

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTUDIO DE VIABILIDAD DE PLANTAS
DESALADORAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA PARA CHILE: UN ENFOQUE INTEGRAL EN
TECNOLOGÍAS, ECONÓMICO Y RECURSOS
HÍDRICOS”**

Francisco Javier Pérez Chanique

MAGÍSTER EN ECONOMÍA ENERGÉTICA



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: ESTUDIO DE VIABILIDAD DE PLANTAS DESALADORAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CHILE: UN ENFOQUE INTEGRAL EN TECNOLOGÍAS, ECONÓMICO Y RECURSOS HÍDRICOS

Nombre del candidato(a): Francisco Javier Pérez Chanique

Carrera / Grado: Magister en Economía Energética

Campus: Vitacura Departamento: Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Rodrigo Rozas Valderrama** en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 06-11-2025

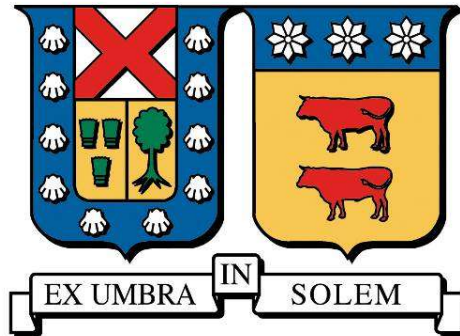
Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05-11-2025

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTUDIO DE VIABILIDAD DE PLANTAS
DESALADORAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA PARA CHILE: UN ENFOQUE INTEGRAL EN
TECNOLOGÍAS, ECONÓMICO Y RECURSOS
HÍDRICOS”**

Francisco Javier Pérez Chanique

MAGÍSTER EN ECONOMÍA ENERGÉTICA

AGOSTO 2025

TITULO DE LA TESINA:

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE PLANTAS DESALADORAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CHILE: UN ENFOQUE INTEGRAL EN TECNOLOGÍAS, ECONÓMICO Y RECURSOS HÍDRICOS

AUTOR:

Francisco Javier Pérez Chanique

TRABAJO DE TESINA, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Economía Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Profesor Guía **Rodrigo Rozas**

Nombre Profesor Correferente interno **Rossana Gaete**

Nombre Profesor Correferente externo **Cristian Bravo**

Agosto de 2025, Santiago, Chile.

ÍNDICE

ÍNDICE	3
ÍNDICE DE IMÁGENES	5
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE GRÁFICOS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
GLOSARIO.....	9
1. Introducción	10
2. Motivación.....	10
3. Objetivos	11
3.1 Objetivo general.....	11
3.2 Objetivos específicos	11
4. Metodología de trabajo	12
5. Estado del arte.....	13
5.1 Introducción general al consumo de agua y estatus de plantas desaladoras a nivel mundial y nacional.	13
5.2 Resumen de marco normativo que aplica para la implementación y operación de plantas desaladoras en Chile.....	19
5.3 Importancia de la desalinización como solución para la escasez de agua.	21
5.4 La salmuera y su impacto en el ecosistema marino.	22
5.5 Necesidades energéticas asociadas a la implementación de plantas desaladoras.	24
5.6 Ejemplo de plantas desaladoras en Chile y tipos de tecnologías de desalinización.	26
6. Desarrollo técnico de solución implementar plantas saladoras.....	30
6.1 Tipos de Aguas tratadas en plantas desaladoras.	30
6.2 Volúmenes de agua a considerar.	30
6.3 Definición de tecnología.....	32

6.4 Aspectos normativa y ambientales para plantas desaladoras.	34
6.5 Ubicación de plantas desaladoras	45
6.6 Proyecto de Ley N° 11.608-09 [9].....	46
6.7 Etapas y plazos para la instalación y operación de una planta desaladora en Chile.....	48
6.8 Costos generales y requerimientos energéticos.	50
6.9 Evaluación económica	56
7. CONCLUSIONES	80
8. REFERENCIAS	83
9. ANEXOS	86

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 Evolución de las extracciones de agua a nivel mundial, 1900-2018	14
Imagen 2 Generación de agua desaladoras al 2021 a nivel mundial	15
Imagen 3 Sistemas de recuperación de energía en plantas de osmosis inversa ..	24
Imagen 4 Diagrama de las principales etapas del proceso de desalinización	27
Imagen 5 Posicionamiento de estaciones para el monitoreo	43
Imagen 6 Avances del proyecto de Ley N° 11.608	48
Imagen 7 Flujo de actividades para implementación de planta desaladora en Chile	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Demanda hídrica consuntiva 2015, proyección 2030 y 2040	17
Tabla 2 Capacidad de plantas desaladoras operativas en Chile, visión actual y futura	22
Tabla 3 Costos de planta desaladora según tamaño	25
Tabla 4 Resumen demanda consuntiva 2015, proyección 2030 y 2040	31
Tabla 5 Resumen de parámetros de las dos principales tecnologías para plantas desaladoras	33
Tabla 6 Resumen de clases de agua	36
Tabla 7 Resumen de Tipos de clasificación de agua	37
Tabla 8 Parámetros específicos para agua potable	38
Tabla 9 Resumen de normativa para plantas desaladoras	44
Tabla 10 Superficie requerida para implementar planta desaladora de capacidad 1000 l/s	46
Tabla 11 Costos generales de planta desaladora	51
Tabla 12 Energía requerida para demanda de agua	52
Tabla 13 Valores anuales de energía de acuerdo con contratos PPA	55
Tabla 14 Detalle de composición CAPEX para una planta desaladora de capacidad 1000 l/s	58
Tabla 15 Costos agrupados del CAPEX	58
Tabla 16 Detalle de composición OPEX para una planta desaladora de capacidad 1000 l/s	59
Tabla 17 Costo anual de concesión marítima.	60
Tabla 18 Detalle de depreciación activos planta desaladora.	61
Tabla 19 Valores estimados de venta de agua potable normal y de plantas desaladoras	62
Tabla 20 Flujo de caja para proyecto de planta desaladora de 1000 l/s.	63

Tabla 21 Indicadores económicos proyecto planta desaladora.....	64
Tabla 22 Análisis de flujo de caja para el VAN igual a 0 USD.....	65
Tabla 23 Resultados del primer análisis de sensibilidad VAN.....	65
Tabla 24 Resultados del primer análisis de sensibilidad TIR.	66
Tabla 25 Resultados de segundo análisis de sensibilidad del VAN.	67
Tabla 26 Resultados del segundo análisis de sensibilidad TIR.....	67
Tabla 27 Resultados costo unitarios para una planta de 1000n l/s.	68
Tabla 28 Comparación de valores unitarios con otros proyectos.	69
Tabla 29 Cantidad de plantas desaladoras requeridas para abordar demanda de agua por región.	70
Tabla 30 Demanda de agua requeridas para abordar requerimientos de agua a nivel nacional por tipo de uso.	71
Tabla 31 Cantidad de plantas desaladoras requeridas para abordar la demanda de agua nivel nacional por tipo de uso.	72
Tabla 32 Valores CAPEX, OPEX y costo unitario para diferentes tipos de agua generada por planta desaladora.....	74
Tabla 33 Costo de implementación de plantas desaladoras a nivel nacional.	75
Tabla 34 Costo de implementación de plantas desaladoras segregado por región y por grupo de interés a nivel nacional.....	76
Tabla 35 Mecanismos de financiamientos para un proyecto por aporte social.	78
Tabla 36 Indicadores financieros flujo de caja social.	79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Distribución de demanda de agua consultiva en Chile año 2017	16
Gráfico 2 Demanda hídrica consuntiva 2015, proyección 2030 y 2040.....	18
Gráfico 3 Capacidad instalada y plantas operativas de desalinización a nivel mundial, con recuadro según tecnología.....	32

RESUMEN

Este estudio evalúa la viabilidad de implementar plantas desaladoras como solución integral al déficit hídrico en Chile, considerando dimensiones tecnológicas, energéticas, económicas, ambientales y normativas. En un contexto de cambio climático y creciente presión sobre las fuentes continentales, la desalinización emerge como una alternativa estratégica para asegurar el abastecimiento sostenible de agua potable e industrial.

Se analizó la demanda actual y futura de agua, las tecnologías disponibles - con énfasis en la ósmosis inversa - los requerimientos energéticos, la factibilidad económica y las principales barreras normativas. La metodología incluyó revisión bibliográfica, análisis de datos oficiales y casos nacionales.

Chile cuenta con 38 plantas en operación (8.558 l/s), concentradas en el norte. Para 2030, se proyecta que esta capacidad deberá cuadruplicarse, impulsada por los sectores urbano, industrial y minero en regiones críticas como Antofagasta, Atacama, Coquimbo y Valparaíso. La ósmosis inversa destaca por su eficiencia energética (3–4 kWh/m³), compatibilidad con energías renovables y costos competitivos (0,50–2,50 USD/m³). La integración de fuentes como solar y eólica permitiría reducir emisiones y costos operacionales, incluso sin operación continua.

Entre los desafíos, destaca la gestión de salmuera y las brechas normativas. Si bien no se considera residuo peligroso, la salmuera requiere de un tratamiento adecuado. Además, se identifican oportunidades en su valorización química. En el plano regulatorio, persisten vacíos en torno a concesiones marítimas, permisos ambientales, y la naturaleza jurídica del agua desalada. A pesar de avances como la Ley N° 21.586, como amplía los plazos establecidos en la Ley N° 21.435 para regularizar derechos de aprovechamiento de aguas, otorgando mayor flexibilidad a los usuarios para cumplir con sus obligaciones., se requiere mayor coordinación institucional y claridad legal.

En conclusión, la desalinización es una opción técnicamente factible y económicamente viable, que debe enmarcarse en una política pública nacional de largo plazo. Esta debe priorizar zonas estratégicas, fomentar la inversión público-privada, modernizar el marco normativo y garantizar estándares ambientales, contribuyendo así a la resiliencia hídrica y al desarrollo sostenible del país.

Este estudio entrega una base sólida para orientar la toma de decisiones en el diseño de una estrategia nacional de desalinización, con foco en la resiliencia hídrica, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo tecnológico del país.

ABSTRACT

This study assesses the feasibility of implementing desalination plants as a comprehensive solution to Chile's water scarcity, considering technological, energy-related, economic, environmental, and regulatory dimensions. In the context of climate change and increasing pressure on continental water sources, desalination emerges as a strategic alternative to ensure the sustainable supply of potable and industrial water.

The current and future water demand was analyzed, along with available desalination technologies—emphasizing reverse osmosis—energy requirements, economic viability, and key regulatory barriers. The methodology included literature review, analysis of official data, and national case studies.

Chile currently has 38 operational desalination plants (8,558 l/s), mostly concentrated in the northern regions. By 2030, it is projected that this capacity must quadruple, driven by the urban, industrial, and mining sectors in critical regions such as Antofagasta, Atacama, Coquimbo, and Valparaíso. Reverse osmosis stands out for its energy efficiency (3–4 kWh/m³), compatibility with renewable energy sources, and competitive costs (USD 0.50–2.50/m³). The integration of solar and wind energy could reduce both emissions and operational costs, even without continuous operation 24/7.

Among the main challenges are brine management and regulatory gaps. Although brine is not classified as hazardous waste, it requires proper discharge systems. There are also opportunities for brine valorization through chemical by-product recovery. On the regulatory front, unresolved issues remain regarding maritime concessions, environmental permits, and the legal status of desalinated water. Despite recent advances such as Law No. 21,586, institutional coordination and legal clarity are still needed.

In conclusion, desalination is a technically feasible and economically viable option that should be embedded in a long-term national public policy. Such a policy should define strategic priority zones, promote public-private investment, modernize the regulatory framework, and ensure appropriate environmental standards—thus contributing to the country's water resilience and sustainable development.

This study provides a solid foundation to support decision-making in the design of a national desalination strategy, with a focus on water resilience, environmental sustainability, and technological advancement.

GLOSARIO

MEE	Magíster en Economía Energética
DIMEC	Departamento de Ingeniería Mecánica
USM	Universidad Técnica Federico Santa María
SEIA	Sistema de evaluación de impacto ambiental
CdA	Código de Aguas
DGA	Dirección General de Aguas
DAA	Derechos de aprovechamiento de aguas (DAA)
DS	Decreto supremo
ACADES	Asociación Chilena de Desalinización
OI	Ósmosis inversa
OF	Ósmosis forzada
MSF	Multi-Stage Flash
MED	Multi-Effect Distillation
VC	Vapor Compression
ED	Electrólisis
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
SONAMI	Sociedad Nacional de Minería
BCN	Biblioteca del Congreso Nacional
NCh	Norma Chilena
Minciencia	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile

1. INTRODUCCIÓN

Chile enfrenta una creciente demanda de agua en un contexto de recursos hídricos cada vez más limitados. Este desafío se ha intensificado debido a fenómenos climáticos y a la presión sobre las fuentes de agua que vayan de la mano con el crecimiento del país, lo que obliga a considerar soluciones alternativas. Una de las propuestas más prometedoras es la implementación de plantas desaladoras, las cuales permiten producir agua a partir del agua de mar.

