos internacionales mencionados con anterioridad. En Singapur, la tarifa del metro cúbico de agua potable es de 1,35 USD (891,43 CLP), mientras que el mismo volumen de agua reciclada *NEWater* posee una tarifa de 1,32 USD (871,62 CLP). Esta diferencia de precios en relación a los calculados en este trabajo se puede deber a las distancias donde es transportada el agua producida por las plantas de reciclaje de agua en Singapur, donde las empresas y reservorios naturales donde es llevada el agua se encuentran próximas a las plantas de producción de *NEWater*, bajando sus costos. Además, en país del sudeste asiático, producir un metro cúbico de agua potable proveniente de fuentes naturales representa costos económicos y ambientales más altos debido a la escasez del recurso.

*b) Costos de producción en relación al flujo de agua a reciclar*

Otro factor económico importante de analizar es cómo los costos de producción de la planta de reciclaje de aguas varían frente a cambios en el flujo de agua de entrada de la planta. Este análisis busca estudiar los cambios en la demanda de agua reciclada por parte de la empresa operadora, o por la demanda de la población. Para ello se observan cuatro escenarios distintos, en cada uno de ellos la inversión del proyecto (instalaciones y compra de equipos) permanece constante, siendo los costos operacionales los afectados ante variaciones en el flujo de entrada.

Los cuatro escenarios en la variación del flujo de entrada al proceso se presentan en la Tabla 16, además de los resultados respectivos de los costos de operación de la planta de reciclaje, por metro cúbico de agua producida.

Tabla 16: Resultados costos de producción en función del flujo de agua que ingresa al proceso de reciclaje

Flujo de agua [m <sup>3</sup> /h]	Costo de producción [CLP/m <sup>3</sup> ]
353,38	976,56
706,77	651,14
1060,15	542,67
1413,54	488,43

La Figura 21 muestra la tendencia de estos resultados, donde los costos de producción por cada metro cúbico de agua reciclada aumentan en la medida que los flujos de agua que ingresan al proceso disminuyen, debido a la inversión inicial fija. En la siguiente sección se analizan los efectos de estas variaciones sobre los Flujos de Caja del proyecto.

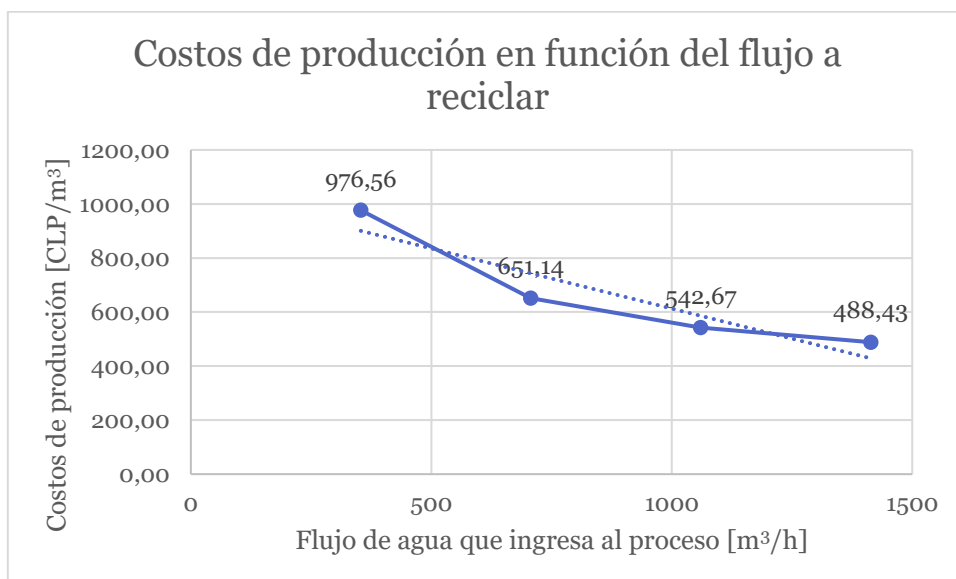


Figura 21: Variación de los costos de producción en función del flujo de agua que ingresa al proceso de reciclaje.



#### 4.2.4 Análisis del flujo de caja del proyecto

A partir de los cálculos realizados en las secciones de Costos del proceso y el Análisis tarifario, se construyen flujos de caja del proyecto para diferentes escenarios.

Los factores económicos que se consideraron para la elaboración del flujo de caja fueron:

- Tasa de descuento, correspondiente a la rentabilidad mínima esperada según el riesgo asociado al proyecto. Se utiliza una tasa del 6%, valor empleado para el cálculo de los flujos de caja de proyectos de reciclaje de agua [70].
- Se considera el impuesto de primera categoría sobre las utilidades del proyecto, cuyo monto alcanza el 24% [71].
- El horizonte de evaluación utilizado es de 10 años, correspondiente a la vida de los equipos.
- Se considera una reinversión del 50% al quinto año por concepto de renovación de los equipos de ultrafiltración y osmosis inversa, etapas que poseen una menor vida útil.
- El flujo de caja se realiza en pesos chilenos (CLP), sin embargo, el costo de los equipos se transforma a esta moneda utilizando el cambio de 1 USD = 660,32 CLP [72].
- Se asume que el flujo de agua reciclada producida se mantiene constante en el tiempo y equivale a 842,4 m<sup>3</sup>/h (flujo de entrada al proceso=1413,54 m<sup>3</sup>/h)
- La tarifa para cada metro cúbico de agua consumido por el usuario permanece constante y corresponde al monto fijado por la empresa sanitaria ESSBIO. Este monto equivale a \$470,79.

La sensibilización del proyecto estudia el comportamiento de su valor actual neto (VAN), ante la modificación de la tarifa que se cobraría a los usuarios según sea la ubicación del punto de inyección de agua reciclada a la red de agua potable.

A continuación, la Tabla 17 muestra las distancias y las tarifas estudiadas en esta evaluación económica. Además, se muestran los resultados del VAN de cada una de ellas, respectivamente.

Tabla 17: Tarifas de los escenarios de ubicación de la inyección de agua reciclada estudiados.

Distancia al punto de inyección en la red [km]	Costo de producción [\$/m <sup>3</sup> ]	Tarifa del agua [\$/m <sup>3</sup> ]	VAN
0	358,76	470,79	\$-405.300.446
10	445,20	470,79	\$-5.974.968.985
15	488,43	470,79	\$-8.886.354.179
20	531,65	470,79	\$-12.429.514.288

La Figura 22 muestra el comportamiento del VAN del proyecto en relación a la variación de la tarifa del metro cúbico de agua reciclada.

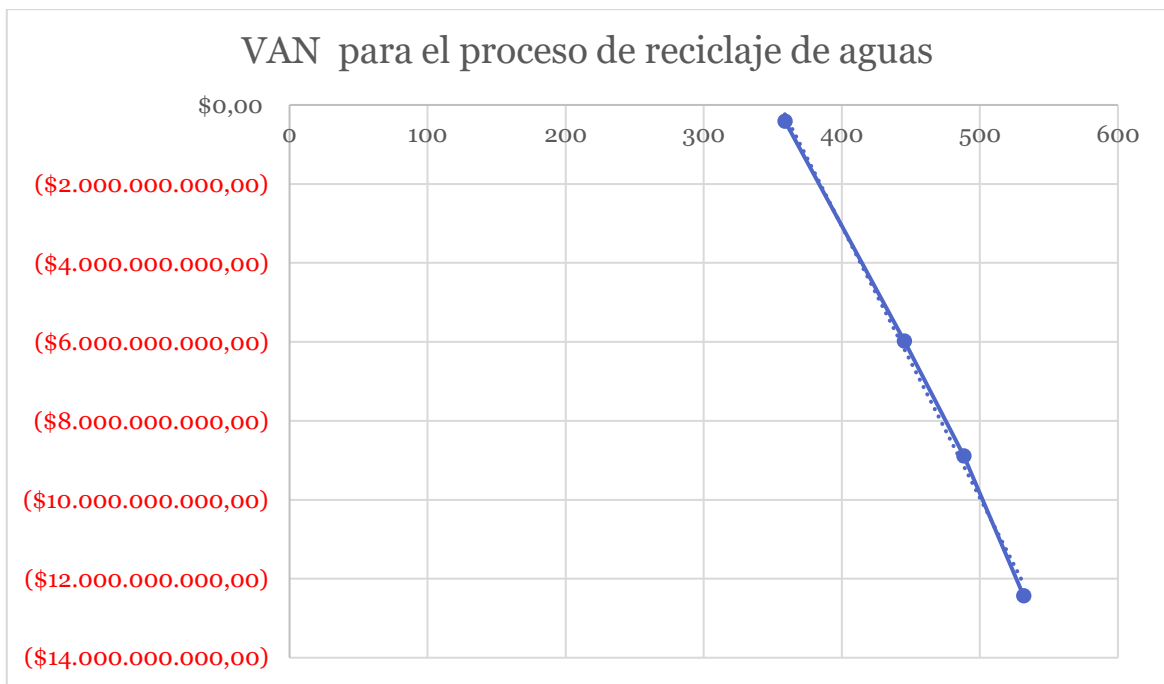


Figura 22: VAN del proyecto en relación a la tarifa de agua reciclada

Los resultados presentados en la Figura 22 dan cuenta de la infactibilidad económica del proyecto ante cambios en el flujo de agua que se debe reciclar en el proceso. Esto también responde a cambios en la demanda del servicio entregado por la empresa, colocando al proyecto como una fuente de agua que presenta mayor riesgo económico para ESSBIO, en comparación a la obtención de agua potable desde la extracción de flujos del río Cachapoal.

Se evalúan, además, los flujos de caja netos y acumulados para el escenario de producción de agua reciclada es para el flujo de 1413,54 m<sup>3</sup>/h, y la inyección a la red de agua potable se realiza a los 15 km de distancia, desde el punto de producción. Se debe considerar, además, que se propone un escenario donde se realiza una reinversión en el quinta año del horizonte de evaluación (correspondiente al 50% de la inversión original del proyecto) por conceptos de renovación de equipos y mantenimiento de la planta.

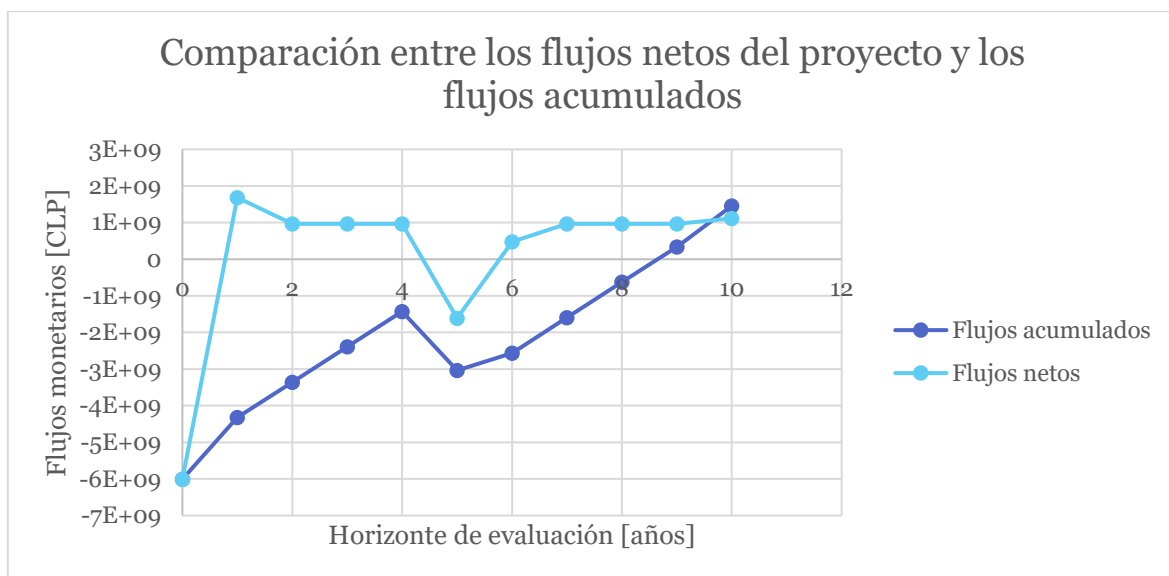


Figura 23: Análisis de flujos de caja netos y acumulados.

Los resultados que muestra la Figura 23 dan cuenta del periodo donde la recuperación de la inversión del proyecto, a partir del análisis de los flujos netos acumulados. Así, se observa que al término del octavo año la inversión se recupera y el proyecto comienza a generar utilidades.

En el Anexo K se muestran los flujos de caja realizados para el análisis económico del proyecto.

#### 4.2.5 Discusiones

Los resultados de los flujos de caja analizados para los diferentes escenarios indican que la factibilidad económica del proyecto estará determinada por la tarifa del agua reciclada. Al considerar que, pese a la implementación del proyecto, la empresa sanitaria a cargo de entregar el servicio mantiene constante las tarifas por volumen de agua consumida, genera una evaluación económica desfavorable, por lo que sería necesario realizar estudios posteriores que puedan proponer tarifas diferenciadas para el tipo de agua que se consume.

Otro factor de importancia en los análisis realizados corresponde a los costos asociados al transporte del flujo de agua a su punto de inyección a la red de distribución de agua potable. La implementación del proyecto distante del punto de inyección genera costos energéticos y operativos, producto de la instalación de nuevos acueductos y obras en la zona, que podrían ser disminuidos o evitados si se estudian nuevas posibilidades para el uso y destino del flujo de agua reciclada producida.

Los costos operacionales del proyecto utilizados para el análisis económico fueron estimados como función de los costos de capital. Este factor también puede alterar el cálculo de los flujos de caja, por lo que se sugiere estudiar en mayor detalle los elementos que componen la estructura de costos, realizando una evaluación de ingeniería básica. Sumado a lo anterior, es importante destacar que las empresas sanitarias deben realizar estudios en profundidad para poder elaborar junto a la autoridad los decretos tarifarios que determinan el precio de su servicio.

Respecto a factibilidad económica del proyecto ante cambios en la demanda del flujo de agua reciclada, es importante notar que, pese a que los flujos que son sometidos a la operación del proceso puedan disminuir, la inversión inicial del proyecto permanece fija, por lo que los ingresos percibidos por la producción de agua reciclada no son suficientes para amortiguar los costos operacionales del proyecto y los flujos monetarios netos a lo largo del periodo de evaluación.

### 4.3 EVALUACIÓN AMBIENTAL

La siguiente sección tiene como objetivo realizar un análisis de la situación ambiental actual y los cambios estimados para el proyecto en estudio.

En la sección 1.3 se presenta el caso en estudio, a continuación, se profundiza en la zona donde se realizan las descargas de la PTAS, analizando los cambios en el caudal del cauce donde son dirigidos los efluentes y los cambios en la calidad de las aguas. Esta evaluación es preliminar, y busca cuantificar los efectos del proyecto sobre la zona donde se emplazaría, en particular los efectos sobre el uso de aguas de cursos naturales.

#### 4.3.1 Situación actual del uso de aguas y descargas de la PTAS en la zona de Rancagua

##### 4.3.1.1 Uso del agua

El proyecto se emplaza en la cuenca del río Rapel, específicamente en el subcuenca del río Cachapoal (Ver mapa en Anexo J.1 Cuenca del Río Rapel, encerrado en negro la subcuenca del Río Cachapoal). Estudios del Ministerio de Obras Públicas han permitido estimar las demandas por uso del recurso hídrico en esta región, resultados que se pueden ver en la Figura 24. Estos resultados dan cuenta del uso intensivo del agua en actividades como la generación de energía y sector agropecuario. En el caso del agua potable, su demanda alcanza los  $1,672 \text{ m}^3/\text{s}$ , demanda que se satisface mediante la extracción de agua desde el caudal transportado por el río Cachapoal.

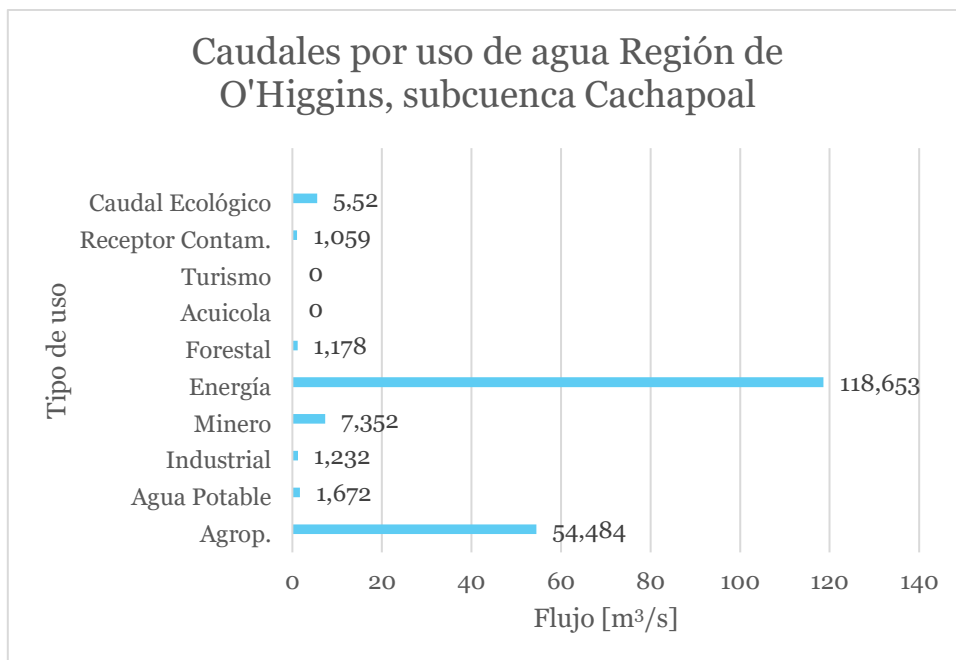


Figura 24: Caudales de agua utilizados según uso en la Región de O'Higgins[42]

Ahora bien, la disponibilidad efectiva de agua por habitante de la región de O'Higgins, equivale a  $6.829 \text{ m}^3/\text{hab/año}$ , según estudios realizados por la DGA[3]. Estos resultados permiten estimar el flujo de agua disponible para ser utilizado en la producción de agua potable, considerando los siguientes puntos:

- El uso del caudal del río Cachapoal destinado a la producción de agua potable equivale al 0,87% de la demanda total.
- Considerando la disponibilidad efectiva de agua por habitante de la región, la disponibilidad de agua por habitante en un día es de 18 m<sup>3</sup>.

Lo que permite obtener la demanda del agua potable por habitante de la región:

$$\Rightarrow \text{Agua potable} = 0,16 \frac{\text{m}^3}{\text{hab día}}$$

Volviendo al caso en estudio, la población beneficiada por la planta de tratamiento de aguas servidas se estima en 212.032 habitantes de la zona, quienes serían los receptores y consumidores del agua reciclada producida. Con esta cifra, se calcula entonces el flujo de agua potable que requiere la población:

$$Q_{AP} = \frac{0,16 \frac{\text{m}^3}{\text{hab día}}}{\text{día}} * 212.032 \text{ hab} = 34699,85 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Por otro lado, el flujo de agua reciclada producida es de 20297 m<sup>3</sup>/día (a partir del balance de masa del proceso, sección 4.1.1).

Con estos resultados, se puede concluir que el agua reciclada producida equivaldría al **58% de la demanda de agua potable de la población saneada**. Por lo tanto, el uso del flujo de agua reciclada reduciría la necesidad de extraer agua desde cursos naturales, y también reduciría las descargas de la PTAS al estero La Cadena. Estos efectos se presentan en la siguiente sección.

#### **4.3.1.2 Situación de las descargas en el estero La Cadena**

Otro punto a analizar en este trabajo se refiere al efecto de las descargas de los efluentes de la PTAS en el estero La Cadena.

El estero La Cadena nace al norte de la ciudad de Rancagua, y presenta un sentido de escurrimiento este-oeste que se prolonga por 15 km aguas debajo de su nacimiento. Posteriormente, presenta un cambio en la dirección de escurrimiento, de norte a sur hasta su confluencia con el río Cachapoal. Posee una extensión aproximada de 25 km [73].

Este curso de agua se ve sometido a diferentes presiones ambientales, principalmente provocadas por las actividades de la zona: aportes difusos provenientes de agroindustrias que descargan directa o indirectamente sus residuos al estero, y las descargas realizadas por la planta de tratamiento de aguas servidas ubicada en su trayectoria. La Figura 25 muestra una imagen satelital de la ubicación de la PTAS, al norte de ella se ubica el estero donde son descargados sus efluentes.



Figura 25: Imagen satelital de la ubicación de la PTAS respecto al estero La Cadena. En amarillo PTAS, línea azul marca la trayectoria del estero [74].

Respecto al caudal que transporta el estero, este permanece cercano a los  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  (caudal medio anual), sus fluctuaciones dependerán del régimen de precipitaciones del año [73].

El escenario que propone este proyecto considera disminuir el flujo de aguas servidas tratadas que es inyectado al estero. Actualmente, el aporte de este flujo se cuantifica en  $0,39 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual representa sólo el 3,3% del flujo de agua del estero. En el escenario con reciclaje de agua este flujo disminuye a  $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$  (disminución de un 60% en relación con el efluente actual). Finalmente, el resultado de reciclar el 60% de los efluentes de la PTAS tendrá como impacto una **disminución del 1,9% del caudal del estero La Cadena**.

Respecto a la calidad de los flujos inyectados, estos corresponderían a los concentrados obtenidos en la etapa de osmosis inversa. Previamente, fueron reducidos de este flujo las concentraciones de compuestos orgánicos y separados desde el líquido parte de las partículas suspendidas gracias a la oxidación avanzada y ultrafiltración, respectivamente. Sin embargo, es importante realizar análisis químicos que demuestren el cumplimiento de las normas de calidad para descargas de efluentes y regadío en estos flujos inyectados al estero.

En comparación con la calidad actual que los efluentes de la PTAS, el nuevo escenario es favorable para la vida del estero y su efecto en el medio ambiente donde sus aguas son utilizadas, principalmente actividades agrícolas. Además, también el río Cachapoal se ve beneficiado ya que se disminuye el caudal extraído aguas arriba para la producción de agua potable, y el agua del estero que se descarga al río posee menores concentraciones de contaminantes.

### 4.3.2 Calidad del agua reciclada

En la Tabla 18 se muestran los resultados de la evolución de la concentración de los diferentes compuestos presentes en el agua proveniente de la PTAS hasta la obtención de agua reciclada. Además, la última columna muestra la propuesta inicial de este trabajo para los límites máximos que debiese contener el agua reciclada.

Tabla 18: Resultados de parámetros de calidad obtenidos con el proceso de reciclaje de agua y comparación con propuesta inicial.

	<b>Efluentes PTAS</b>	<b>Resultados Agua reciclada</b>	<b>Referencia definida para Agua reciclada</b>
<b>Elemento</b>	mg/L	mg/L	mg/L
Aceites y Grasas	20	0,0007	-
Aluminio	5	0,1673	-
Arsénico	0,5	0,0167	0,01
Boro	0,75	0,0251	0,75
Cadmio	0,01	0,0003	0,003
Cianuro	0,2	0,0067	0,05
Cloruros	400	13,3813	400
Cobre Total	2	0,0669	2
Coliformes Fecales	1000	0,0335	-
Cromo Hexavalente	0,05	0,0017	0,05
DBO5	35	0,0000	-
Fluoruro	1,5	0,0502	1,5
Fósforo	10	0,3345	-
Hidrocarburos Fijos	10	0,0007	-
Hierro Disuelto	5	0,1673	0,3
Índice de Fenol	0,5	0,0167	0,002
Manganeso	0,3	0,0100	0,1
Mercurio	0,001	0,0000	0,001
Molibdeno	1	0,0335	-
Níquel	0,2	0,0067	0,07
Nitrógeno Total Kjeldahl	50	0,1673	-
Pentaclorofenol	0,009	0,0003	-
Plomo	0,05	0,0017	0,01
Poder Espumógeno	7	0,0023	-
Selenio	0,01	0,0003	0,01
Sólidos Suspendidos Totales	80	0,0054	-
Sulfatos	1000	33,4533	500
Sulfuros	1	0,0335	-
Tetracloroetano	0,04	0,0013	0,04
Tolueno	0,7	0,0234	0,7
Triclorometano	0,2	0,0067	0,2
Xileno	0,5	0,0167	0,5



Zinc	3	0,1004	3
Sólidos disueltos totales	1000	0,0067	500
Cloro Residual		0,2000	0,2

Aquellos compuestos, cuya concentración aparece representada por un guion (-), no aparecen declarados en la normativa de calidad de agua potable para el país, ni en ejemplos internacionales, para mayor detalle revisar Anexo F.