Este documento tiene como objetivo evaluar la viabilidad de implementar plantas desaladoras en Chile, considerando no solo los aspectos tecnológicos, sino también los requerimientos energéticos y los costos económicos involucrados. Para ello, se analizarán las tecnologías de desalinización, el potencial de integración con las diferentes fuentes de energía y las implicaciones ambientales y económicas de su instalación a gran escala. Este enfoque permitirá proponer soluciones adaptadas a la realidad chilena, garantizando un suministro sostenible de agua a largo plazo, dando sustento al crecimiento del país.

2. MOTIVACIÓN

Chile enfrenta un desafío importante en el suministro de agua, estrechamente vinculado a su crecimiento y desarrollo. Para sostener la senda del progreso y garantizar un abastecimiento confiable a los distintos sectores productivos y a la población, es fundamental evaluar opciones que permitan un suministro permanente y sostenible. Asegurar este recurso esencial es clave para brindar estabilidad y evitar que la disponibilidad de agua se convierta en una limitante para el desarrollo del país.

Las tecnologías de desalinización juegan un papel crucial en la diversificación de las fuentes de abastecimiento hídrico, especialmente cuando se integran con energías renovables. Esta combinación no solo permite mejorar la eficiencia del proceso, sino que también contribuye a la reducción de costos operativos y del impacto ambiental asociado a la producción de agua potable.

La implementación de plantas desaladoras representa una estrategia viable para fortalecer la seguridad hídrica en Chile. Su estudio abarca aspectos tecnológicos, económicos y de infraestructura, elementos esenciales para garantizar un suministro confiable y sostenible a largo plazo, promoviendo así el desarrollo industrial y social del país.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Realizar un estudio de viabilidad en implementación de plantas desaladoras en Chile que permita cubrir las necesidades de agua potable del país, considerando las tecnologías actuales, así como las implicancias energéticas y ambientales.

3.2 Objetivos específicos

- Analizar los consumos actuales y proyectar las necesidades futuras de agua potable en Chile, considerando el consumo humano e industrial, con el fin de identificar las tendencias y desafíos que deben abordarse para implementar plantas desaladoras.
- Evaluar las principales tecnologías de desalinización disponibles, analizando su eficiencia, costos operativos, impacto ambiental y sostenibilidad, con el objetivo de identificar las más adecuadas para el contexto país. Revisar la normativa vigente que rige los proyectos de plantas desaladoras.
- Dimensionar las necesidades energéticas asociadas a la desalinización, explorando el potencial de integración con fuentes de energía renovables y evaluar la viabilidad de los espacios geográficos adecuados para la instalación de estas plantas.
- Evaluar la viabilidad económica, considerando los costos de inversión, operativos y de mantenimiento, además de los beneficios a largo plazo, y su impacto en el desarrollo sostenible del país.

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se llevará a cabo una revisión del estado del arte en tecnologías de desalinización, y se revisará la situación actual y proyección a futuro de los consumos de agua.

Se revisará la bibliografía técnica y académica relevante para desarrollar este estudio de acuerdo con los objetivos específicos.

A partir del análisis de la información recopilada, se identificarán y caracterizarán las tecnologías desaladoras, identificando los criterios que permitan identificar las tecnologías más adecuadas para Chile y su viabilidad técnica para su implementación.

Se realizará un análisis de la viabilidad económica de las plantas desaladoras en Chile, considerando tanto los costos iniciales de inversión como los costos operativos y de mantenimiento. Se estudiarán los beneficios económicos a largo plazo, especialmente su impacto en el desarrollo sostenible del país.

De acuerdo con las proyecciones de demandas de agua evaluadas anteriormente, se dimensionará las necesidades energéticas de las plantas desaladoras requeridas en Chile. Este análisis permitirá evaluar el impacto de la desalinización en el consumo energético del país considerando el costo de suministrar la energía requerida.

Con base en los análisis anteriores, se propondrán recomendaciones para la implementación de plantas desaladoras en Chile.

5. ESTADO DEL ARTE

5.1 Introducción general al consumo de agua y estatus de plantas desaladoras a nivel mundial y nacional.

a) Estatus mundial.

Según la UNESCO [1], en las últimas cuatro décadas, el uso global del agua ha registrado un crecimiento cercano al 1 % anual, siendo más pronunciado en países de ingresos medios y bajos. Este incremento se debe a factores como el aumento de la población, el desarrollo socioeconómico y los cambios en los hábitos de consumo. Las regiones con las mayores tasas de extracción de agua per cápita incluyen a Norteamérica y Asia Central. Durante el periodo de 2010 a 2018, las extracciones de agua para el consumo humano aumentaron un 3 %, mientras que las destinadas a la agricultura crecieron un 5 %, alcanzando el 72 % del total de extracciones a nivel global. En contraste, el uso de agua en el sector industrial disminuyó un 12%, principalmente gracias a mejoras en la eficiencia de los sistemas de refrigeración utilizados en la producción de energía térmica, lo que permitió una reducción significativa en el consumo de agua en este ámbito.

En la evolución de las extracciones de agua a nivel mundial entre los años 1900 y 2018, se observa un aumento sostenido en la demanda de agua durante el siglo XX, especialmente desde la década de 1950, donde se produce un crecimiento más acelerado. En términos de volumen total, las extracciones pasaron de menos de 1.000 km³/año en 1900 a cerca de 4.000 km³/año en 2018, lo que representa un aumento de aproximadamente 4 veces en algo más de un siglo, ver imagen 1.

El sector agrícola ha sido históricamente el mayor consumidor de agua y continúa representando la mayor proporción de las extracciones globales. Sin embargo, desde mediados del siglo XX se observa un incremento notable en los volúmenes destinados a la industria y al consumo municipal, reflejando el crecimiento urbano e industrial de las últimas décadas.

A partir del año 2000, el ritmo de crecimiento de las extracciones totales comienza a estabilizarse, lo que podría estar asociado a mejoras en la eficiencia, cambios en los patrones de consumo y mayor conciencia sobre la sostenibilidad del recurso hídrico.

Esta tendencia confirma la creciente presión sobre los recursos hídricos a nivel global y resalta la importancia de implementar soluciones como la desalinización y el uso eficiente del agua, especialmente en contextos de estrés hídrico.

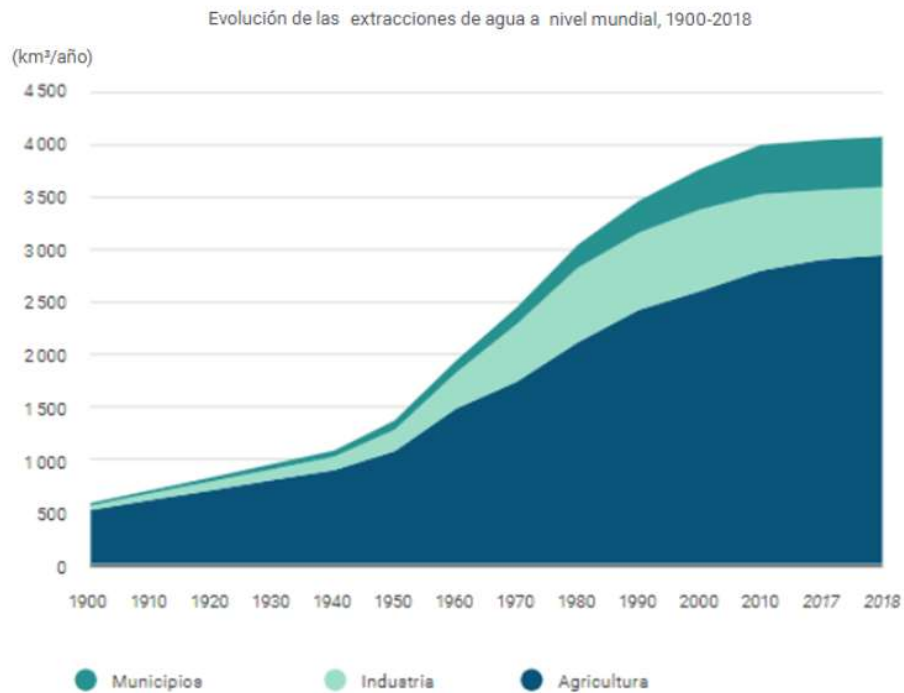


Imagen 1 Evolución de las extracciones de agua a nivel mundial, 1900-2018
2018. Fuente: UNESCO

De acuerdo con estudios realizados por SONAMI [2], el uso de plantas desaladoras es crucial para abordar el estrés hídrico creciente, particularmente en regiones áridas. Según datos de 2021, existen aproximadamente 20.000 plantas desaladoras en operación a nivel mundial, con una capacidad total de producción de 100 millones de metros cúbicos diarios. De estas, alrededor de 9.000 plantas están dedicadas a la desalinización de agua de mar. Las restantes 11.000 plantas se enfocan en el tratamiento de agua salobre, que incluye aguas subterráneas con altos niveles de salinidad y otras fuentes de agua con concentraciones salinas inferiores a las del agua de mar.

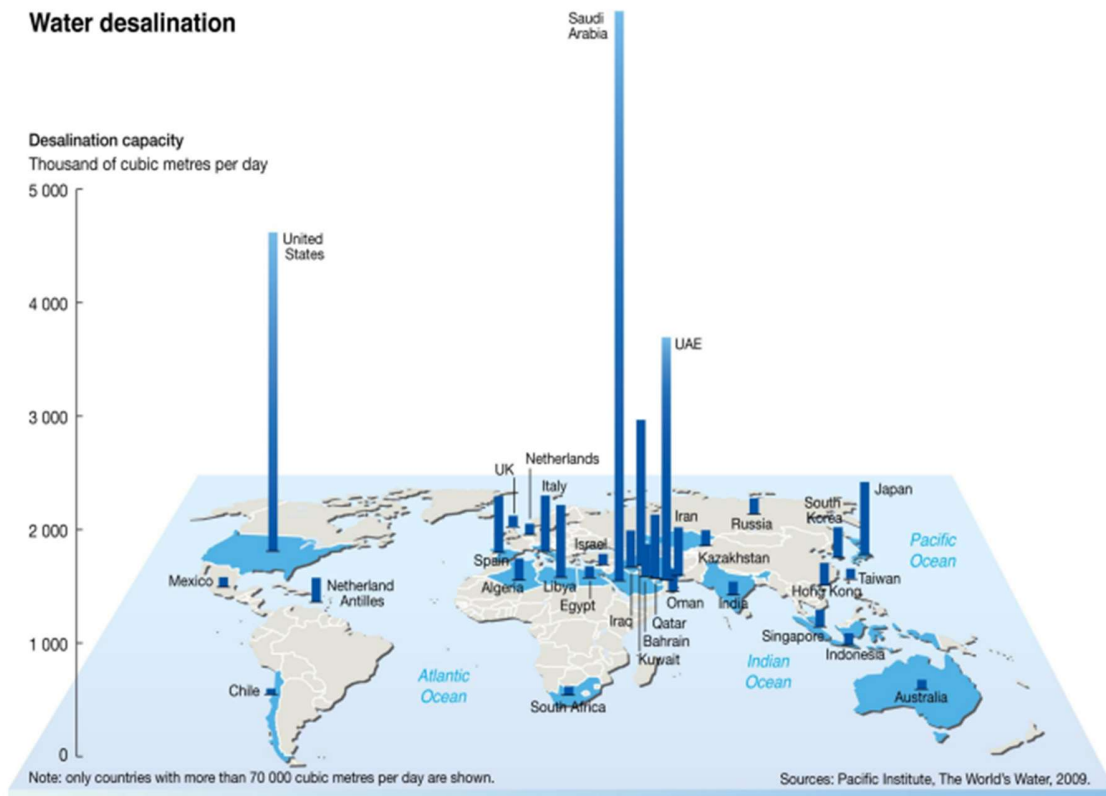


Imagen 2 Generación de agua desaladoras al 2021 a nivel mundial

Fuente: SONAMI

La imagen 2 muestra la capacidad de producción de agua mediante desalinización a nivel mundial (2009), destacando que Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos lideran en volumen, superando los 4 millones de m³/día en algunos casos. La concentración de plantas se da principalmente en regiones con escasez hídrica como Medio Oriente, Asia y zonas costeras de América y Europa.