### 4.3.3 Discusiones

Implementar un proyecto de estas características representaría un beneficio para la subcuenca del Cachapoal, ya que el tratamiento avanzado de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas servidas contribuye a disminuir las presiones ambientales que se ejercen sobre el estero La Cadena. Por otro lado, la disminución del flujo de agua inyectado al estero desde la PTAS del 1,9% no representaría efectos adversos sobre el caudal ecológico del cauce, debido a que las fluctuaciones estacionales de los caudales transportados fluctúan entre los 12 y 17 m<sup>3</sup>/s.

Respecto a las concentraciones de los compuestos presentes en el agua, como resultados de su tratamiento en el proceso de reciclaje de aguas, se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites establecidos como requerimiento para obtener agua apta para su consumo. Sin embargo, existe una excepción en el caso del Arsénico, metal que permanece presente en el agua con una concentración de 0,016 mg/L, concentración mayor a la exigida por la normativa de agua potable (NCh° 409), de 0,01 mg/L. Este resultado implica hacer un seguimiento del metal a lo largo del proceso, determinando el tipo de interacción que presenta respecto a las separaciones de membrana y las reacciones de oxidación. Una solución a ello, podría ser la modificación de la etapa de oxidación avanzada, con el fin de favorecer la generación de Arsénico (III), elemento que puede ser removido con mayor facilidad que el Arsénico (V), elemento con mayor presencia en flujos de agua[75].

## 5 DISCUSIONES GENERALES

---

La elaboración del presente trabajo utiliza como antecedentes las iniciativas que se han llevado a cabo alrededor del mundo para intentar mejorar el escenario actual de la crisis del agua. Las características geográficas que presenta el país desde la sexta región hacia el norte, y la demanda del recurso hídrico por parte de las actividades que requiere para su desarrollo, ponen a Chile en una situación similar a la que han tenido que vivir países como Namibia, Australia, Estados Unidos y Singapur, entre otros. La demanda de agua en zonas donde la disponibilidad del recurso se ha visto disminuida por factores como el crecimiento de la población, cambio climático o reducción de las fuentes de abastecimiento, es un factor crítico que compromete el abastecimiento de las futuras generaciones. Estos hechos fuerzan el estudio de proyectos que contribuyan a la disminución del impacto que genera la sociedad sobre el recurso hídrico y favorezcan su sostenibilidad en el tiempo.

Respecto al uso y destino del agua reciclada generada, quedan como temas a tratar en estudios futuros, la pertinencia de volver a incorporar el agua servida, generada por la ciudad en estudio, a su red de agua potable. Una alternativa a este problema, podría ser en términos técnicos y económicos, redirigir esta nueva fuente a agua, a zonas cuyas características geográficas y cercanía con la planta de reciclaje de aguas, presenten costos reducidos (tanto en términos de instalaciones, ingeniería y energía) en comparación con la propuesta de este trabajo.

En relación al proceso de reciclaje de aguas, se utiliza como punto de comparación el proyecto “Planta AguaUltrapura” de la empresa *Sembcorp*, empresa responsable de las plantas de producción de NEWater en Singapur [30]. Este proyecto genera suministro de agua ultrapura a partir de aguas servidas a la planta de producción de litio de *SQM*, cerca de Antofagasta. A diferencia del proyecto propuesto en este trabajo, AguaUltrapura emplea filtros biológicos para la eliminación de compuestos orgánicos, seguidos de una desmineralización mediante OI y luego una remineralización para cumplir con los estándares de calidad exigidos para el procesamiento del litio. Esta planta posee una tasa de recuperación de agua del 75 al 80%, y genera un flujo de 2500 m<sup>3</sup>/día. El ejemplo anterior demuestra que proyectos de esta envergadura tienen un campo de aplicación más allá de la producción de agua potable, actividades donde se puede reemplazar el uso de agua proveniente de fuentes naturales que puede ser potabilizada para la población, por aguas que son miradas como un residuo.

En relación a las dimensiones del proyecto, se obtiene una planta para el reciclaje de aguas con equipos cuyas dimensiones son similares a las que se observan en plantas de tratamiento de aguas convencionales. Sin embargo, los estanques de almacenamiento y el número de unidades de membranas empleadas para configurar el proceso pueden parecer desproporcionados, si se considera que el flujo de agua reciclada que producido se encuentra alrededor del 50% del suministro total de agua potable de la zona, en relación al flujo de aguas provenientes de la PTAS que recoge los flujos del alcantarillado de toda la ciudad. El sobredimensionamiento del proceso, en esta etapa de prefactibilidad, no parece entonces alejarse en gran medida de las características que una planta de esta envergadura presentaría.

Las características empleadas para diseñar el proceso, tales como el flujo de entrada (proveniente de la PTAS) y límites de contaminantes presentes en el agua (normativa chilena e internacional), corresponden a parámetros que pueden ser escalados y ajustados a cualquier zona del país, independiente de la geografía o demografía de la zona. Lo anterior permite plantear la pregunta del por qué no han existido proyectos de esta magnitud y características, sobre todo en un país que presenta zonas secas y con escases hídrica muy marcada, como todo el Norte Grande de Chile, donde existen ciudades que podrían mejorar su desarrollo urbano de la mano de proyectos que permitan mantener y asegurar los limitados recursos hídricos con los que cuentan.

## 6 CONCLUSIONES

---

El trabajo realizado propone la implementación de un proceso que permita el reciclaje de las aguas provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas, a través de operaciones de tratamiento avanzado.

A partir de la evaluación técnica del proyecto, se logra diseñar y dimensionar un proceso que genera un flujo de 20.217 metros cúbicos de agua reciclada al día, con parámetros de calidad similares a los estándares del agua potable establecidos en la normativa chilena. Además, el proceso libera un efluente de 13.530 metros cúbicos de agua al día, tratada mediante oxidación avanzada y ultrafiltración, al caudal del estero donde antes eran inyectados los efluentes de la planta de tratamiento de aguas servidas.

Respecto a los costos del proyecto, se hace énfasis en que los cálculos realizados corresponden a un estudio preliminar, cuyo objetivo consistió en demostrar la prefactibilidad técnica y económica de un proyecto de estas características en Chile. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los requerimientos energéticos del proceso ocuparán un segmento importante de los costos operacionales, sobre todo al considerar la distancia a la que se realizará la inyección del agua reciclada a alguna red de distribución de agua.

En la evaluación económica del proyecto, se estudió la configuración de los costos de producción del agua reciclada en relación a la estructuración de las tarifas de agua potable realizadas por la empresa ESSBIO. De esta forma se analizan las variaciones de los costos en función de la ubicación de la planta de reciclaje de aguas y la distancia a la que debe ser transportado el flujo de agua reciclada para ser inyectada a una red de distribución de agua potable existente. A partir de este estudio, los resultados obtenidos muestran una evaluación económica negativa para el proceso estudiado, en condiciones donde la planta de producción se ubicada se distante del punto de inyección del agua reciclada a la red de distribución.

La evaluación ambiental demuestra la necesidad de realizar estudios en mayor profundidad en relación con el seguimiento de los contaminantes que se encuentran presentes en el agua a reciclar, para garantizar estándares de calidad que permitan su consumo como agua potable.

Es posible concluir, dado los resultados presentados en este trabajo, que para la implementación de un proyecto de estas características se debe seguir hacia estudios en mayor detalle de los equipos que componen el proceso completo, el piping del mismo, los requerimientos energéticos correspondiente al transporte de los fluidos, entre otros aspectos mencionados anteriormente. Además, es importante desarrollar un estudio en profundidad de los posibles usos del agua generada a lo largo de todo el proceso, con el fin de establecer con claridad cómo y a qué distancia deberá ser transportada el agua generada.

La factibilidad técnica y económica del proyecto propuesto deben ir de la mano a políticas públicas que realizan gestiones en la población para la aprobación del uso de este nuevo recurso hídrico sin temor a consecuencias en su salud. Esto queda demostrado en los ejemplos

internacionales estudiados, donde posibles medidas de mitigación frente a la crisis hídrica dejan a la ingeniería condicionada al juicio de la población y a la regulación de las autoridades políticas.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] DGA. 2016. Chile en el mundo. Atlas del Agua Chile 2016. : 24.
- [2] ¿Qué países sufrirán un mayor estrés hídrico en 2040? | Mercados de Medio Ambiente [en línea]. <<http://www.mercadosdemedioambiente.com/actualidad/que-paises-sufren-un-mayor-estres-hidrico/>> [consulta: 15 enero 2017].
- [3] MOP. 2012. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2025 [en línea]. : 40. <[http://www.mop.cl/Documents/ENRH\\_2013\\_OK.pdf](http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf)>
- [4] DPRH. 2015. Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015. Gobierno de Chile. : 104.
- [5] PUERTO, ISMAEL LEONARDO VERA. Alternativas hídricas para la macrozona norte. 2013.
- [6] US EPA, Region 9, Water Division. sin fecha. Water Recycling and Reuse | Region 9: Water | US EPA.
- [7] DU PISANI, Petrus L. 2006. Direct reclamation of potable water at Windhoek's Goreangab reclamation plant. Desalination [en línea]. 188(1-3): 79-88. ISSN 00119164. 10.1016/j.desal.2005.04.104
- [8] WABAG. sin fecha. Water reuse & recycling: Boosting water supply security.
- [9] NATURAL RESOURCES MANAGEMENT MINISTERIAL COUNCIL et al. 2008. Australian guidelines for water recycling: Managing health and environmental risks (Phase 2) Augmentation of drinking water supplies. National Water Quality Management Strategy. (Phase 2). ISSN 1921173068.
- [10] DUERR, Roxana Isabel. El tesoro azul de Singapur: "NEWater" proviene de aguas residuales recicladas | Global Ideas | DW.COM | 25.06.2013 [en línea]. <<http://www.dw.com/es/el-tesoro-azul-de-singapur-newater-proviene-de-aguas-residuales-recicladas/a-16904039>> 2013 [consulta: 17 enero 2017].
- [11] Área por país - Mapa Comparativo de Países - Mundo [en línea]. <<http://www.indexmundi.com/map/?v=5&l=es>> [consulta: 17 enero 2017].
- [12] PUB Home: Singapore's National Water Agency [en línea]. <<https://www.pub.gov.sg/>> [consulta: 17 enero 2017].
- [13] PUB. sin fecha. PUB NEWater Quality (Typical value).
- [14] KLOOSTERMAN, Karin. Israel's top ten water technology companies | ISRAEL21c [en línea]. <<http://www.israel21c.org/israels-top-ten-water-technology-companies/>> 2010 [consulta: 18 enero 2017].
- [15] FUNDACIÓN CHILE. 2016. Aguas Residuales como nueva fuente de agua [en línea]. ISBN 9789568200329. <<http://www.cuidoelagua.org/empapate/aguasresiduales/aguasresiduales.html>>
- [16] Senado - República de Chile - Recuperación de aguas grises: política concreta para enfrentar la desertificación pasa a segundo trámite [en línea]. <[http://www.senado.cl/recuperacion-de-aguas-grises-politica-concreta-para-enfrentar-la-desertificacion-pasa-a-segundo-tramite/prontus\\_senado/2016-01-28/134041.html](http://www.senado.cl/recuperacion-de-aguas-grises-politica-concreta-para-enfrentar-la-desertificacion-pasa-a-segundo-tramite/prontus_senado/2016-01-28/134041.html)> 2016 [consulta: 18 enero 2017].

- [17] ANTOFAGASTA, CREO. ¿Qué es el plan maestro? | Creo Antofagasta [en línea]. <<http://creoantofagasta.cl/el-plan-maestro/>> [consulta: 18 enero 2017].
- [18] ESSBIO. 2015. Reporte Sostenibilidad 2015 [en línea]. <[www.esbbio.cl](http://www.esbbio.cl)>
- [19] SUPER INTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS, Gobierno de Chile. Coberturas - SISS - Superintendencia de Servicios Sanitarios - Gobierno de Chile [en línea]. <<http://www.siss.cl/577/w3-propertyvalue-3445.html>> [consulta: 18 enero 2017].
- [20] PRESIDENCIA, MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA. Decreto 90. 2001
- [21] DE HIJUELAS, Comuna. 2012. Diario Oficial de la República de Chile.
- [22] MINISTERIO DE AGRICULTURA. Economía Regional | Ohiggins [en línea]. <<http://ohiggins.minagri.gob.cl/nuestra-region/economia-regional/>> [consulta: 18 enero 2017].
- [23] HOPENHAYN-RICH, Claudia et al. 2013. Drinking Water Through Recycling. Australian Water Recycling Centre of Excellence. 104(6): 620–628.
- [24] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Sistema de Tratamiento de Aguas Servidas, Planta de Tratamiento de Aguas Servidas: - Sitio Web RETC - Gobierno de Chile [en línea]. <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-42169.html>> [consulta: 18 enero 2017].
- [25] NOYOLA, Adalberto et al. 2013. Selección De Tecnologías Para El Tratamiento De Aguas Residuales Municipales [en línea]. 1-140 p. ISBN 9786070248221. 10.1017/CBO9781107415324.004
- [26] S.A.P., El Mercurio. 2014. MOP busca en Australia claves para enfrentar desafíos hídricos en Chile | Emol.com.
- [27] SCIENCES, Technological. 2004. Water Recycling. Water [en línea]. 30(April): 201–210. <<http://www.naturalgaswaterusage.com/Water-Recycling/Pages/information.aspx>>
- [28] Recycled Water [en línea]. <<http://www.recycledwater.com.au/index.php?id=62>> [consulta: 18 enero 2017].
- [29] NSW, Metropolitan Water Directorate. Recycled water targets | Metropolitan Water Directorate [en línea]. <<https://www.metrowater.nsw.gov.au/planning-sydney/recycling/recycled-water-targets>> [consulta: 18 enero 2017].
- [30] MIQUEL, Alex. 2016. Reuso de las Aguas Servidas en Singapur La experiencia de Sembcorp.
- [31] CHILE, Biblioteca del Congreso Nacional de. 2013. Singapur: la vanguardia en el sistema de agua potable - Portal Chile Asia Pacifico.
- [32] INN. 1978. Norma 1333: Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos. Instituto nacional de normalización.
- [33] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION. 2006. NCh 409/1.Of2005. Agua potable - Parte 1 - Requisitos.
- [34] GORDON, B. et al. 2008. WHO guidelines for drinking-water quality. WHO chronicle [en línea]. 38(3): 564. ISSN 0042-9694. 10.1016/S1462-0758(00)00006-6
- [35] SINIA. sin fecha. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA, POAs.

- [36] SIMONENKO, Elizaveta et al. 2015. Modeling of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV oxidation of organic pollutants at wastewater post-treatment. *Procedia Engineering* [en línea]. 117(1): 342–349. ISSN 18777058. 10.1016/j.proeng.2015.08.170
- [37] CAUSADA, Enfermedad. 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con luz ultravioleta. *Epa*. 64: 9.
- [38] INC., Pentair. 2014. Guía de aplicaciones de ultrafiltración [en línea]. <www.pentairaqua.com>
- [39] DISEÑOS Y SOLUCIONES SOSTENIBLES, DSS.S.A. sin fecha. Osmosis inversa (RO). Ingeniería para un desarrollo sostenible [en línea]. : 1–27. <http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis\_inversa\_ro.pdf>
- [40] SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. 2013. Tecnologías De Membrana: Osmosis Inversa. *Www.Sinia.Cl* [en línea]. <http://www.sinia.cl/1292/articulos-49990\_25.pdf>
- [41] ITC. sin fecha. Cloración de agua potable [en línea]. : 26. <http://www.itc.es/es/>
- [42] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. 2012. Plan regional de infraestructura y gestión del recurso hídrico al 2021. Región del Libertador General Bernardo O’Higgins. : 183.
- [43] CRITTENDEN, John C. et al. 1999. A kinetic model for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV process in a completely mixed batch reactor. *Water Research* [en línea]. 33(10): 2315–2328. ISSN 00431354. 10.1016/S0043-1354(98)00448-5
- [44] AFONSO-OLIVARES, C. et al. 2016. Estimation of kinetic parameters and UV doses necessary to remove twenty-three pharmaceuticals from pre-treated urban wastewater by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* [en línea]. 329: 130–138. ISSN 10106030. 10.1016/j.jphotochem.2016.06.018
- [45] VILHUNEN, Sari et al. 2010. Removal of organic matter from a variety of water matrices by UV photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> method. *Journal of Hazardous Materials* [en línea]. 179(1–3): 776–782. ISSN 03043894. 10.1016/j.jhazmat.2010.03.070
- [46] COLOMINA MONTAVA, Jordi. 2016. Diseño de una planta desalinizadora con sistema de osmosis inversa para producir. Universidad Técnica de Valencia.
- [47] DOW. Módulos DOW de Ultrafiltración: Manual de producto [en línea]. 2013. ISBN 0390044601. <https://cache.industry.siemens.com/dl/files/629/8859629/att\_55798/v1/s7300\_module\_data\_manual\_es-ES\_es-ES.pdf>
- [48] THE DOW CHEMICAL COMPANY. DOW FILMTEC™ BW30HR-440 [en línea]. <http://www.dow.com/en-us/markets-and-solutions/products/dowfilmtecbrackishwaterreverseosmosis8elements/dowfilmtecbw30hr440> [consulta: 5 marzo 2017].
- [49] COMPANY, The Dow Chemical. 2015. Product Data Sheet DOW FILMTEC™ BW30HR-440 Element Description Ideal for : reverse osmosis plant managers and operators dealing with controlled pre-treatment waters and seeking consistency , high performance , long element life , increase productivity ,. (609): 1–2.
- [50] RUIZ, Fernando Ruiz. sin fecha. Dimensionamiento unidad de ósmosis inversa.



- [51] What is Reverse Osmosis? | Puretec Industrial Water [en línea]. <<http://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis#recovery>> [consulta: 15 marzo 2017].
- [52] PÚBLICAS, MINISTERIO DE OBRAS. FIJA TIEMPO MINIMO DE CONTACTO CLORO-AGUA EN SERVICIOS PUBLICOS DE AGUA POTABLE. 1995
- [53] AGENCY, Environmental Protection. 1986. Design Manual Municipal Wastewater Disinfection. (October).
- [54] LARICO JUAN DE DIOS, MONTALVO MAXIMO. 2016. Mediciones De Radiacion Uv En La Ciudad De Puno. : 72.
- [55] THE DOW CHEMICAL COMPANY. ROSA Software | Dow Water & Process Solutions [en línea]. <<http://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/resources/design-software/rosa-software>> [consulta: 23 marzo 2017].
- [56] AYLWIN, Camila et al. Aguas Yaxma. 2016
- [57] GORDILLO, Enrique. 2012. Investigacion tecnica y economica sobre desinfeccion de aguas residuales por sistemas de oxidacion.
- [58] PVDF Membrana De Fibra Hueca De Ultrafiltración UF precio de planta de tratamiento de agua mineral/agua filtro de membrana-Tratamientos de Agua-Identificación del producto:60494925928-spanish.alibaba.com [en línea]. <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/pvdf-uf-membrane-hollow-fiber-ultrafiltration-membrane-price-for-mineral-water-treatment-plant-water-filter-membrane-60494925928.html>> [consulta: 23 marzo 2017].
- [59] Matches' Tank cost - API, horizontal, vertical, cone roof, bottom, flat bottom, round end. [en línea]. <<http://www.matche.com/equipcost/Tank.html>> [consulta: 23 marzo 2017].
- [60] Fuente de la fábrica de alta calidad a granel de Peróxido de Hidrógeno [en línea]. <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/factory-supply-high-quality-bulk-hydrogen-peroxide-7722-84-1-with-reasonable-price-and-fast-delivery--60290648729.html>> [consulta: 24 marzo 2017].
- [61] Cloro gas [en línea]. <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/chlorine-gas-with-the-best-price-1864162547.html>> [consulta: 24 marzo 2017].
- [62] HARTMANN, Federico et al. 2016. CAPEX , OPEX y Flujo de Caja [en línea]. : 17. <[https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2016/1/IQ6702/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=1383537](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2016/1/IQ6702/1/material_docente/bajar?id_material=1383537)>
- [63] ENEL. ¿Cuál es el valor del kWh? [en línea]. <<https://www.eneldistribucion.cl/preguntas-frecuentes/valor-kwh>> [consulta: 24 marzo 2017].
- [64] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. 2012. Decreto con Fuerza de Ley 382: Ley General de Servicios Sanitarios [en línea]. <<https://www.leychile.cl/N?i=5545&f=2014-10-10&p=>>>
- [65] Cargo Fijo - SISS - Superintendencia de Servicios Sanitarios - Gobierno de Chile [en línea]. <<http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-3816.html>> [consulta: 17 marzo 2017].
- [66] JE, Angel. CALCULO Y FIJACIÓN DE TARIFAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO SANITARIO EN 4 PAISES MIEMBROS DE ADERASA

- [67] GENERAL, Contraloria et al. 2012. Decreto Tarifario ESSBIO.
- [68] ESSBIO. 2016. Tarifas para las localidades de Rancagua, San Fernando, Graneros, Machalí, Rengo [en línea]. : 130. <[http://www.siss.gob.cl/577/articles-4682\\_ESSBIO\\_VI\\_G2\\_Abr\\_2015.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-4682_ESSBIO_VI_G2_Abr_2015.pdf)>
- [69] Presión de agua potable - SISS - Superintendencia de Servicios Sanitarios - Gobierno de Chile [en línea]. <<http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-3841.html>> [consulta: 22 marzo 2017].
- [70] SOUZA, Sachi De et al. 2011. Guidelines for Preparing Economic Analysis for Water Recycling Projects. (April).
- [71] SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS. Impuestos Directos [en línea]. <[http://www.sii.cl/aprenda\\_sobre\\_impuestos/impuestos/imp\\_directos.htm](http://www.sii.cl/aprenda_sobre_impuestos/impuestos/imp_directos.htm)> [consulta: 30 marzo 2017].
- [72] SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS. DOLAR OBSERVADO 2017 [en línea]. <<http://www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2017.htm>> [consulta: 30 marzo 2017].
- [73] AGUAS, Direccion General D E. 2010. Diagnóstico De Calidad De Aguas Estero La Cadena , Región Del Libertador General Bernardo O â€™ Higgins.
- [74] Google Earth [en línea]. <<https://www.google.com/intl/es/earth/>> [consulta: 4 mayo 2017].
- [75] arsenico [en línea]. <<http://www.lenntech.es/arsenico.htm>> [consulta: 10 mayo 2017].
- [76] BARTELS, C R et al. 2005. Design considerations for wastewater treatment by reverse osmosis. Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research. 51(6-7): 473-482. ISSN 0273-1223.
- [77] Sin fecha. Sanitarios|Servicios|BioBio|Agua Potable [en línea]. [consulta: 27 marzo 2017]. <[https://www.essbio.cl/hogar/sobreconsumo\\_de\\_agua\\_potable.php](https://www.essbio.cl/hogar/sobreconsumo_de_agua_potable.php)>