Se proyecta un crecimiento significativo en la capacidad global de plantas desaladoras debido al incremento de la demanda de agua en zonas con recursos hídricos limitados. Se espera que esta capacidad se duplique para el año 2050, impulsada por la creciente necesidad de agua potable en áreas áridas y costeras.

Este aumento estará particularmente marcado en regiones como el Medio Oriente y el norte de África, donde países como Arabia Saudita ya lideran en la producción de agua desalinizada. Además, la tendencia hacia la utilización de energías renovables en las plantas desaladoras promete reducir su impacto ambiental y los

costos energéticos asociados

b) Estatus nacional.

De acuerdo con los estudios realizados por la DGA [3], los consumos de agua en Chile revelan que el sector agrícola es el principal demandante de recursos hídricos, con una utilización que alcanza entre el 72% del total del agua continental disponible. Este consumo se concentra en la irrigación de grandes superficies agrícolas. Por otro lado, la minería, aunque históricamente ha tenido un menor impacto en el consumo de agua dulce, está experimentando un cambio significativo hacia el uso de fuentes no convencionales como el agua desalada, lo que está reduciendo su dependencia del agua continental.

Con una población mayormente urbana, Chile ha declarado decretos de escasez hídrica en varias regiones afectadas por la prolongada sequía. Los sectores exportadores del país, como la minería, la industria y la agricultura, dependen intensamente del agua, lo que aumenta la presión sobre este recurso. Para garantizar la seguridad hídrica y mantener la competitividad global, es necesario invertir en infraestructura y tecnologías que permitan la migración hacia fuentes no convencionales de agua.

El gráfico 1 muestra cómo se compone la demanda de agua en Chile en el año 2017:

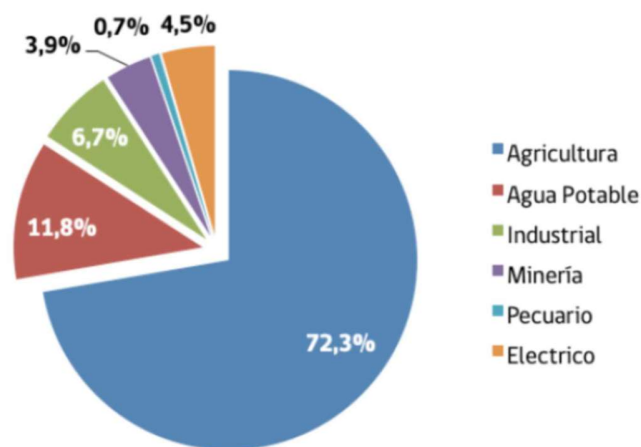


Gráfico 1 Distribución de demanda de agua consultiva en Chile año 2017

Fuente: DGA.

La distribución de consumo varía dependiendo de la región que se observe, el cual está sujeto a las fuentes de agua disponibles. En la tabla 1 se detalla la demanda por región, para el 2015 y las proyecciones para el 2030 y 2040 de acuerdo con los estudios generados por la DGA, el cual considera los siguientes actores: Agua potable urbano, Agua potable rural, agrícola, minero e industrial.

Tabla 1 Demanda hídrica consuntiva 2015, proyección 2030 y 2040

Fuente: Resumen Ejecutivo DGA [3]

Región	Demanda Hídrica (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
XV Arica y Parinacota	88	97	101
I Tarapacá	95	102	110
II Antofagasta	266	236	228
III Atacama	198	258	265
IV Coquimbo	486	760	833
V Valparaíso	1074	1103	1154
XIII Metropolitana	1959	2062	2173
VI O'Higgins	1796	1943	2071
VII Maule	2727	2431	2381
VII Biobío	1036	1095	1215
IX Araucanía	277	296	309
XIV Los Ríos	114	201	254
X Los Lagos	189	250	278
XI Aysén	13	13	15
XII Magallanes	22	25	26
TOTAL	10.339	10.874	11.413

Se presenta la información en formato gráfico.

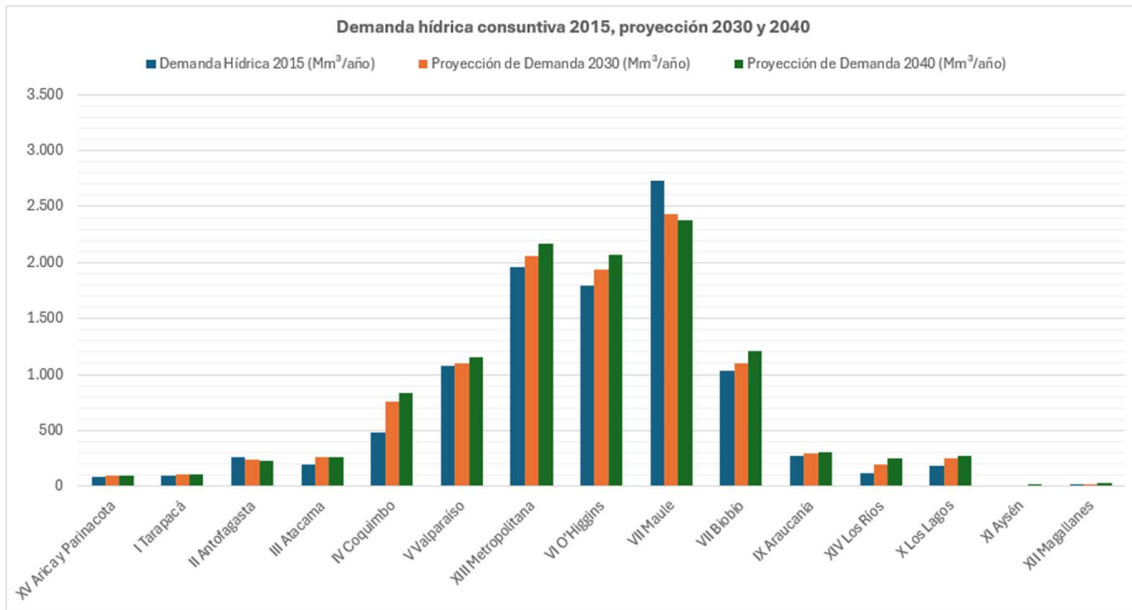


Gráfico 2 Demanda hídrica consuntiva 2015, proyección 2030 y 2040

Fuente: Resumen Ejecutivo DGA [3]

En el gráfico 2 se aprecia de que la demanda de agua está concentrada en centro-sur del país.

Se considera la demanda consuntiva, la cual se refiere a la utilización de recursos hídricos en la cual el agua es extraída de su fuente y no se devuelve o se devuelve en una cantidad significativamente menor. Este tipo de uso implica un consumo total o parcial del agua en actividades donde esta no retorna al medio natural, como en la agricultura de riego, consumo doméstico, industrial o ciertos procesos mineros.

c) Un poco de historia.

La franja noroeste de América del Sur, desde Ecuador hasta Chile, es una de las zonas más secas del planeta y ha sido de gran relevancia económica desde el siglo XIX. En esta región, la desalinización ha jugado un papel clave en la historia. Países como Perú, Bolivia y Chile fueron pioneros en la aplicación de tecnologías de desalinización debido a la escasez de agua.

Los primeros equipos de desalinización fueron instalados alrededor de 1858 en el contexto de la explotación de guano, utilizando agua de mar en islas sin fuentes de agua dulce. En puertos como Cobija, Mejillones y Antofagasta, se empleaban

destiladoras para abastecer a la población y a las actividades económicas. Desde entonces, la desalinización ha acompañado el desarrollo económico, especialmente en las zonas mineras y portuarias.

En la década de 1990, la industria minera empezó a utilizar agua de mar para procesos industriales, y a partir de los años 2000, se han construido diversas plantas desaladoras en el norte de Chile. En el punto 3 de este trabajo se detalla el estatus de plantas construidas en el norte de Chile.

5.2 Resumen de marco normativo que aplica para la implementación y operación de plantas desaladoras en Chile.

La implementación y operación de plantas desaladoras en Chile están reguladas por un marco normativo [4] que abarca diversas leyes, decretos y reglamentos relacionados con los recursos hídricos, el medio ambiente, la energía y las concesiones marítimas. A continuación, se destacan las principales normativas aplicables:

Normativa vigente:

- Código de Aguas (Decreto con Fuerza de Ley N° 1.122, año 1981): Regula el uso y gestión de los recursos hídricos en el país, incluyendo la utilización de agua de mar para procesos de desalinización.
- Ley N° 21.435 (2022): Esta ley modifica el Código de Aguas, estableciendo un marco más restrictivo para la gestión de los recursos hídricos. Prioriza el uso del agua para consumo humano y saneamiento, impone mayores regulaciones sobre los derechos de agua, y promueve el uso sostenible y eficiente del recurso, especialmente en zonas con estrés hídrico.
- Ley N° 21.586 (2023): Moderniza la regulación de los Servicios Sanitarios e incorpora el uso de fuentes alternativas como la desalinización y el reúso de aguas residuales tratadas. Abarca la infraestructura, operación y concesión de plantas desaladoras, y establece normas específicas para garantizar la calidad del agua potable.
- Ley N° 21.639 (2023): Faculta al Ministerio de Obras Públicas (MOP) para desarrollar proyectos de infraestructura hídrica, incluyendo plantas desaladoras. Establece que el MOP puede concesionar la construcción y operación de estas plantas, priorizando aquellas en regiones con déficit hídrico. También simplifica los procesos de evaluación ambiental y

concesiones marítimas para estos proyectos.

- Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300): Exige la evaluación de impacto ambiental de proyectos, incluidos aquellos que involucran plantas desaladoras, a través del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Esta ley es fundamental para regular los efectos ambientales derivados del proceso de desalinización.
- Decreto Supremo N° 90/2000: Regula los vertidos de residuos líquidos, específicamente la descarga de salmuera de las plantas desaladoras al mar. Establece límites de concentración de sales y otros parámetros para proteger los ecosistemas marinos, y es un componente clave para la operación de plantas desalinizadoras.
- Decreto Supremo N° 40/2012: Este reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) establece los procedimientos para la aprobación de proyectos de infraestructura, incluyendo plantas desaladoras. Detalla los requisitos de estudios ambientales y consultas públicas, asegurando que los proyectos no afecten significativamente el medio ambiente.
- Ley General de Servicios Sanitarios (Decreto con Fuerza de Ley N° 382 de 1988): Establece las normas para la prestación de servicios sanitarios, dentro de los cuales se contempla la producción y distribución de agua potable, incorporando potencialmente las plantas desaladoras como fuente de abastecimiento.
- Decreto Supremo N° 340/1960: Regula las Concesiones Marítimas, necesarias para la instalación de infraestructura en zonas costeras. Esta normativa es fundamental para la implementación de plantas desaladoras, dado que regula la ocupación de áreas marítimas nacionales para el uso de instalaciones como tuberías y difusores.

Proyecto de ley en trámite:

- El Proyecto de ley sobre ***el uso de agua de mar para desalinización***, actualmente en discusión en el Senado, busca regular de manera específica la extracción, tratamiento y uso del agua de mar para abastecimiento de agua potable y otros usos. Se pretende establecer un marco claro que promueva la inversión privada, asegurando criterios ambientales y de sostenibilidad. Este proyecto también introduce mecanismos para facilitar la concesión de permisos y fomentar la investigación y desarrollo de tecnologías de desalinización.

5.3 Importancia de la desalinización como solución para la escasez de agua.

En el contexto Nacional, la implementación de plantas desaladoras se posiciona como una de las soluciones más prometedoras para abordar la creciente escasez hídrica. El estado actual de esta tecnología en el país muestra un crecimiento sostenido, particularmente en las regiones del norte, donde las fuentes de agua son limitadas y la demanda de sectores como la minería y la población ha aumentado considerablemente.

Actualmente, Chile cuenta con 38 plantas desalinizadoras en operación con una capacidad total de 8500 l/s, principalmente en las regiones de Atacama y Antofagasta, donde ya se ha logrado cubrir parte de la demanda hídrica. Sin embargo, se estima que, para alcanzar una seguridad hídrica a nivel nacional, será necesario expandir considerablemente esta tecnología. Las proyecciones indican que para 2030, la capacidad de desalinización deberá incrementarse en un 30% para satisfacer las necesidades de agua potable y apoyar el crecimiento económico, particularmente en sectores industriales intensivos en el uso de agua. referencia

El aporte de las plantas desalinizadoras a la seguridad hídrica es significativo, ya que permite diversificar las fuentes de agua, reduciendo la presión sobre los recursos naturales tradicionales.