# ANEXOS

## A. CICLO DEL AGUA EN SINGAPUR

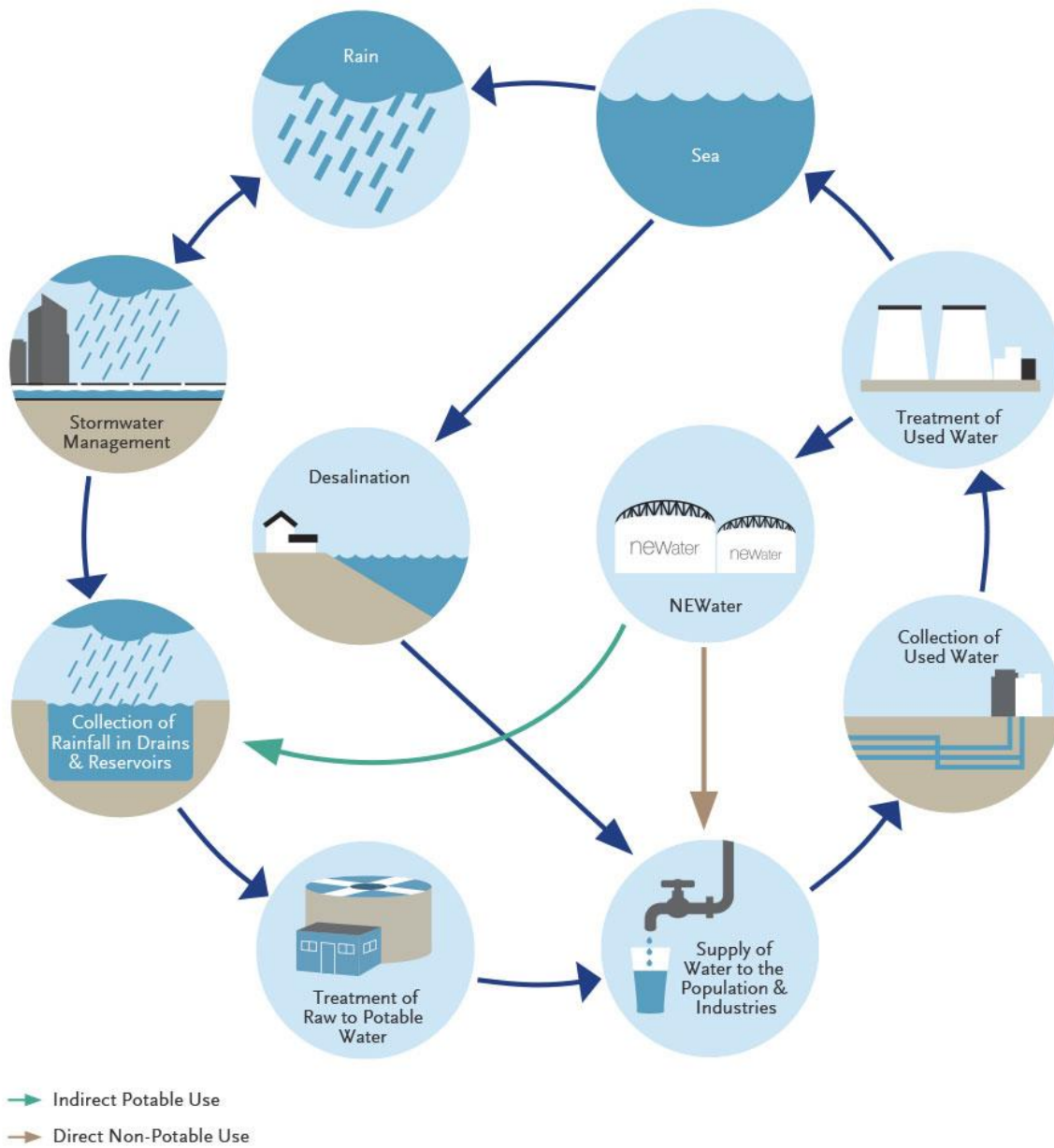


Figura 26: Ciclo del agua en Singapur[12].

## B. PUNTOS Y APLICACIONES DEL AGUA RECICLADA EN LA CIUDAD DE SÍDNEY



Figura 27: Mapa de Sídney con puntos de utilización de aguas recicladas[29].

## C. PROCESO DE RECICLAJE DE AGUAS EN SINGAPUR

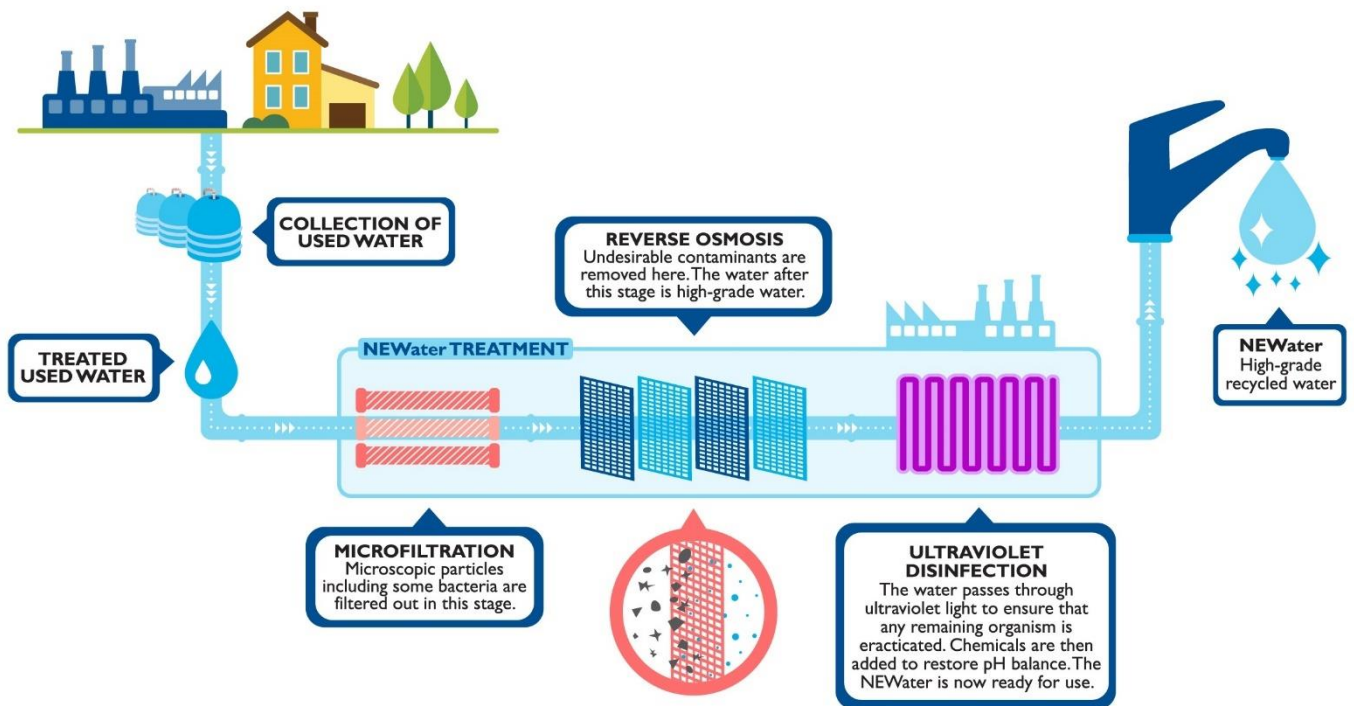


Figura 28: Producción de agua reciclada en Singapur[13].

## D. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RECICLADA EN SINGAPUR

Tabla 19: Parámetros de calidad del agua reciclada de Singapur (NEWater)[13]

PUB NEWater Quality (Typical value)			
Characteristics	Unit	WHO 2011 GV (4th Edition )	Typical value
Microbiological Parameter			
<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> )	cfu/100ml	<1	<1
Heterotrophic Plate Count (HPC)	cfu/mL	-	<1
Physical Parameters			
Colour	Hazen	-	<5
Conductivity	uS/cm	-	<250
pH Value	Units	-	7.0-8.5
Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	-	<150
Turbidity	NTU	5	<5
Chemical Parameters			
Ammonia (as N)	mg/L	-	<1.0
Aluminium	mg/L	-	<0.1
Barium	mg/L	0.7	<0.1
Boron	mg/L	2.4	<0.5
Calcium	mg/L	-	4-20
Chloride	mg/L	-	<20
Copper	mg/L	2	<0.05
Fluoride	mg/L	1.5	<0.5
Iron	mg/L	-	<0.04
Manganese	mg/L	-	<0.05
Nitrate (as N)	mg/L	11	<15
Sodium	mg/L	-	<20
Sulphate	mg/L	-	<5
Silica (as SiO <sub>2</sub> )	mg/L	-	<3
Strontium	mg/L	-	<0.1
Total Trihalomethanes Ratio		<1	<0.04
Total Organic Carbon (TOC)	mg/L	-	<0.5
Total Hardness (as CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	-	<50
Total Residual Chlorine	mg/L	5	<2
Zinc	mg/L	-	<0.1

## E. LÍMITES MÁXIMOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LÍQUIDOS A CUERPOS FLUVIALES

Tabla 20: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en cuerpos fluviales[20] [1]

<b>LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES</b>			
<b>Contaminante</b>	<b>Unidad</b>	<b>Expresión</b>	<b>Límite máximo permitido</b>
<b>Aceites y Grasas</b>	mg/L	A y G	20
<b>Aluminio</b>	mg/L	Al	5
<b>Arsénico</b>	mg/L	As	0,5
<b>Boro</b>	mg/L	B	0,75
<b>Cadmio</b>	mg/L	Cd	0,01
<b>Cianuro</b>	mg/L	CN-	0,2
<b>Cloruros</b>	mg/L	Cl-	400
<b>Cobre Total</b>	mg/L	Cu	2
<b>Coliformes Fecales o termotolerantes</b>	NMP/100 ml	Coli/100ml	1000
<b>Índice de Fenol</b>	mg/L	Fenoles	0,5
<b>Cromo Hexavalente</b>	mg/L	Cr6+	0,05
<b>DBO5</b>	mg O2/L	DBO5 35	35*
<b>Fósforo</b>	mg/L	P	10
<b>Fluoruro</b>	mg/L	F-	1,5
<b>Hidrocarburos Fijos</b>	mg/L	HF	10
<b>Hierro Disuelto</b>	mg/L	Fe	5
<b>Manganeso</b>	mg/L	Mn	0,3
<b>Mercurio</b>	mg/L	Hg	0,001
<b>Molibdeno</b>	mg/L	Mo	1
<b>Níquel</b>	mg/L	Ni	0,2
<b>Nitrógeno Total Kjeldahl</b>	mg/L	NKT	50
<b>Pentaclorofenol</b>	mg/L	C6OHCL5	0,009
<b>PH</b>	Unidad	pH	6,0-8,5
<b>Plomo</b>	mg/L	Pb	0,05
<b>Poder Espumógeno</b>	mm	PE	7
<b>Selenio</b>	mg/L	Se	0,01
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	mg/L	SS	80*
<b>Sulfatos</b>	mg/L	SO4 2-	1000
<b>Sulfuros</b>	mg/L	S2-	1
<b>Temperatura</b>	C°	T°	35
<b>Tetracloroetano</b>	mg/L	C2Cl4	0,04

<b>Tolueno</b>	mg/L	C6H5CH3	0,7
<b>Triclorometano</b>	mg/L	CHCl3	0,2
<b>Xileno</b>	mg/L	C6H4C2H6	0,5
<b>Zinc</b>	mg/L	Zn	3

## F. COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE EFLUENTES DE PTAS

Tabla 21:

Contaminante	Unidad	Expresión	Chile	Namibia	Singapur
			Límite máximo	Límite máximo	Límite máximo
<b>Aceites y Grasas</b>	mg/L	A y G	20	2,5	10
<b>Aluminio</b>	mg/L	Al	5		
<b>Arsénico</b>	mg/L	As	0,5	0,5	1
<b>Boro</b>	mg/L	B	0,75	1	5
<b>Cadmio</b>	mg/L	Cd	0,01	-	0,1
<b>Cianuro</b>	mg/L	CN-	0,2	0,5	0,1
<b>Cloruros</b>	mg/L	Cl-	400	0,1	600
<b>Cobre Total</b>	mg/L	Cu	2	1	0,1
<b>Coliformes Fecales o termotolerantes</b>	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000	0	
<b>Cromo Hexavalente</b>	mg/L	Cr6+	0,05	50	1
<b>DBO5</b>	mg O2/L	DBO5	35*	-	50
<b>Fluoruro</b>	mg/L	F-	1,5	1	
<b>Fósforo</b>	mg/L	P	10	1,0**	
<b>Hidrocarburos Fijos</b>	mg/L	HF	10		
<b>Hierro Disuelto</b>	mg/L	Fe	5	75	20
<b>Indice de Fenol</b>	mg/L	Fenoles	0,5	100	0,2
<b>Manganeso</b>	mg/L	Mn	0,3		5
<b>Mercurio</b>	mg/L	Hg	0,001		0,05
<b>Molibdeno</b>	mg/L	Mo	1	10	
<b>Níquel</b>	mg/L	Ni	0,2		1
<b>Nitrógeno Total Kjeldahl</b>	mg/L	NKT	50		
<b>Pentaclorofenol</b>	mg/L	C6OHCL5	0,009		
<b>PH</b>	Unidad	pH	6,0-8,5	5,5 - 9,5	6,0 - 9,0
<b>Plomo</b>	mg/L	Pb	0,05	1	0,1
<b>Poder Espumógeno</b>	mm	PE	7		
<b>Selenio</b>	mg/L	Se	0,01		0,5
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	mg/L	SS	80*	25	50
<b>Sulfatos</b>	mg/L	SO4 2-	1000		500
<b>Sulfuros</b>	mg/L	S2-	1	1	0,2
<b>Temperatura</b>	C°	T°	35	35	45



<b>Tetracloroetano</b>	mg/L	C2Cl4	0,04		
<b>Tolueno</b>	mg/L	C6H5CH 3	0,7		
<b>Triclorometano</b>	mg/L	CHCl3	0,2		
<b>Xileno</b>	mg/L	C6H4C2 H6	0,5		
<b>Zinc</b>	mg/L	Zn	3	5	1

## G. TAMAÑO DE PARTÍCULAS Y POROSIDAD PARA ULTRAFILTRACIÓN

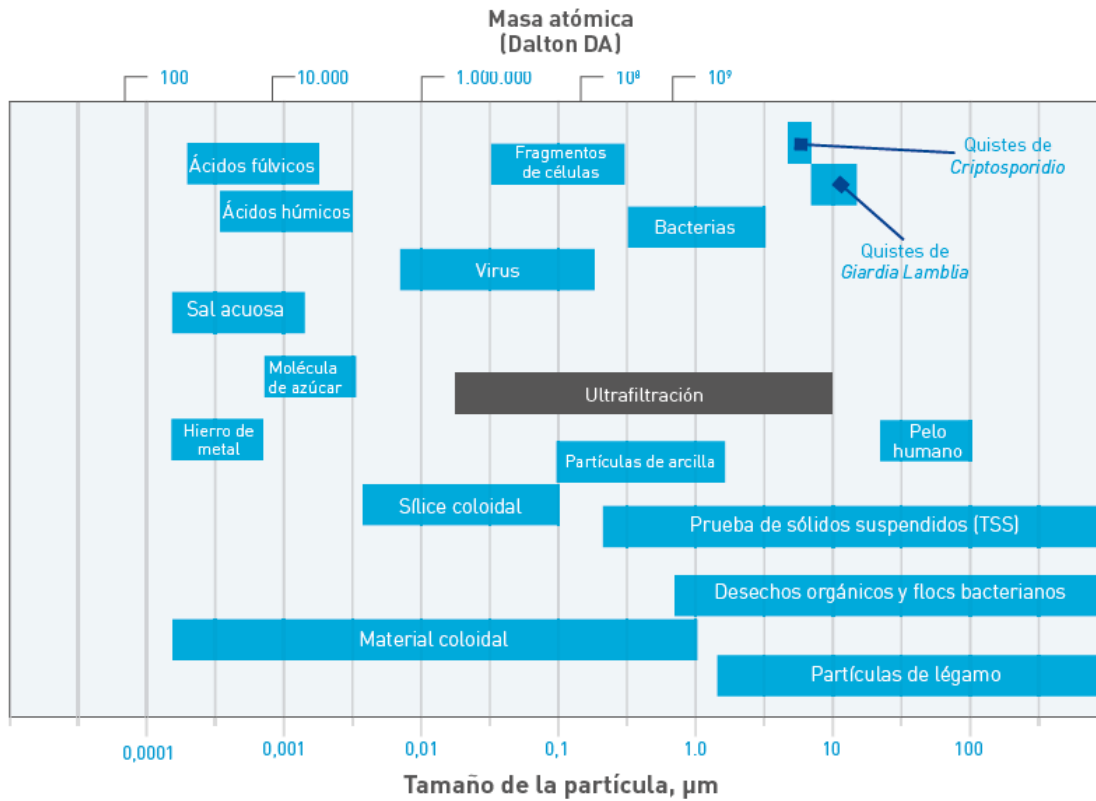


Figura 29: Tamaño de partículas y poros involucrados en la UF[38]

## H. BALANCE DE MASA

### H.1 Oxidación Avanzada

La etapa de oxidación avanzada del flujo de agua a tratar se representa con el siguiente esquema de bloques, indicando sus entradas y salidas:

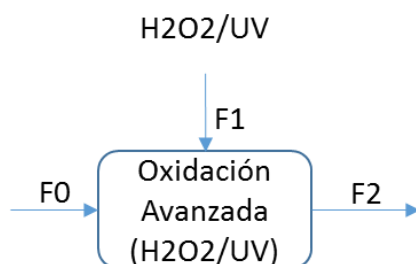
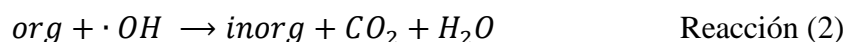


Figura 30: Diagrama de bloque oxidación avanzada

Esta etapa se caracteriza por la reacción del  $H_2O_2$  con los compuestos orgánicos presentes en el agua, reacciones catalizadas por la presencia de radiación UV. Las reacciones involucradas son:



Donde la ecuación (1) representa la disociación del peróxido de hidrógeno en dos radicales hidroxilo ( $\cdot OH$ ), mientras que la ecuación (2) representa la acción de los radicales sobre la materia orgánica para la formación de dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos. De esta forma, el balance de masa de la etapa queda de la forma:

$$0 = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

El flujo F0, correspondiente al efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas, posee la composición que se muestra a continuación:

Tabla 22: Composición flujo F0 [20]

Elemento	Unidad	Concentración	Masa [mg/s]	Masa [kg/s]
Aceites y Grasas	mg/L	20	7853	0,0079
Aluminio	mg/L	5	1963,25	0,0020
Arsénico	mg/L	0,5	196,325	0,0002
Boro	mg/L	0,75	294,4875	0,0003
Cadmio	mg/L	0,01	3,9265	0,0000
Cianuro	mg/L	0,2	78,53	0,0001

Cloruros	mg/L	400	157060	0,1571
Cobre Total	mg/L	2	785,3	0,0008
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	1000	392650	0,3927
Cromo Hexavalente	mg/L	0,05	19,6325	0,0000
DBO5	mg O2/L	35	13742,75	0,0137
Fluoruro	mg/L	1,5	588,975	0,0006
Fósforo	mg/L	10	3926,5	0,0039
Hidrocarburos Fijos	mg/L	10	3926,5	0,0039
Hierro Disuelto	mg/L	5	1963,25	0,0020
Índice de Fenol	mg/L	0,5	196,325	0,0002
Manganeso	mg/L	0,3	117,795	0,0001
Mercurio	mg/L	0,001	0,39265	0,0000
Molibdeno	mg/L	1	392,65	0,0004
Níquel	mg/L	0,2	78,53	0,0001
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	50	19632,5	0,0196
Pentaclorofenol	mg/L	0,009	3,53385	0,0000
Plomo	mg/L	0,05	19,6325	0,0000
Poder Espumógeno	mm	7	2748,55	0,0027
Selenio	mg/L	0,01	3,9265	0,0000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80	31412	0,0314
Sulfatos	mg/L	1000	392650	0,3927
Sulfuros	mg/L	1	392,65	0,0004
Tetracloroetano	mg/L	0,04	15,706	0,0000
Tolueno	mg/L	0,7	274,855	0,0003
Triclorometano	mg/L	0,2	78,53	0,0001
Xileno	mg/L	0,5	196,325	0,0002
Zinc	mg/L	3	1177,95	0,0012
Sólidos disueltos totales	mg/L	1000	392650	0,3927

Los radicales  $\cdot OH$  reaccionarán con los compuestos orgánicos presentes en sólidos disueltos totales, hidrocarburos fijos, sólidos suspendidos totales y aquellos representados por la DBO<sub>5</sub>.

Así, el resultado de la reducción de compuestos orgánicos se observa en la Tabla 23:

Tabla 23: Reducción masa de compuestos orgánicos en agua

Elemento	Expresión	Entrada [kg/s]	Salida [kg/s]
DBO5	DBO5	0,0137	0,0003
Hidrocarburos Fijos	HF	0,0039	0,0001
Sólidos Suspendedos Totales	SS	0,0314	0,0006
Sólidos disueltos totales	SDT	0,3927	0,0079

## H.2 Ultrafiltración

En esta etapa se busca reducir en un 90% la presencia de sólidos y compuestos cuyo tamaño de partículas sea superior a los 0,02  $\mu\text{m}$  (Ver Anexo G).

El diagrama de bloques de la etapa se muestra en la Figura 31. Figura 31: Diagrama de bloques etapa de ultrafiltración

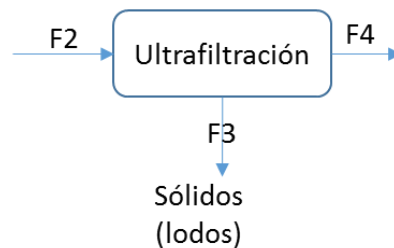


Figura 31: Diagrama de bloques etapa de ultrafiltración

De esta forma, considerando las características de operación de las membranas de ultrafiltración [38], se realiza el balance de masa de la etapa, los resultados de este se muestran en la Tabla 24, donde el flujo de sólidos está incluido en el flujo de entrada total a la etapa (F2), dado por la suma de los flujos de aceites y grasa, coliformes fecales, DBO5, hidrocarburos fijos, nitrógeno, SST, Sulfatos, compuestos generados en la OA.

Tabla 24: Balance de masa etapa de ultrafiltración

	Especie	Flujo	Valor	Unidad
<b>Entrada</b>	Agua_t1	F2	392,69005	kg/s
	Flujo de sólidos	-	1,24666375	kg/s
<b>Salida</b>	Permeado	F4	391,568053	kg/s
	Concentrado	F3	1,12199738	kg/s

La reducción en los flujos de sólidos retenidos por las membranas de ultrafiltración se muestra en la Tabla 25:

Tabla 25: Reducción sólidos etapa de ultrafiltración

Elemento	Entrada F1 [kg/s]	Salida F4 [kg/s]
Aceites y Grasas	0,007853	0,0007853
Coliformes Fecales	0,39265	0,039265
DBO5	0,00027486	2,7486E-05
Hidrocarburos Fijos	7,853E-05	7,853E-06
Nitrógeno Total Kjeldahl	0,0196325	0,00196325
Sólidos Suspendidos Totales	0,00062824	6,2824E-05
Inorgánicos	0,43289663	0,04328966

### H.3 Osmosis Inversa

Con la operación de la etapa de osmosis inversa (OI) se busca remover el 98% de microsolutos y sales en disolución [76]. El diagrama de bloques de la etapa se muestra en la Figura 32, donde F5 corresponderá al flujo de sólidos concentrados retenidos por la membrana de OI y F6 corresponde al flujo de permeado o agua tratada.