De acuerdo con el informe “Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile” del Minciencia [5], la Tabla 2 muestra 38 plantas desaladoras operativas a nivel nacional y la proyección de aumento de capacidad si se realizan todos los proyectos y ampliaciones anunciados. La capacidad operativa se cuadruplicaría, pasando de 8.558 l/s (38 plantas) a 38.766 l/s (76 plantas). Antofagasta lideraría el crecimiento con proyección de 12.988 l/s adicionales, seguida de Atacama con 7.557 l/s. El proyecto CRAMSA en Antofagasta, ingresado al SEIA en marzo de 2022, agregaría 8.000 l/s, duplicando casi la capacidad instalada del país. También es relevante el aumento conjunto en Tarapacá, Coquimbo y Valparaíso, que añadirían 9.464 l/s, alcanzando el 24,6% de la capacidad total.

Tabla 2 Capacidad de plantas desaladoras operativas en Chile, visión actual y futura

Fuente: Comité Científico del Minciencia [5].

Región	Capacidad actual		Capacidad futura			
	l/s	%	N	l/s	%	N
Operativas	8.558	100	38	38.766	100	76
Tarapacá	13	0,1	1	2.067	5,3	4
Arica	208	2,4	1	408	1,1	2
Antofagasta	6.603	77,1	25	19.591	50,5	32
Atacama	1.620	19,0	4	9.177	23,7	14
Coquimbo	4	0,0	1	3.804	9,8	13
Valparaíso	59	0,7	3	3.669	9,5	8
Biobío	33	0,4	1	33	0,1	1
Aysén	3	0,0	1	3	0,0	1
Magallanes	15	0,2	1	15	0,1	1
Sist. de impulsión sin desalinización			5			5
No operativas			3			3
Sin información			2			2
Proyecto suspendido o fusionado						11
Total			48			97

5.4 La salmuera y su impacto en el ecosistema marino.

Durante el proceso de ósmosis inversa, el agua de mar se separa en dos corrientes: una de agua con baja concentración de sales, denominada agua producto (agua dulce o permeada), y otra con una mayor concentración de sales, conocida como salmuera. En el océano Pacífico, la concentración de sales en el agua de mar es aproximadamente del 3,6%, mientras que el agua potable tiene alrededor de un 0,15%, y la salmuera resultante alcanza una concentración cercana al 7%.

Al reintegrar la salmuera al mar, aunque contiene las mismas sales presentes en el agua de origen, estas se encuentran en una mayor concentración. Para mitigar el

impacto de este retorno al ecosistema marino, se emplean sistemas de descarga con tuberías equipadas con difusores, los cuales permiten diluir la salmuera rápidamente. Este diseño reduce significativamente la diferencia en la concentración de sales en las proximidades del punto de descarga.

Usos alternativos de la salmuera en plantas desaladoras.

La salmuera, subproducto generado en los procesos de desalinización, ha sido históricamente considerada un residuo de manejo complejo, debido a su elevada concentración salina, su temperatura y la posible presencia de compuestos químicos residuales. Sin embargo, en la actualidad se reconoce su potencial como recurso valorizable en diversos sectores productivos e industriales, lo que permite avanzar hacia modelos de gestión del agua más sostenibles y circulares.

Uno de los usos alternativos más prometedores corresponde a la recuperación de minerales disueltos como litio, magnesio, potasio y boro— a través de tecnologías de *brine mining*. Esta estrategia no solo permite reducir el impacto ambiental asociado a la descarga de salmuera en cuerpos marinos, sino que además convierte este subproducto en una fuente secundaria de materias primas industriales de alto valor económico.

Asimismo, se ha explorado el uso de la salmuera en la recuperación de energía, aprovechando su presión residual para alimentar turbinas hidráulicas o sistemas basados en ósmosis directa, lo cual contribuye a mejorar la eficiencia energética de las plantas desaladoras.

Cabe señalar que, en procesos como la ósmosis inversa, ampliamente utilizada en la desalinización de agua de mar, se requiere una significativa cantidad de energía para presurizar el agua y forzar su paso a través de membranas semipermeables. Una vez separada el agua dulce, la salmuera resultante mantiene una presión considerable que, si no se recupera, representa una pérdida energética importante. En este contexto, los sistemas de recuperación de energía (*Energy Recovery Devices*, ERDs) permiten reutilizar esta presión residual, lo que conlleva una reducción significativa en el consumo energético total de la planta y, por ende, en sus costos operacionales.

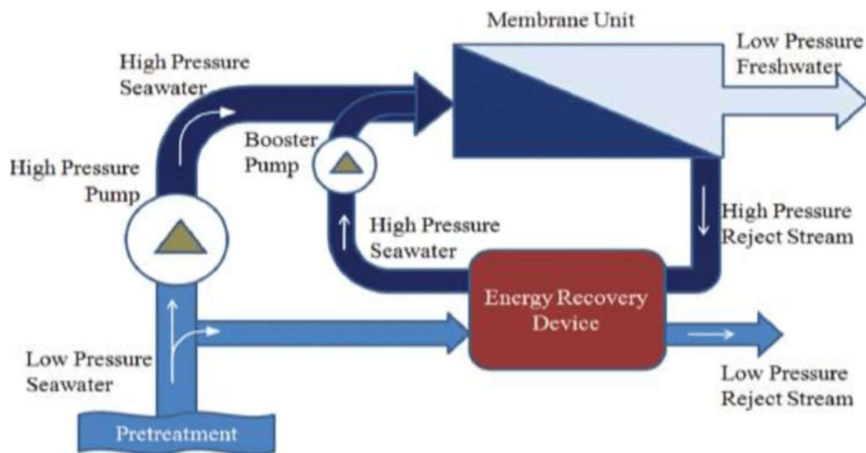


Imagen 3 Sistemas de recuperación de energía en plantas de osmosis inversa

. Fuente: Genesis Water Technologies

Las ERD's permiten reducir el consumo energético de la etapa de ósmosis inversa de 6–8 kWh/m³ a valores tan bajos como 2,5–3,5 kWh/m³, dependiendo del tipo de tecnología empleada y el diseño hidráulico del sistema. Esto representa una reducción de entre 55% y 70% del consumo energético de desalinización en comparación con sistemas que no recuperan energía.

También se ha explorado la aplicación de salmuera en la agricultura, particularmente en el riego de cultivos halotolerantes, así como en acuicultura, para especies que requieren ambientes con alta salinidad. Asimismo, existen experiencias que evalúan su utilización en procesos industriales como la curtiembre, la fabricación de materiales de construcción, e incluso para el deshielo de caminos en climas fríos.

La implementación adecuada de estas técnicas se sustenta en un amplio conocimiento y experiencia acumulada, lo que permite gestionar de manera eficiente los posibles efectos ambientales asociados a la descarga de salmuera.

5.5 Necesidades energéticas asociadas a la implementación de plantas desaladoras.

A nivel mundial, las dos tecnologías más usadas actualmente son la térmica y osmosis inversa, de las cuales, la térmica presenta un elevado consumo de energía en comparación con la ósmosis inversa.

Por lo anterior, la tecnología de ósmosis inversa es la que lidera el crecimiento de la desalación de agua. El consumo de energía de una planta térmica ronda los 10 kWh/m³, en cambio la ósmosis inversa entre 3 a 4 kWh/m³.

En Chile, la desalinización se realiza principalmente mediante la tecnología de ósmosis inversa. Si bien la inversión inicial en equipos es significativa, los costos operacionales, el mantenimiento y los gastos de tramitación del proyecto también representan una parte importante del gasto total. El costo operativo más elevado corresponde a la energía, que representa aproximadamente un 44% del total. Sin embargo, estos costos están disminuyendo gradualmente gracias a las mejoras en la eficiencia de los sistemas de recuperación de energía y en el desarrollo de membranas más eficientes, que ahora operan a presiones más bajas.

En la tabla 3 se indican los costos de CAPEX y OPEX según tamaño de la planta desaladora.

Tabla 3 Costos de planta desaladora según tamaño

Fuente: Asesoría Técnica Parlamentario: Plantas Desaladoras en Chile [6]

Producción de agua tratada (desalinizada para diversos usos) (m ³ /día)	Costo de Inversión en equipamiento de desaladora (USD)	Costo de producción / m ³ con operador (USD)
10	65.000	1,46
100	200.000	0,99
500	498.000	0,57
1.000	596.400	0,55
2.000	871.200	0,54
8.640	9.000.000	0,47
43.200	45.000.000	0,47
86.400	90.000.000	0,46

5.6 Ejemplo de plantas desaladoras en Chile y tipos de tecnologías de desalinización.

5.6.1 Proyecto de planta desaladora implementado en Chile.

Un ejemplo destacado en Chile es *la Planta Desaladora de Atacama* [7], ubicada en la comuna de Caldera, Región de Atacama.

La planta fue puesta en funcionamiento en 2021, tiene una capacidad inicial de producción de 38.880 metros cúbicos diarios de agua potable, destinada a abastecer a aproximadamente 210.000 personas en cuatro comunidades de la región. El proyecto tuvo un costo de US\$ 250 millones y presenta una vida útil de 40 años.

La tecnología utilizada de osmosis inversa incorpora en su diseño intercambiadores de presión PX Q300, con lo cual la planta ha logrado un consumo específico de energía de 2,8 kWh por metro cúbico de agua producida, incluyendo pretratamiento y captación. Durante las pruebas de rendimiento, se alcanzaron niveles tan bajos como 2,6 kWh/m³ [7].

La eficiencia energética de la planta ha permitido una reducción importante en los costos operativos, estimándose un ahorro anual de aproximadamente 3,2 MMUSD.

La Planta Desaladora de Atacama se destaca por su compromiso con la sostenibilidad energética, operando con un suministro eléctrico proveniente en su totalidad de fuentes renovables.

En octubre de 2019, la empresa estatal ECONSSA Chile S.A. adjudicó a ACCIONA el suministro eléctrico para la planta desaladora, estableciendo un acuerdo de compra de energía (PPA) a largo plazo. Este contrato garantiza que toda la electricidad utilizada en la planta provenga de fuentes 100% renovables, fuente eólicas y solares. Esto se ejecutó de acuerdo con la Ley N° 21.639, el cual faculta al estado a desarrollar proyectos de infraestructura hídrica.

5.6.2 Tipos de tecnologías de desalinización:

La desalinización es el proceso que reduce el contenido de sales en el agua de mar o salobre, transformándola en agua apta para consumo y uso doméstico. El agua de mar contiene aproximadamente 35 g/L de sales, de las cuales los cloruros representan unos 18 g/L, aunque esto varía según la ubicación. En Chile, el agua potable debe tener menos de 0,4 g/L de cloruros, según lo establece la Norma NCh409/1.Of.2005.

En términos generales, el proceso de desalinización opera en varias fases para obtener agua dulce, desde la captación hasta la disposición de residuos. El componente central, desde el punto de vista energético, es la unidad de desalinización. Las etapas comunes de una planta se pueden visualizar en la *imagen 3*, y su descripción es la siguiente:

- ✓ Captación del agua de alimentación, mediante bombas y tuberías que extraen agua de mar o salobre.
- ✓ Pretratamiento, donde se filtra el agua cruda para eliminar sólidos y se añaden químicos para reducir la precipitación de sales y la corrosión del equipo.
- ✓ Desalinización, etapa en la que se separan las sales del agua, generando mayormente agua dulce y una porción de salmuera con una mayor concentración de sales que el agua original.
- ✓ Postratamiento, en el cual se ajusta el agua a los requisitos de uso final, mediante procesos como la corrección de pH, remineralización de calcio y magnesio, eliminación de boro, desgasificación y desinfección.
- ✓ Si es necesario, se realiza un proceso de transporte para llevar el agua tratada desde la planta hasta su destino final, dependiendo del uso.

En la imagen 4, se detalla el diagrama de las principales etapas del proceso de desalinización.