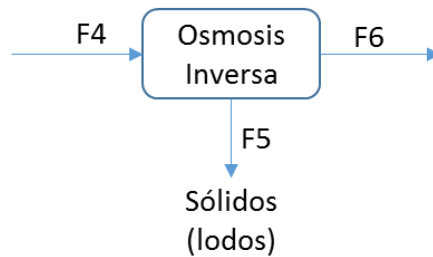


Figura 32: Diagrama de bloques etapa de osmosis inversa

En la Tabla 26 se muestra el balance de masa global de la etapa de OI, donde al igual que en la etapa de ultrafiltración, el flujo de sólidos corresponde a la suma de la masa de solutos contenidos en el flujo F4 que son retenidos por las membranas de OI.

Tabla 26: Resultados balance de masa osmosis inversa

	Especie	Flujo	Valor	Unidad
<b>Entrada</b>	Permeado	F4	391,568053	kg/s
	Flujo de sólidos	-	0,6584819	kg/s
<b>Salida</b>	Permeado OI	F6	390,922741	kg/s
	Concentrado OI	F5	0,64531226	kg/s

La reducción en masa de los flujos de solutos retenidos por las membranas de OI se muestra a continuación, en la Tabla 27:

Tabla 27: Reducción de solutos contenidos en F4

<b>Elemento</b>	<b>Entrada F4 [kg/s]</b>	<b>Salida F6 [kg/s]</b>
Aceites y Grasas	0,0007853	0,000015706
Aluminio	0,00196325	0,000039265
Arsénico	0,000196325	3,9265E-06
Boro	0,000294488	5,88975E-06
Cadmio	3,9265E-06	7,853E-08
Cianuro	0,00007853	1,5706E-06
Cloruros	0,15706	0,0031412
Cobre Total	0,0007853	0,000015706
Coliformes Fecales	0,039265	0,0007853
Cromo Hexavalente	1,96325E-05	3,9265E-07
DBO5	2,74855E-05	5,4971E-07
Fluoruro	0,000588975	1,17795E-05
Fósforo	0,0039265	7,853E-05
Hidrocarburos Fijos	7,853E-06	1,5706E-07
Hierro Disuelto	0,00196325	0,000039265
Indice de Fenol	0,000196325	3,9265E-06
Manganeso	0,000117795	2,3559E-06
Mercurio	3,9265E-07	7,853E-09
Molibdeno	0,00039265	7,853E-06
Níquel	0,00007853	1,5706E-06
Nitrógeno Total Kjeldahl	0,00196325	0,000039265
Pentaclorofenol	3,53385E-06	7,0677E-08
Plomo	1,96325E-05	3,9265E-07
Poder Espumógeno	0,00274855	0,000054971
Selenio	3,9265E-06	7,853E-08
Sólidos suspendidos totales	0,000062824	1,25648E-06
Sulfatos	0,39265	0,007853
Sulfuros	0,00039265	7,853E-06
Tetracloroetano	0,000015706	3,1412E-07
Tolueno	0,000274855	5,4971E-06
Triclorometano	0,00007853	1,5706E-06
Xileno	0,000196325	3,9265E-06
Zinc	0,00117795	0,000023559
Sólidos disueltos totales	0,007853	0,00015706
Inorgánicos	0,043289663	0,000865793

## H.4 Cloración

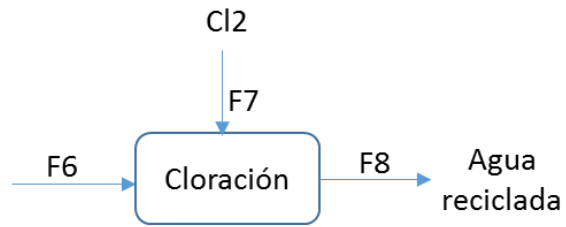


Figura 33: Diagrama de bloques etapa de cloración

Tabla 28: Balance de masa global etapa de cloración

	Especie	Flujo	Valor	Unidad
<b>Entrada</b>	Cloro (gas)	F7	0,000469843	kg/s
	Agua	F6	234,9215134	kg/s
<b>Salida</b>	Agua reciclada	F8	234,9219832	kg/s



## H.5 Balances de masa por elemento

Especies	Flujos											
	F0 [kg/s]	F1 [kg/s]	F2 [kg/s]	F3 [kg/s]	F4 [kg/s]	F5 [kg/s]	F6 [kg/s]	F7 [kg/s]	F8 [kg/s]	F9 [kg/s]	F10 [kg/s]	F11 [kg/s]
Aceites y Grasas	0,00785	0,00785	-	0,007853	0,000785	-	1,57E-05	-	-	1,57E-07	-	-
Aluminio	0,00196	0,00196	-	0,001963	0,001963	-	3,93E-05	-	-	3,93E-05	-	-
Arsénico	0,00020	0,00020	-	0,000196	0,000196	-	3,93E-06	-	-	3,93E-06	-	-
Boro	0,00029	0,00029	-	0,000294	0,000294	-	5,89E-06	-	-	5,89E-06	-	-
Cadmio	0,00000	0,00000	-	3,93E-06	3,93E-06	-	7,85E-08	-	-	7,85E-08	-	-
Cianuro	0,00008	0,00008	-	7,85E-05	7,85E-05	-	1,57E-06	-	-	1,57E-06	-	-
Cloruros	0,15706	0,15706	-	0,15706	0,15706	-	0,003141	-	-	0,003141	-	-
Cobre Total	0,00079	0,00079	-	0,000785	0,000785	-	1,57E-05	-	-	1,57E-05	-	-
Coliformes Fecales	0,39265	0,39265	-	0,39265	0,039265	-	0,000785	-	-	7,85E-06	-	-
Cromo Hexavalente	0,00002	0,00002	-	1,96E-05	1,96E-05	-	3,93E-07	-	-	3,93E-07	-	-
DBO5	0,01374	0,01374	-	0,000275	2,75E-05	-	5,5E-07	-	-	5,5E-09	-	-
Fluoruro	0,00059	0,00059	-	0,000589	0,000589	-	1,18E-05	-	-	1,18E-05	-	-
Fósforo	0,00393	0,00393	-	0,003927	0,003927	-	7,85E-05	-	-	7,85E-05	-	-
Hidrocarburos Fijos	0,00393	0,00393	-	7,85E-05	7,85E-06	-	1,57E-07	-	-	1,57E-07	-	-
Hierro Disuelto	0,00196	0,00196	-	0,001963	0,001963	-	3,93E-05	-	-	3,93E-05	-	-
Índice de Fenol	0,00020	0,00020	-	0,000196	0,000196	-	3,93E-06	-	-	3,93E-06	-	-
Manganeso	0,00012	0,00012	-	0,000118	0,000118	-	2,36E-06	-	-	2,36E-06	-	-
Mercurio	0,00000	0,00000	-	3,93E-07	3,93E-07	-	7,85E-09	-	-	7,85E-09	-	-
Molibdeno	0,00039	0,00039	-	0,000393	0,000393	-	7,85E-06	-	-	7,85E-06	-	-
Níquel	0,00008	0,00008	-	7,85E-05	7,85E-05	-	1,57E-06	-	-	1,57E-06	-	-
Nitrógeno Total Kjeldahl	0,01963	0,01963	-	0,019633	0,001963	-	3,93E-05	-	-	3,93E-05	-	-
Pentaclorofenol	0,00000	0,00000	-	3,53E-06	3,53E-06	-	7,07E-08	-	-	7,07E-08	-	-
Plomo	0,00002	0,00002	-	1,96E-05	1,96E-05	-	3,93E-07	-	-	3,93E-07	-	-
Poder Espumógeno	0,00275	0,00275	-	0,002749	0,002749	-	5,5E-05	-	-	5,5E-07	-	-
Selenio	0,00000	0,00000	-	3,93E-06	3,93E-06	-	7,85E-08	-	-	7,85E-08	-	-
Sólidos Suspendedos Totales	0,03141	0,03141	-	0,000628	6,28E-05	-	1,26E-06	-	-	1,26E-06	-	-
Sulfatos	0,39265	0,39265	-	0,39265	0,39265	-	0,007853	-	-	0,007853	-	-
Sulfuros	0,00039	0,00039	-	0,000393	0,000393	-	7,85E-06	-	-	7,85E-06	-	-
Tetracloroetano	0,00002	0,00002	-	1,57E-05	1,57E-05	-	3,14E-07	-	-	3,14E-07	-	-
Tolueno	0,00027	0,00027	-	0,000275	0,000275	-	5,5E-06	-	-	5,5E-06	-	-
Triclorometano	0,00008	0,00008	-	7,85E-05	7,85E-05	-	1,57E-06	-	-	1,57E-06	-	-
Xileno	0,00020	0,00020	-	0,000196	0,000196	-	3,93E-06	-	-	3,93E-06	-	-
Zinc	0,00118	0,00118	-	0,001178	0,001178	-	2,36E-05	-	-	2,36E-05	-	-
Sólidos Disueltos Totales	0,39265	0,39265	-	0,007853	0,007853	-	0,000157	-	-	1,57E-06	-	-
Cloro Residual	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,69E-05	-	-
Peróxido de Hidrógeno	-	-	0,007853	0,000157	0,000157	-	-	-	-	-	-	-
Cloro	-	-	-	-	-	-	-	-	0,000767	-	-	-
Inorgánicos	-	-	-	0,432897	0,432897	-	-	-	-	8,66E-06	-	-
Compuestos clorados	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,002581	-	-
Descartes	-	-	-	-	-	0,658482	-	0,645312	-	-	0,658	0,65
Agua	391,2229	391,2229	-	391,2229	391,2229	-	234,7337	156,4892	-	234,7337	-	156,49
Total	392,65	0	0,007853	392,6502	392,2712	0,658482	234,746	157,1345	0,000767	234,7477	0,658	157,13

# I. SIMULACIÓN MEMBRANAS DE OSMOSIS INVERSA

Reverse Osmosis System Analysis para Membranas FILMTEC™

ROSA 9.1 ConfigDB u399339\_282

Proyecto:Reciclaje

Caso:1

3/15/2017

## Información del Proyecto:

### Detalles del Sistema

Caudal de Alimentación a la 1ª Etapa	1400.00 m³/h	Caudal de Permeado Paso 1	3.82 m³/h	Presión Osmótica:	
Caudal de Agua Bruta al Sistema	1400.00 m³/h	Conversión Paso 1	0.27 %	Alimentación	0.37 bar
Presión de Alimentación	137.90 bar	Temperatura de Alimentación	25.0 C	Concentrado	0.37 bar
Factor de flujo	0.85	STD Alimentación	789.93 mg/l	Media	0.37 bar
Dosificación Química	Ninguno	Número de Elementos	1	NDP media	137.18 bar
Área Activa Total	40.88 M²	Flujo específico medio Paso 1	93.43 lmh	Potencia	6704.46 kW
Clasificación del Agua:Wastewater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5				Energía Especifica	1755.49 kWh/m³

Etapa	Elemento	Nº Cajas de presión	Nº Elementos	Caudal de Alimentación (m³/h)	Presión de Alimentación (bar)	Caudal de Recirculación (m³/h)	Caudal de concentrado (m³/h)	Presión del concentrado (bar)	Caudal de Permeado específico (m³/h)	Flujo medio (lmh)	Presión de Permeado (bar)	Presión de Booster (bar)	STD Permeado (mg/l)
1	BW30-440i	1	1	1400.00	137.55	0.00	1396.18	137.55	3.82	93.43	0.00	0.00	2.58

Figura 34:Datos obtenidos en la simulación de la etapa de Osmosis Inversa [55]