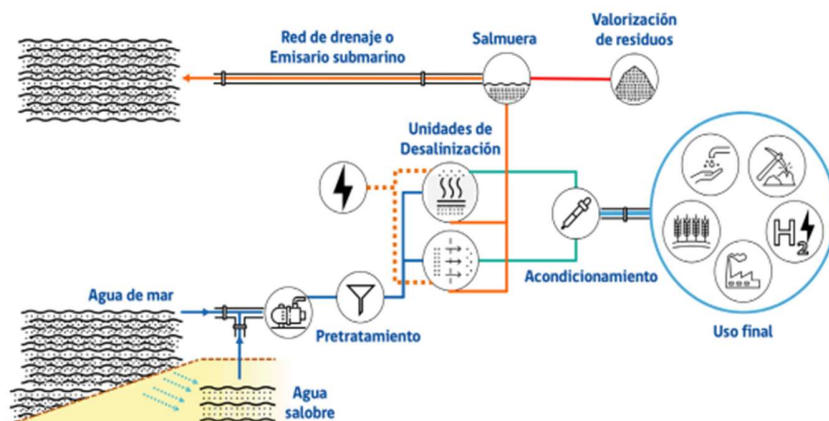


Imagen 4 Diagrama de las principales etapas del proceso de desalinización

Fuente: Fuente: Comité Científico del Minciencia [5].

5.6.3 Tecnologías de Filtración.

Las tecnologías disponibles para el proceso mostrado en la imagen 4 se describen en los siguientes subcapítulos.

a. La ósmosis inversa:

Es actualmente la tecnología de desalinización más utilizada a nivel mundial debido a su eficiencia en la eliminación de sales disueltas y otras impurezas del agua. Este proceso utiliza una membrana semipermeable que permite el paso del agua, pero bloquea el paso de los solutos (sales y minerales). Para lograr esto, se aplica una presión superior a la presión osmótica natural para forzar el agua a través de la membrana, separando el agua dulce del agua salada. La ósmosis inversa es conocida por su versatilidad, ya que puede aplicarse tanto en agua salobre (agua subterránea con baja salinidad) como en agua de mar. A pesar de su alta eficiencia, este proceso es intensivo en términos energéticos, aunque los avances en las membranas y el uso de tecnologías de recuperación de energía han permitido reducir su costo operativo. Ventajas, presenta alta eficiencia en la eliminación de sales, menor impacto ambiental en comparación con otros métodos térmicos, avances en recuperación de energía. Desventajas, requiere un alto consumo energético y genera concentrados salinos que deben ser gestionados adecuadamente.

b. La osmosis Forzada:

Similar a RO, pero usa una solución más concentrada para atraer el agua pura a través de la membrana. Ventaja, presenta una menor presión necesaria que RO. Desventaja, menos desarrollada y eficiente en grandes volúmenes.

c. Desalación Térmica:

La desalación térmica es otro método común, particularmente en áreas con acceso a grandes cantidades de energía barata, como los países del Golfo Pérsico. A través de este proceso, el agua se evapora mediante calor, separando el vapor del agua salada, y luego se condensa para obtener agua dulce. Los principales tipos de desalación térmica son:

Destilación multietapa (MSF - Multi-Stage Flash): Este proceso implica la vaporización rápida del agua al reducir la presión en varias etapas consecutivas, permitiendo que el agua hierva a temperaturas más bajas. Es una de las tecnologías más utilizadas en plantas a gran escala, especialmente en Oriente Medio.

Destilación multiefecto (MED - Multi-Effect Distillation): Similar a la MSF, en este método el vapor producido en una etapa se utiliza para calentar el agua en la siguiente, mejorando la eficiencia energética. Es más eficiente que la MSF en términos de energía consumida, aunque requiere condiciones técnicas más específicas.

Compresión de vapor (VC - Vapor Compression): Utiliza la compresión mecánica o térmica del vapor para reutilizar la energía del mismo vapor en el proceso de evaporación. Este método es eficiente en plantas de pequeña a mediana escala. Ventajas, puede utilizar calor residual de otras actividades industriales o plantas de energía, lo que reduce el consumo de energía adicional. Desventajas, alto consumo energético si no se usa calor residual, más costosa en comparación con la ósmosis inversa y con una mayor huella de carbono.

5.6.4 Tecnologías emergentes.

Las tecnologías emergentes buscan mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de los procesos de desalinización. Entre las más prometedoras se incluyen:

Electrodialisis (ED): En este proceso, los iones de sal se eliminan del agua mediante una corriente eléctrica que los atrae a través de membranas selectivas. Es particularmente efectiva para desalinizar aguas con baja salinidad, como aguas salobres. Se utiliza menos energía que la ósmosis inversa cuando se trata de aguas con menor concentración de sales, lo que la hace adecuada para regiones con aguas menos salinas.

Desalinización con energía solar: Aprovecha la energía solar para impulsar los procesos de desalinización. Existen diferentes enfoques, como la evaporación directa del agua utilizando colectores solares o sistemas que combinan la energía solar fotovoltaica para alimentar plantas de ósmosis inversa. Este tipo de tecnología tiene un gran potencial en áreas remotas y en regiones soleadas donde la energía convencional es limitada o costosa. Ventajas mayor eficiencia energética, reducción de la dependencia de combustibles fósiles y menores costos operativos en el largo plazo. Desventajas, aún en fase de desarrollo y expansión, con desafíos en cuanto a la escalabilidad y los costos iniciales de implementación.

6. DESARROLLO TÉCNICO DE SOLUCIÓN IMPLEMENTAR PLANTAS SALADORAS.

6.1 Tipos de Aguas tratadas en plantas desaladoras.

La desalinización se ha consolidado como una solución efectiva para obtener agua dulce a partir de fuentes salinas, abordando la creciente escasez hídrica en diversas regiones del mundo. Las plantas desaladoras están diseñadas para procesar diferentes tipos de agua, principalmente: agua de mar, agua salobre y, en ciertos casos, aguas residuales tratadas. A continuación, se detallan estos tipos de agua y sus respectivas aplicaciones.

a) Agua de Mar

El agua de mar posee una alta concentración de sales, con sólidos disueltos totales (TDS) que generalmente superan los 35,000 mg/L. Es una fuente abundante, especialmente en regiones costeras.

b) Agua Salobre

El agua salobre presenta una salinidad intermedia, con TDS entre 1,000 y 15,000 mg/L. Se encuentra en acuíferos costeros, estuarios y algunas fuentes subterráneas.

c) Aguas Residuales Tratadas

Las aguas residuales municipales o industriales, una vez sometidas a tratamientos avanzados, pueden ser reutilizadas. Aunque no es desalinización en el sentido estricto, el tratamiento de estas aguas permite su reutilización en diversos ámbitos.

La selección del tipo de agua a tratar y la tecnología a emplear depende de factores como la disponibilidad de la fuente, la calidad del agua requerida para el uso final, los costos operativos y las regulaciones ambientales. La desalinización y el tratamiento avanzado de aguas residuales representan estrategias clave para enfrentar los desafíos de la escasez hídrica y garantizar un suministro sostenible de agua en el futuro.

6.2 Volúmenes de agua a considerar.

La creciente escasez hídrica en Chile ha revelado profundas brechas entre la disponibilidad de agua y las necesidades humanas e industriales. Esta crisis hídrica se manifiesta con mayor intensidad en las zonas centro y norte del país, donde convergen factores climáticos, territoriales e institucionales, y ha llevado a una

presión creciente sobre el sistema hídrico nacional.

Los análisis realizados por la DGA [3], muestran que entre las macrozona norte y centro-norte del país han superado el límite de sustentabilidad en el uso del agua, principalmente debido a las altas demandas del sector agrícola, minero e industrial, además del consumo urbano. En algunas comunas del norte, por ejemplo, el consumo industrial (particularmente el minero) es tan elevado que supera con creces la oferta hídrica disponible. Asimismo, en las zonas urbanas del centro del país, el crecimiento demográfico y urbano ha elevado significativamente el consumo de agua potable, incrementando las proyecciones de demanda futura.

La proyección de las necesidades futuras de agua potable en Chile exige considerar el aporte estratégico de las plantas desaladoras, especialmente en aquellas regiones donde el estrés hídrico es más crítico. Para ello, será clave una planificación integrada que incorpore criterios de equidad, eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y marco normativo claro.

A partir del análisis del estado del arte, se ha identificado la demanda total de agua, junto con su desagregación por tipo de uso, considerando tanto la situación actual como las proyecciones futuras. Esta información constituye un insumo clave y representa la base fundamental sobre la cual se estructura el desarrollo de esta tesis.

A continuación, se presenta la tabla 4 con el resumen de la demanda hídrica anual, el cual forman parte del escenario evaluado en este estudio.

Tabla 4 Resumen demanda consuntiva 2015, proyección 2030 y 2040

Fuente: Resumen Ejecutivo DGA [3]

Región	Demanda Hídrica (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
TOTAL	10.339	10.874	11.413

En un contexto donde la inseguridad hídrica se ha consolidado como una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible en Chile, esta tesis propone un enfoque innovador que no ha sido abordado integralmente hasta ahora: estudiar cómo la demanda de agua actual y futura podría ser cubierta mediante la implementación de plantas desaladoras en el país. Si bien existen estudios que analizan por separado los aspectos técnicos, ambientales o normativos de la

desalinización, el valor distintivo de este trabajo radica en integrar, por primera vez, el análisis de la demanda hídrica proyectada con el potencial de respuesta de la tecnología desaladora, considerando tanto aspectos económicos, ambientales como energéticos.

Esta aproximación permitirá identificar brechas, oportunidades y zonas prioritarias para la instalación de estas plantas, bajo una lógica de planificación territorial. Con ello, se busca generar una propuesta que aporte a las decisiones estratégicas y a la planificación hídrica nacional con una mirada de largo plazo.

6.3 Definición de tecnología.

Entre las distintas tecnologías disponibles indicadas en el estado del arte para la desalinización de agua de mar, la ósmosis inversa (RO) se ha posicionado como la opción más eficiente y viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. Esta tecnología, basada en el uso de membranas semipermeables para remover sales disueltas del agua marina, ofrece ventajas significativas en términos de consumo energético, costos de producción, operación y mantención.

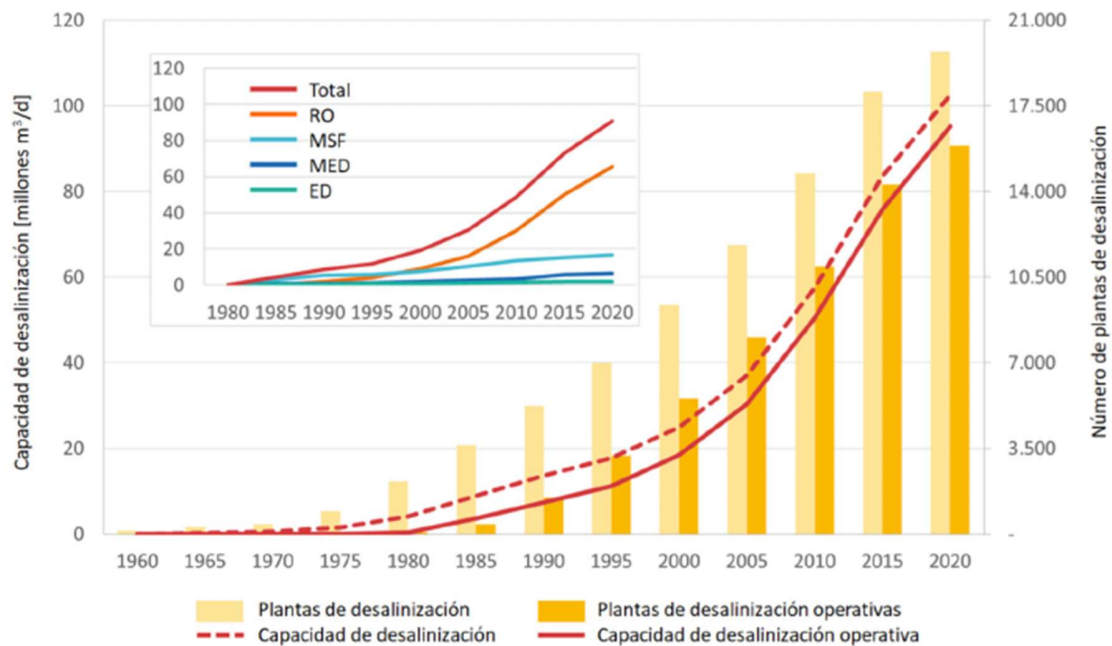


Gráfico 3 Capacidad instalada y plantas operativas de desalinización a nivel mundial, con recuadro según tecnología

Fuente: Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile, Comité Científico del Minciencia [8].

El gráfico 3 muestra la evolución histórica de la capacidad global de desalinización y el número de plantas operativas desde 1960 hasta 2020. Se observa un crecimiento exponencial tanto en la capacidad instalada como en el número de plantas, alcanzando más de 17.000 instalaciones y una capacidad cercana a 110 millones de m³/día en 2020. El recuadro destaca la expansión de las principales tecnologías utilizadas, donde la ósmosis inversa se posiciona como la tecnología dominante desde principios de los 2000, superando ampliamente a métodos térmicos como MSF y MED.

Para justificar la elección de la tecnología de ósmosis inversa, es fundamental analizar las principales variables técnicas y económicas que inciden directamente en su desempeño y viabilidad. A continuación, se presentan los principales aspectos que permiten comprender por qué esta tecnología ha logrado posicionarse como la opción preferente a nivel global y nacional para la desalinización de agua de mar. Fuente “Desalination Project Cost Estimating and Management” [11].

En la tabla 5 se resumen los parámetros principales y su comparación con la segunda opción para desalinizar agua.

Tabla 5 Resumen de parámetros de las dos principales tecnologías para plantas desaladoras

Fuente: Desalination Project Cost Estimating and Management, by Taylor & Francis Group [11]

Parámetro	Ósmosis Inversa (RO)	Destilación Multietapa (MSF/MED)	Unidad / Observación
Consumo energético (SEC)	3 – 4	10 – 16	kWh/m ³
Costo de producción de agua	0,50 – 2,50	2,00 – 5,00	USD/m ³
Costo de operación (OPEX)	0,30 – 1,50	1,50 – 3,00	USD/m ³ (energía, insumos, RR.HH.)
Costo de mantención	3% – 5% del CAPEX	6% – 10% del CAPEX	Anual
Vida útil de membranas/equipos	5 – 7 años (membranas)	20 – 25 años (equipos térmicos)	Repuestos mayores o ciclos de renovación
Tasa de recuperación de agua	40% – 50%	25% – 35%	Agua de mar
Escalabilidad	Alta (desde <1 L/s a >1000 L/s)	Alta (preferida para >1000 L/s)	Depende del contexto geográfico y energético
Compatibilidad con ERNC	Alta	Baja	La MSF requiere calor constante, no intermitente

Es importante distinguir entre costo de producción y OPEX (gastos operacionales), ya que ambos conceptos se refieren a aspectos económicos distintos del proceso de desalinización:

- ✓ Costo de producción de agua desalinizada: corresponde al costo total por cada metro cúbico (USD/m³) de agua producida. Este incluye no solo los gastos operacionales (OPEX), sino también una fracción del CAPEX (costos de inversión inicial), considerando la amortización del proyecto a lo largo de su vida útil. En otras palabras, el costo de producción representa el valor real del agua desalada desde una perspectiva integral, incluyendo financiamiento, depreciación de equipos, operación y mantención.
- ✓ OPEX (Operational Expenditures): se refiere exclusivamente a los costos recurrentes necesarios para operar y mantener la planta una vez construida. Incluye el consumo energético, productos químicos, mano de obra, repuestos, monitoreo y otros costos administrativos. No considera la inversión inicial (CAPEX) ni la depreciación de activos.

Por lo tanto, el OPEX es una parte del costo de producción, siendo este último un valor más amplio y útil para evaluar la viabilidad económica global del proyecto a largo plazo.

6.4 Aspectos normativa y ambientales para plantas desaladoras.

6.4.1 Naturaleza Jurídica del Agua Desalinizada.

Uno de los aspectos más controversiales y menos resueltos jurídicamente en Chile es la naturaleza jurídica del agua desalinizada. A diferencia del agua dulce continental, el agua de mar no está sujeta al régimen del Código de Aguas, ya que no requiere derechos de aprovechamiento para su captación. Sin embargo, el vacío legal aparece una vez que el agua ha sido desalinizada y transformada en un recurso hídrico apto para el consumo o uso industrial.

La discusión gira en torno a si el agua desalinizada debe considerarse un bien nacional de uso público (BNUP) o un bien de propiedad privada. Existen dos posturas principales:

- ✓ Bien Nacional de Uso Público: Esta posición considera que el agua, una vez desalinizada, sigue siendo parte del dominio público, en coherencia con el artículo 595 del Código Civil y con los principios de la Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455). Esta visión permitiría al Estado regular su distribución y priorizar su uso, especialmente en contextos de escasez hídrica

y seguridad alimentaria.

- ✓ Bien de Propiedad Privada: Opuesta a la anterior, esta visión sostiene que el agua desalinizada es fruto de un proceso industrial que transforma un recurso originalmente no apropiable, lo que habilita su apropiación por quien invirtió en la planta y en el proceso. Este enfoque se relaciona con el principio de inversión y retorno, clave para dar certezas a los privados en un sistema de libre iniciativa.

Implicancias jurídicas y operativas:

- ✓ Dificulta la planificación hídrica de largo plazo.
- ✓ Inhibe o ralentiza inversiones en infraestructura desaladora.
- ✓ Obstaculiza la participación del Estado o municipios en proyectos de agua potable rural (APR).
- ✓ Impide definir un modelo tarifario justo y transparente para usuarios finales.

En este contexto, se debe considerar que el agua desalinizada no es actualmente reconocida como un derecho de aprovechamiento en el Código de Aguas, por lo que existe una brecha jurídica que se espera resolver con la ley en discusión sobre el uso de agua de mar para desalinización, determinando su eventual afectación al interés general y las reglas de distribución, uso y priorización del recurso. (Boletín 11.608-09) [9].

6.4.2 Marco Normativo para la Instalación y Operación de Plantas Desaladoras en Chile.

La instalación de una planta desaladora en el territorio chileno se enmarca dentro de varios aspectos normativo y técnico que busca asegurar la calidad del recurso hídrico producido, minimizar los impactos ambientales y establecer un uso regulado del borde costero. En este contexto, el desarrollo de proyectos de desalinización debe cumplir tanto con la normativa sanitaria como con los requisitos de evaluación ambiental y gestión marítima, entre otros aspectos administrativos.

- a) Normativa sanitaria y parámetros técnicos para uso potable e industrial (calidades de agua).

La norma NCh409/1.Of2005 [10] establece una clasificación general de las calidades del agua en función de sus características fisicoquímicas y microbiológicas, con el propósito de determinar su uso potencial. Esta normativa es aplicable a aguas naturales, tanto superficiales como subterráneas, y constituye una referencia técnica fundamental para definir los tratamientos necesarios antes de su

utilización en distintos fines, tales como consumo humano, uso industrial, agrícola, recreacional o conservación de ecosistemas acuáticos.

A continuación, se muestra la tabla 6 con un resumen las clases de aguas que agrupa la norma NCh409/1.Of2005:

Tabla 6 Resumen de clases de agua

Fuente: NCh409/1.Of2005 [10]

Clase de Agua	Uso Principal	Características Relevantes	Parámetros Clave
Agua para consumo humano	Potabilización para agua potable	Requiere tratamiento si parámetros naturales superan límites normativos.	pH, turbiedad, conductividad, coliformes fecales (0 NMP/100mL), nitratos (≤ 45 mg/L), metales pesados, arsénico (≤ 0.01 mg/L).
Agua para uso industrial	Procesos industriales no alimentarios	Admite mayores concentraciones de sólidos, dependiendo del proceso industrial específico.	pH amplio, dureza, conductividad, cloruros, sulfatos, hierro, manganeso, sólidos totales disueltos.
Agua para riego agrícola	Riego de cultivos y jardines	Enfocada en la salinidad, sodio y boro, que afectan la productividad del suelo y cultivos.	Conductividad eléctrica (CE), Relación de Adsorción de Sodio (SAR), boro, cloruros, sólidos disueltos totales.
Agua para recreación	Actividades humanas con contacto directo/indirecto	Requiere bajo contenido microbiológico para evitar riesgos a la salud humana.	Coliformes fecales, E. coli, enterococos, turbiedad.
Agua para vida acuática	Conservación de ecosistemas acuáticos	Protege la biodiversidad; debe tener buena calidad y bajo contenido de contaminantes y metales.	Oxígeno disuelto (≥ 5 mg/L), temperatura, pH, amonio, metales pesados (arsénico, plomo, mercurio), materia orgánica, compuestos nitrogenados.

También se definen los tipos clasificación de agua, los cuales agrupan los diferentes parámetros de control de calidad que deben ser evaluados en el agua potable para asegurar su inocuidad y aceptabilidad para el consumo humano. A continuación, se muestra la tabla 7 con un resumen con los tipos de clasificación de agua:

Tabla 7 Resumen de Tipos de clasificación de agua

Fuente: NCh409/1.Of2005 [10]

Tipo	Nombre del grupo de parámetros	Descripción	Parámetros Clave
Tipo I	Microbiológicos y turbiedad	Evalúan la presencia de microorganismos patógenos y partículas en suspensión que afectan la transparencia.	- Coliformes totales (0–5 NMP/100mL)
			- <i>E. coli</i> (ausente)
			- Turbiedad (≤ 2 UNT promedio, ninguna muestra > 20 UNT)
Tipo II	Sustancias químicas de importancia para la salud	Incluyen elementos tóxicos o que afectan la salud humana tras consumo prolongado.	- Arsénico ($\leq 0,01$ mg/L)
			- Plomo ($\leq 0,05$ mg/L)
			- Nitrato (≤ 50 mg/L)
			- Mercurio ($\leq 0,001$ mg/L)
			- Cianuro, cadmio
Tipo III	Elementos radiactivos	Controla la presencia de radionúclidos que puedan tener efectos carcinógenos o mutagénicos.	- Estroncio-90 ($\leq 0,37$ Bq/L)
			- Radio-226 ($\leq 0,11$ Bq/L)
			- Actividad alfa total ($\leq 0,55$ Bq/L)
			- Actividad beta total
Tipo IV	Parámetros organolépticos (sensoriales)	Evalúan características percibidas por los sentidos, como color, olor, sabor y apariencia del agua.	- Color verdadero (≤ 20 Pt-Co)
			- pH (6,5–8,5)
			- Cloruros (≤ 400 mg/L)
			- Sulfatos (≤ 500 mg/L)
			- Amoníaco, fenoles
Tipo V	Parámetros de desinfección	Controlan la eficacia y seguridad del proceso de desinfección del agua.	- Cloro residual libre (mín. 0,2 mg/L – máx. 2,0 mg/L)
			- Monocloroamina, trihalometanos, subproductos de la cloración

En el caso del agua desalinizada destinada al consumo humano, esta debe cumplir con los requerimientos específicos establecidos en la Norma Chilena NCh409/1.Of2005, la cual define los límites máximos permitidos para diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Dentro de estos parámetros se incluyen, entre otros, los siguientes valores indicados en la tabla 8.

Tabla 8 Parámetros específicos para agua potable

Fuente: NCh409/1.Of2005 [10]

Parámetro	Agua Potable - Límite Máximo	Agua Industrial - Recomendación General
pH	6.5 – 8.5	6.0 – 9.0 (variable según proceso)
Turbiedad (NTU)	≤ 5	Variable (<10 NTU general)
Color (unidades Pt-Co)	≤ 15	≤ 50 (según proceso)
Conductividad (μS/cm)	≤ 700	< 1500 (variable según equipo)
Cloruros (Cl ⁻) (mg/L)	≤ 250	< 600 (según materiales y procesos)
Sulfatos (SO ₄ ²⁻) (mg/L)	≤ 250	< 1000
Hierro total (Fe) (mg/L)	≤ 0.3	≤ 1.0
Manganeso (Mn) (mg/L)	≤ 0.1	≤ 0.5
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	≤ 500	Variable (blanda: <75, dura: >150)
Nitratos (NO ₃ ⁻) (mg/L)	≤ 45	No aplica directamente
Amonio (NH ₄ ⁺) (mg/L)	≤ 0.5	≤ 1.5 (según proceso)
Coliformes fecales (NMP/100mL)	0,0	No requerido si no hay contacto humano
Arsénico (As) (mg/L)	≤ 0.01	Depende del proceso (frecuente ≤ 0.1)
Mercurio (Hg) (mg/L)	≤ 0.001	≤ 0.002
Plomo (Pb) (mg/L)	≤ 0.01	≤ 0.1 (afecta corrosión y equipos)

En el caso del agua desalinizada con destino a procesos industriales, si bien no existen normas universales fijas, cada industria debe definir los requerimientos técnicos mínimos dependiendo del uso, como, por ejemplo, la conductividad, el contenido de sílice o la presencia de boro, que pueden afectar procesos como la minería o la generación de vapor.

b) Concesiones marítimas.