## J. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA PLANTA DE RECICLAJE DE AGUAS

### J.1 Cuenca del Río Rapel, encerrado en negro la subcuenca del Río Cachapoal

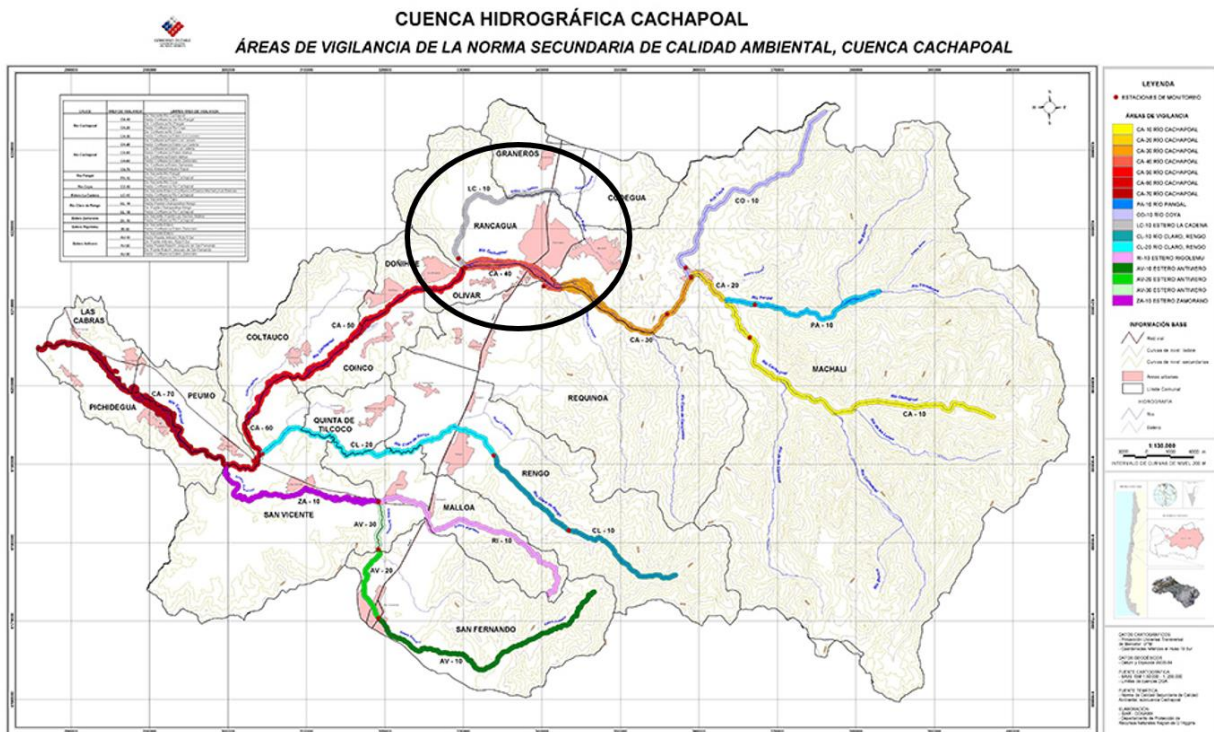


Figura 35: Mapa de la cuenca del Río Cachapoal

## J.2 Distancia entre planta de producción de agua potable y planta de tratamiento de aguas servidas



Figura 36: Vista satelital de la ciudad de Rancagua. A: Planta de tratamiento de aguas servidas B: Planta de producción de agua potable

### J.3 Perfil de elevación geográfica

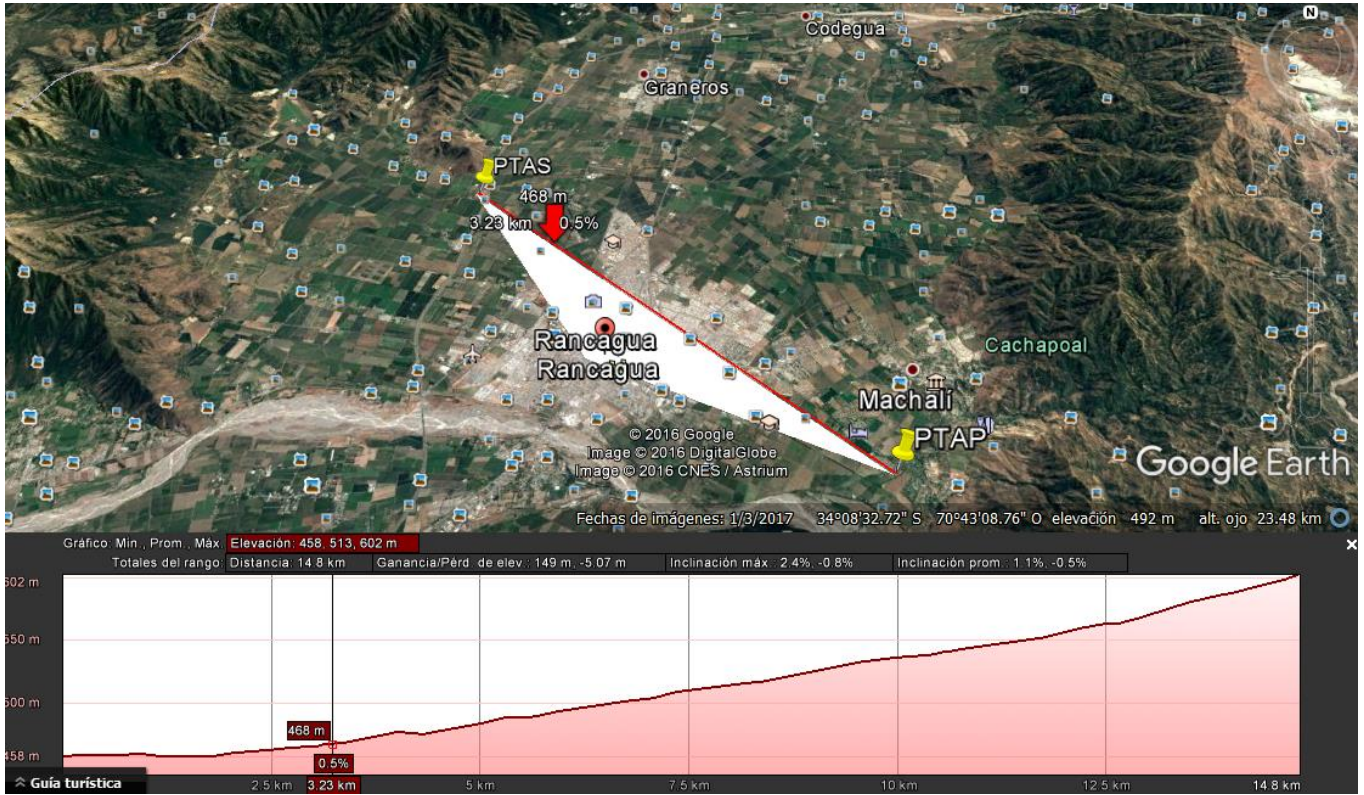


Figura 37: Vista satelital de la ciudad de Rancagua. En la parte inferior, perfil de elevación de la ruta entre la PTAS y PAP.

## K. FLUJO DE CAJA

### K.1 Flujo de caja escenario A

Tabla 29: Flujo de caja, costo del agua reciclada \$358/m<sup>3</sup>

Flujo de caja en CPL	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
(+) Ingresos por Agua reciclada		3474159025	3474159025	3474159025	3474159025	3474159025	3474159025	3474159025	3474159025	3474159025	3474159025
(+)											
(-) OPEX		-2647430196	-2647430196	-2647430196	-2647430196	-2647430196	-2647430196	-2647430196	-2647430196	-2647430196	-2647430196
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital											-188130233
(-) Depreciaciones		-246312839	-246312839	-246312839	-246312839,1	-246312839	-246312839	-246312839,1	-246312839	-246312839	-246312839
(-) Pérdidas ejercicio anterior		-6007033117					-1614945867				
(=) Utilidad antes de Impuesto	0	-5426617127	580415990	580415990	580415990	580415990	-1034529877	580415990	580415990	580415990	392285757
(-) Impuesto (24%)	0		-139299838	-139299838	-139299837,6	-139299838		-139299837,6	-139299838	-139299838	-94148581,7
(=) Utilidad después de Impuesto	0	-5426617127	719715828	719715828	719715827,6	719715828	-1034529877	719715827,6	719715828	719715828	486434339
(+) Depreciaciones		246312839	246312839	246312839	246312839,1	246312839	246312839	246312839,1	246312839	246312839	246312839
(-/+ ) Ganancias/pérdidas de Capital											
(+) Pérdida ejercicio anterior		6007033117	0	0	0	0	1614945867	0	0	0	0
(=) Flujo de caja Operacional	0	826728829	966028667	966028667	966028666,7	966028667	826728829	966028666,7	966028667	966028667	732747178
(-) Inversiones	-4764248337					-1926100398					
(-) IVA de la inversión	-857564701					-346698072					
(+) Recuperación del IVA de la inversión		857564701					-346698072				
(+) Valor Residual de los activos											879619,39
(-) Capital de trabajo	-385220080					-308176064					
(+) Recuperación del Capital de Trabajo											385220080
(=) Flujo de Capitales	-6007033117	857564701	0	0	0	-2580974533	-346698072	0	0	0	386099699
Flujo de caja Neto	-6007033117	1684293530	966028667	966028667	966028666,7	-1614945867	480030757	966028666,7	966028667	966028667	1118846877
VAN	\$-405.300.446,78										
TIR	4%										
Tasa de descuento	6%										
Tarifa de agua	470,79	CLP									
Flujo de agua reciclada	7379424	m <sup>3</sup> /año									

## K.2 Flujo de caja escenario B

Tabla 30: Flujo de caja, flujo de operación 3.708.591 m<sup>3</sup>/año

Flujo de caja en CLP	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
(+) Ingresos por Agua reciclada		1745967940	1745967940	1745967940	1745967940	1745967940	1745967940	1745967940	1745967940	1745967940	1745967940
(+)											
(-) OPEX		-2414810022	-2414810022	-2414810022	-2414810022	-2414810022	-2414810022	-2414810022	-2414810022	-2414810022	-2414810022
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital											-188130233
(-) Depreciaciones		-246312839	-246312839	-246312839	-246312839,1	-246312839	-246312839	-246312839,1	-246312839	-246312839	-246312839
(-) Pérdidas ejercicio anterior		-6007033117					-3469453796				
(=) Utilidad antes de Impuesto	0	-6922188037	-915154920	-915154920	-915154920,5	-915154920	-4384608716	-915154920,5	-915154920	-915154920	-1103285153
(-) Impuesto (24%)	0		219637181	219637181	219637180,9	219637181		219637180,9	219637181	219637181	264788437
(=) Utilidad después de Impuesto	0	-6922188037	-1134792101	-1134792101	-1134792101	-1134792101	-4384608716	-1134792101	-1134792101	-1134792101	-1368073590
(+) Depreciaciones		246312839	246312839	246312839	246312839,1	246312839	246312839	246312839,1	246312839	246312839	246312839
(-/+ ) Ganancias/pérdidas de Capital											
(+) Pérdida ejercicio anterior		6007033117	0	0	0	0	3469453796	0	0	0	0
(=) Flujo de caja Operacional	0	-668842081	-888479262	-888479262	-888479262,3	-888479262	-668842081	-888479262,3	-888479262	-888479262	-1121760751
(-) Inversiones	-4764248337					-1926100398					
(-) IVA de la inversión	-857564701					-346698072					
(+) Recuperación del IVA de la inversión		857564701					-346698072				
(+) Valor Residual de los activos											879619,39
(-) Capital de trabajo	-385220080					-308176064					
(+) Recuperación del Capital de Trabajo											385220080
(=) Flujo de Capitales	-6007033117	857564701	0	0	0	-2580974533	-346698072	0	0	0	386099699
<b>Flujo de caja Neto</b>	<b>-6007033117</b>	<b>188722619</b>	<b>-888479262</b>	<b>-888479262</b>	<b>-888479262,3</b>	<b>-3469453796</b>	<b>-1015540153</b>	<b>-888479262,3</b>	<b>-888479262</b>	<b>-888479262</b>	<b>-735661052</b>
VAN	\$-13.462.983.978,31										
TIR	#¡NUM!										
Tasa de descuento	6%										
Tarifa de agua	651,14	CPL									
Flujo de agua reciclada	3708591,815	m3/año									

# L. FLOWSHEET DEL PROCESO