Uno de los requisitos fundamentales para el emplazamiento de una planta desaladora en zonas costeras de Chile es la obtención de una concesión marítima, la cual es otorgada por la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas, a través de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) [12]. Esta concesión autoriza el uso de sectores del espacio costero-marítimo, y resulta imprescindible para todas aquellas instalaciones que ocupen o intervengan el borde costero, tales como:

- ✓ Sistemas de captación de agua de mar.
- ✓ Emisarios submarinos para la descarga de salmuera u otros efluentes,
- ✓ Obras civiles costeras o plataformas técnicas vinculadas al funcionamiento

de la planta.

La instalación y operación de plantas desaladoras en el litoral chileno requiere cumplir con un marco normativo y técnico exigente, donde confluyen tanto los criterios del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) como los establecidos por la autoridad marítima, representada por DIRECTEMAR. Uno de los requisitos esenciales es la obtención de una concesión marítima, la cual se rige por el Decreto Ley N° 1.939, que regula la adquisición, administración y disposición de bienes del Estado, incluyendo los bienes nacionales de uso público como playas, fondo de mar y porciones del borde costero.

La concesión marítima debe ser solicitada ante la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas, e implica acreditar el uso del espacio costero-marítimo para actividades como la captación de agua de mar, descarga de salmuera y la construcción de obras civiles. DIRECTEMAR exige que el proyecto presente información técnica detallada, incluyendo planos georreferenciados, fichas de productos químicos, modelaciones hidrodinámicas, y un Plan de Seguimiento Ambiental Marino (PSA).

Además, el proyecto debe caracterizar el medio marino a través de estudios de línea base que incluyan parámetros fisicoquímicos como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH, nutrientes y compuestos orgánicos. Esta caracterización debe realizarse en estaciones representativas, previo al inicio de operaciones, y mantenerse durante la fase operativa. El diseño de los sistemas de captación y descarga debe minimizar el impacto ambiental, asegurando, por ejemplo, velocidades de succión inferiores a 0,15 m/s para proteger la fauna marina, y difusores que garanticen una rápida dilución de la salmuera.

En conjunto, la normativa ambiental y marítima busca garantizar que los proyectos de desalación sean técnicamente viables, ambientalmente sostenibles y jurídicamente autorizados, promoviendo un desarrollo armónico en el uso del borde costero.

El procedimiento para obtener esta concesión incluye:

- ✓ Solicitud formal de concesión marítima con planos, ubicación georreferenciada y memoria descriptiva del proyecto.
- ✓ Informe técnico y jurídico elaborado por la Capitanía de Puerto correspondiente.
- ✓ Resolución de otorgamiento o rechazo por parte de la Subsecretaría para las FF.AA.
- ✓ En algunos casos, consulta a pueblos originarios si el área solicitada se superpone con zonas de uso consuetudinario, bajo el Convenio 169 de la

OIT.

Adicionalmente, la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y los Instrumentos de Planificación Territorial (IPTs) pueden condicionar el emplazamiento de estas plantas, por lo que es necesario verificar que el uso del suelo permita este tipo de infraestructura.

El volumen de agua de mar que puede ser extraído por una planta desaladora en Chile no se rige mediante derechos de aprovechamiento de aguas en el sentido tradicional definido por el Código de Aguas, aplicable principalmente a recursos hídricos continentales como ríos, lagos o napas subterráneas. En su lugar, este uso se encuentra regulado a través de una concesión marítima (DIRECTEMAR), conforme a lo establecido en el Decreto Ley N° 1.939 de 1977.

Dicha concesión no otorga propiedad ni derechos permanentes sobre el recurso, sino que autoriza el uso de un área específica del borde costero para la instalación de infraestructuras destinadas a la captación de agua de mar y la descarga de efluentes, tales como la salmuera. Además, establece condiciones técnicas y ambientales que deben ser estrictamente cumplidas, incluyendo límites máximos de caudal extraído.

Adicionalmente, este tipo de proyecto requiere la obtención de un Permiso Ambiental Sectorial (PAS) conforme al artículo 115 del D.S. N° 40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente, que regula el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

En las distintas etapas del sistema de concesiones marítimas intervienen diversos actores, de acuerdo con sus respectivas facultades y responsabilidades. Estos son:

- ✓ Subsecretaría para las Fuerzas Armadas.
- ✓ Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante Nacional.
- ✓ Servicio de Impuestos Internos.
- ✓ Comisión Regional de Uso del Borde Costero.
- ✓ Dirección de Obras Municipales.
- ✓ Dirección Regional del Servicio Nacional de Pesca.
- ✓ Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo.
- ✓ Secretaría Regional Ministerial de Obras Públicas.
- ✓ Ministerio de Relaciones Exteriores, Dirección de Fronteras y Límites del Estado.
- ✓ Servicio Agrícola y Ganadero.
- ✓ Contraloría General de la República.

6.4.3 Evaluación Ambiental.

Desde el punto de vista legal, todo proyecto que implique la captación de agua de mar o la descarga de salmuera está obligado a ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y cumplir con ciertas características señaladas en el artículo 10 de la Ley 19.300 y su reglamento (D.S. N°40/2012). Esto incluye:

- ✓ Captación desde fuentes marítimas que superen ciertos umbrales de caudal.
- ✓ Emisión de salmuera al mar mediante emisarios submarinos.
- ✓ Instalaciones ubicadas en zonas protegidas o que puedan afectar ecosistemas sensibles.

Durante este proceso se debe presentar una Declaración o Estudio de Impacto Ambiental, que incluya la modelación de plumas de salmuera, monitoreos BACI [20], identificación de especies sensibles y posibles sinergias con otras presiones ambientales existentes.

El monitoreo BACI (Before-After Control-Impact) es una metodología utilizada para evaluar los efectos ambientales de un proyecto, comparando condiciones antes y después de su implementación y entre sitios impactados y no impactados. Permite aislar los cambios atribuibles al proyecto de las variaciones naturales. En plantas desaladoras, se aplica para monitorear el impacto de la descarga de salmuera en el ecosistema marino

Criterios de ingreso, según el Reglamento del SEIA (DS N° 40/2012), deben ingresar los proyectos que:

- ✓ Implican obras en el borde costero.
- ✓ Pueden afectar áreas protegidas o zonas con valor ambiental.
- ✓ Generan descargas de residuos al mar.
- ✓ Suponen un volumen de producción significativo.
- ✓ Dependiendo del impacto estimado, el proyecto puede requerir una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

Las plantas desaladoras que captan y vierten agua al mar y cumplen con al menos uno de estos criterios, deben someterse a evaluación ambiental obligatoria.

6.4.4 Descarga de salmuera.

La descarga de salmuera al mar requiere autorizaciones similares a las de captación. Además, deben cumplirse exigencias establecidas en el Decreto Supremo N° 90/2000, que regula la calidad del efluente y su impacto ambiental.

Las plantas desaladoras deben:

- ✓ Definir el punto de vertido y su diseño técnico (emisarios submarinos).
- ✓ Modelar el área de influencia de la descarga.
- ✓ Acreditar que la descarga cumple con los límites de contaminantes establecidos.
- ✓ Monitorear regularmente las condiciones del cuerpo receptor.

La salmuera no se considera un residuo peligroso per se, pero su alta salinidad, temperatura y posibles aditivos químicos generan preocupación ambiental, especialmente en zonas con alta biodiversidad o actividades pesqueras.

El monitoreo ambiental de las descargas de salmuera provenientes de plantas desaladoras constituye una herramienta esencial para asegurar el cumplimiento de los requerimientos ambientales, particularmente en lo que respecta a no exceder el área de influencia (AI) definida para el proyecto. Este monitoreo debe abarcar todo el ciclo de vida de la planta: desde el levantamiento de la línea base hasta su eventual cierre y abandono.

Se deben evaluar parámetros físicos, químicos y biológicos tanto en la descarga como en el medio receptor, incluyendo sedimentos, flora y fauna marina. Las mediciones deben considerar variables como vientos, corrientes, mareas, oleaje, salinidad y temperatura, y llevarse a cabo conforme a las especificaciones establecidas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), particularmente las publicaciones 3109 y 3201.

Además, se debe considerar la implementación de esquemas de monitoreo espacialmente amplios, que incluyan zonas de uso especial del cuerpo de agua y valles sumergidos por donde se desplaza la salmuera. La caracterización vertical del medio receptor es relevante para entender la estratificación salina y térmica, especialmente durante eventos estacionales o fenómenos como las surgencias costeras.

Como ejemplo me muestra la imagen 5, propuestas de posicionamiento de estaciones para el monitoreo en bahías y costas abiertas.



Imagen 5 Posicionamiento de estaciones para el monitoreo

Fuente: Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile, Comité Científico del Minciencia [5].

La imagen 5 presenta el monitoreo pre-diseño en proyectos de plantas desaladoras, tanto en bahía como en costa abierta. Se identifican puntos de captación, descarga y estaciones de muestreo para salinidad y temperatura, fundamentales para evaluar el impacto de la salmuera. Las estaciones de referencia se ubican fuera del área de influencia, y también se consideran variables como corrientes, mareas, viento y oleaje, necesarias para modelar la dispersión del efluente y respaldar la evaluación ambiental del proyecto.

6.4.5 Consideraciones adicionales.

La operación de una planta desaladora también debe ser autorizada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) en caso de que el agua producida se destine al abastecimiento urbano. Este ente fiscaliza la calidad del agua entregada y el cumplimiento de la normativa técnica.

Además, en casos donde se integre energía renovable para su funcionamiento, es necesario coordinar los permisos eléctricos pertinentes, como los establecidos en la Ley General de Servicios Eléctricos y las resoluciones de la Comisión Nacional de Energía (CNE).

6.4.6 Resumen de marco normativo actual para plantas desaladoras en Chile.

En la tabla 9 se resumen los aspectos normativos que deben ser considerados para la instalación de una planta desaladora en Chile.

Tabla 9 Resumen de normativa para plantas desaladoras

Fuente: Normativas, decretos y leyes citadas.

Normativa	Entidad Responsable	Requisito para implementación y agua potable
Código de Aguas (DFL N° 1.122 de 1981)	Dirección General de Aguas (DGA)	Regula el uso de aguas continentales. No se requiere derecho de aprovechamiento para captar agua de mar, pero sí para uso posterior del agua tratada.
Decreto Ley N° 1.939 sobre Concesiones Marítimas (DL N° 1.939)	Subsecretaría para las Fuerzas Armadas	Obliga a obtener concesión si se utiliza espacio de uso público costero o marítimo (captación o descarga).
Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (Decreto Supremo N° 40/2012, DS N° 40/2012)	Ministerio del Medio Ambiente / SEA	Define umbrales que obligan el ingreso del proyecto al SEIA según su magnitud o ubicación.
Resolución de Calificación Ambiental (RCA)	Servicio de Evaluación Ambiental (SEA)	Autorización ambiental que certifica que el proyecto cumple con los requisitos ambientales exigidos.
Norma Chilena de Calidad del Agua Potable (NCh409/1.Of2005)	Instituto Nacional de Normalización (INN) / MINSAL	Define los parámetros físico-químicos y microbiológicos que debe cumplir el agua destinada al consumo humano, incluyendo la remineralización del agua desalinizada.
Código Sanitario (Decreto Supremo N° 725/1967, DS N° 725)	Ministerio de Salud	Regula aspectos sanitarios, incluidos los relacionados al agua para consumo humano.
Ley General de Servicios Sanitarios (Decreto con Fuerza de Ley N° 382/1989, DFL N° 382)	Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)	Regula las empresas prestadoras de servicios sanitarios y sus obligaciones, incluyendo calidad y continuidad del suministro.
Proyecto de Ley sobre el uso de agua de mar para desalinización (Boletín N° 11.608-09)	Congreso Nacional	Busca otorgar certeza jurídica sobre propiedad, concesiones y usos del agua desalinizada.
Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455, publicada en 2022)	Ministerio del Medio Ambiente	Establece principios de seguridad hídrica, adaptación, resiliencia y justicia ambiental. Aplica indirectamente al desarrollo de proyectos de desalinización.
Norma de Emisión para Residuos Líquidos a Cuerpos de Agua Marinos (Decreto Supremo N° 90/2000, DS N° 90)	Ministerio del Medio Ambiente / Directemar	Regula la calidad y parámetros que debe cumplir la salmuera u otros efluentes descargados al mar.

6.5 Ubicación de plantas desaladoras

La instalación de una planta desaladora en Chile implica una serie de requerimientos técnicos, legales y ambientales que deben ser considerados desde la etapa de prefactibilidad. Uno de los aspectos críticos para el desarrollo exitoso del proyecto es la selección adecuada del terreno, dado que influye directamente en la factibilidad ambiental, técnica, económica y social de la planta. Este apartado analiza las principales consideraciones asociadas al uso de suelo para una planta de desalación.

Para el emplazamiento de una planta desaladora se deben contemplar los siguientes aspectos:

- Proximidad a la costa: Es necesario ubicar la planta en terrenos cercanos al borde costero para minimizar la longitud de las conducciones de captación y descarga, reduciendo costos y riesgos técnicos.
- Altura sobre el nivel del mar: Se recomienda emplazar la planta a más de 20 metros sobre el nivel del mar para minimizar riesgos asociados a tsunamis y asegurar el buen funcionamiento de los sistemas hidráulicos.
- Acceso a infraestructura eléctrica: El terreno debe contar con acceso factible a redes de energía eléctrica de alta capacidad o permitir el desarrollo de subestaciones eléctricas cercanas.
- Restricciones ambientales: El sitio debe estar fuera de áreas protegidas, tales como Parques Nacionales, Reservas Forestales, Santuarios de la Naturaleza, Áreas Marinas Protegidas, o Áreas de Manejo de Recursos Bentónicos.
- Compatibilidad con el uso de suelo municipal: Debe asegurarse que el terreno esté habilitado para uso industrial conforme al Plan Regulador Comunal o Intercomunal vigente.
- Disponibilidad de terreno propio o facilidad de adquisición: La propiedad debe preferentemente ser fiscal o privada sin cargas que dificulten su adquisición o uso.
- Concesión marítima: Para las obras de captación y descarga (inmisario y emisario), se requiere tramitar una concesión marítima con la Autoridad Marítima (DIRECTEMAR).
- Autorizaciones y servidumbres: Se deben gestionar servidumbres de paso

para la conducción de agua producto hasta los usuarios, así como servidumbres eléctricas

Basándonos en experiencias recientes como la “Planta Desaladora de Atacama” desarrollada por ECONSSA [7] y el estudio para la gestión de proyectos de plantas desaladoras “Desalination project cost estimating and management, by Taylor & Francis Group” [11], en la tabla 10 se estima el área requerida para una planta de 1.000 l/s:

Tabla 10 Superficie requerida para implementar planta desaladora de capacidad 1000 l/s

Fuente Proyecto Planta desaladora Atacama [7] [11].

Planta principal de desalación	10–12 ha
Zonas de almacenamiento (químicos, repuestos, agua tratada)	4 ha
Subestación eléctrica y patios eléctricos	2 ha
Vías internas y zonas de circulación	2 ha
Áreas de expansión futura y seguridad	4 ha
ESTIMADO TOTAL	22–24 ha

6.6 Proyecto de Ley N° 11.608-09 [9].

Actualmente, se encuentra en tramitación en el Congreso Nacional el Proyecto de Ley sobre el uso de agua de mar para desalinización (Boletín N°11.608-09), cuyo objetivo es establecer un marco normativo específico para regular las concesiones y destinaciones de uso de agua de mar con fines de desalinización. Este proyecto busca entregar certezas jurídicas y técnicas a los desarrolladores públicos y privados, así como asegurar un desarrollo sostenible y planificado de esta tecnología clave para la seguridad hídrica.

El proyecto contempla una estructura legal robusta, dividida en 30 artículos y 4 disposiciones transitorias. Destaca la creación de una *Estrategia Nacional de Desalinización*, la cual se formulará mediante procesos participativos y deberá

considerar criterios técnicos, ambientales y territoriales para orientar el desarrollo armónico de esta infraestructura en el país.

Uno de los ejes centrales del proyecto es el traspaso de competencias a la Dirección General de Aguas (DGA), que será el organismo encargado de tramitar, otorgar, fiscalizar y revocar las concesiones o destinaciones para la extracción y desalinización de agua de mar. Se introducen también los conceptos de “concesión” (para entidades con patrimonio propio) y “destinación” (para servicios públicos sin patrimonio), ambos limitados en el tiempo y sujetos a pagos por uso de bienes nacionales de uso público.

Se establecen criterios de prioridad para el otorgamiento de concesiones, privilegiando el consumo humano, el saneamiento y la protección ambiental. En este marco, la normativa permite que hasta un 5% de la producción de agua desalinizada de proyectos con fines industriales pueda ser destinada al abastecimiento humano por razones de interés público.

La iniciativa contempla procedimientos para la solicitud y tramitación de concesiones, exigencias en materia de evaluación ambiental, definición de servidumbres, normas de fiscalización y causales de caducidad. Se incorpora una tipificación precisa de infracciones y sanciones, buscando reducir la discrecionalidad y fortalecer el control sobre estas actividades.

En síntesis, este proyecto de ley representa un paso relevante hacia la institucionalización del desarrollo de la desalinización en Chile, proponiendo un marco jurídico coherente con los desafíos de cambio climático, planificación territorial y gestión integrada de recursos hídricos, y posicionando la desalinización como una herramienta clave para la resiliencia hídrica del país.

En resumen, este proyecto de ley busca establecer una normativa que especifique lo siguiente:

- ✓ Regule la titularidad del agua desalinizada.
- ✓ Establezca un régimen de concesiones administrativas para su uso.
- ✓ Defina los permisos requeridos y las instituciones competentes.
- ✓ Establezca la priorización del consumo humano en situaciones de escasez.

A continuación, se muestra la imagen 6, donde se detalla los avances del proceso de aprobación del proyecto de ley Ley N° 11.608-09.

Fecha	Evento Clave
25.01.2018	Ingreso de la moción parlamentaria
05.04.2021	Aprobación en general del 2° informe (5 artículos)
09.03.2022	Gobierno anterior presenta indicación sustitutiva (30 artículos + 4 transitorios)
2° semestre 2022	Ejecutivo analiza propuesta y evalúa nuevas indicaciones
Mayo 2023	Se conforma mesa técnica entre el MOP y asesores del Senado
May - Sep 2023	Mesa sesiona en 31 ocasiones entre el 11 de mayo y el 29 de septiembre

Imagen 6 Avances del proyecto de Ley N° 11.608

Fuente: Proyecto de Ley N° 11.608-09 [9].

Dentro de este objetivos de este estudio, se alinea con los objetivos del Proyecto de Ley N° 11.608-09, el cual propone la creación de una Estrategia Nacional de Desalinización mediante una estructura legal que considera criterios técnicos, ambientales y territoriales. El enfoque multidimensional de esta investigación, que evalúa la viabilidad tecnológica, energética, económica y normativa de implementar plantas desaladoras en Chile, constituye un insumo importante para orientar dicha estrategia.

6.7 Etapas y plazos para la instalación y operación de una planta desaladora en Chile

El desarrollo de un proyecto de desalación de agua de mar involucra una secuencia estructurada de hitos técnicos, normativos y constructivos que deben ser abordados de manera coordinada para asegurar su viabilidad. Cada una de estas etapas presenta requerimientos específicos en términos de estudios, permisos y ejecución, lo cual se traduce en plazos que pueden extenderse a lo largo de varios años. A continuación, se describen las principales fases del proyecto y sus tiempos de ejecución promedio, considerando antecedentes nacionales e internacionales.

a) Estudios de Factibilidad y Diseño Conceptual

Evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto. Incluye estudios oceanográficos, geotécnicos y de demanda hídrica. Plazo estimado 6 a 12 meses.

b) Obtención de Permisos y Autorización, evaluación de Impacto Ambiental (EIA o DIA)

Presentación del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o Declaración de Impacto Ambiental (DIA) ante el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), según corresponda al alcance del proyecto. Plazo estimado EIA 12 a 24 meses, DIA: 6 a 12 meses

El plazo incluye el tiempo para la elaboración del estudio y el proceso de evaluación por parte de las autoridades competentes.

c) Obtención de Concesión Marítima

Trámite ante la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas, gestionado por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), para el uso del borde costero necesario para las instalaciones de captación y descarga. Plazo estimado 12 a 18 meses.

Este trámite puede iniciarse en paralelo con la evaluación ambiental, pero la concesión definitiva suele otorgarse una vez obtenida la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) favorable.

d) Permisos Sectoriales

Obtención de permisos específicos según la naturaleza del proyecto, tales como:

- ✓ Permiso para la construcción de obras hidráulicas (Dirección General de Aguas).
- ✓ Permiso sanitario para la producción y distribución de agua potable (Superintendencia de Servicios Sanitarios).
- ✓ Permisos municipales de construcción y obras.

Plazo Estimado 6 a 12 meses. Estos permisos pueden tramitarse en paralelo, pero su aprobación está condicionada a la obtención previa de la RCA favorable.

e) Construcción

Ejecución de las obras civiles, instalación de equipos y construcción de infraestructuras asociadas. Plazo Estimado 18 a 36 meses, dependiendo de la envergadura del proyecto.

f) Puesta en Marcha y Pruebas Operacionales

Realización de pruebas de funcionamiento, ajustes operacionales y verificación del cumplimiento de los parámetros de calidad del agua. Plazo Estimado 3 a 6 meses.

g) Inicio de Operación Comercial

Inicio de la producción y distribución de agua desalinizada para consumo según los fines proyectados. Durante la operación, se deben cumplir con las normativas de monitoreo ambiental y reportes periódicos a las autoridades competentes.

El tiempo total estimado para un proyecto de mediana a gran escala puede oscilar entre 6 a 10 años, dependiendo del tamaño, ubicación, grado de conflictividad ambiental, modalidad contractual que se adopte para el contrato y capacidad institucional del proponente.

A modo de resumen se muestra en la imagen 7, cual es la secuencia de los hitos más relevantes para este tipo de proyectos y los plazos promedios que toma cada uno.



Imagen 7 Flujo de actividades para implementación de planta desaladora en Chile

Fuente: Elaboración propia.

6.8 Costos generales y requerimientos energéticos.

Para estimar la energía requerida y los costos generales asociados para la implementación de la solución propuesta, la cual permita abordar la demanda de agua a nivel Nacional, se considerarán los antecedentes recopilados en el estado del arte, los cuales incluyen datos referidos a los volúmenes de demanda de agua, así como los costos estimados de inversión y de energía.

La estimación de la energía requerida en función de la demanda de agua presentada en la Tabla 5, la cual presenta la suma de los volúmenes de agua que serán considerados en el análisis de costos generales.

a) Costos generales.

A partir de los antecedentes presentados en las Tablas 5 y 11, se realiza una estimación de la cantidad de plantas desaladoras necesarias para cubrir la demanda de agua a nivel nacional. En esta etapa del estudio, se estima la inversión inicial para la adquisición de equipos ExFab requerida como los costos operacionales anuales vinculados a su funcionamiento. Esta evaluación nos permite dimensionar el alcance económico de una estrategia de desalinización a gran escala en Chile.

Tabla 11 Costos generales de planta desaladora

Fuente: Asociación latinoamericana de desalación y reúso de agua Adalyr [13]

Producción de Agua Tratada (agua desalinizada potable o industrial u otro uso)			# Habitantes que Abastece		Precio exFab Desaladora (sólo equipamiento)	OPEX: Costo Producción x m3 (Con Operador)	Potencia Consumida	Tiempo de Implementación	Dimensiones aprox. Planta desaladora (sin auxiliares)
			50 l/d pp (emergencia)	150 l/d pp (estándar)					
(m3/día)	(m3/hora)	(l/s)	(# hab)	(# hab)	(USD)	(USD)	(kWh)	(Meses)	(m2)
10	0,4	0,1	200	67	65.000	1,46	1,7	3	25
100	4,2	1,2	2.000	667	200.000	0,99	17	6	50
500	20,8	5,8	10.000	3.333	498.000	0,57	73	6	100
1.000	41,7	11,6	20.000	6.667	596.400	0,55	138	6	150
2.000	83	23	40.000	13.333	871.200	0,54	267	6	200
8.640	360	100	172.800	57.600	9.000.000	0,47	1.080	24	5.000
43.200	1.800	500	864.000	288.000	45.000.000	0,47	5.400	60	14.000
86.400	3.600	1.000	1.728.000	576.000	90.000.000	0,46	10.800	72	20.000

Los valores indicados en la tabla 11 referente al precio ExFab de equipamiento de planta desaladora hace referencia al costo de los equipos necesarios. En el desarrollo de la evaluación económica de este estudio se contemplan todos los costos relacionados con el CAPEX.

b) Requerimientos energéticos para abordar la demanda de agua.

De acuerdo con los valores de consumo energético asociadas a la demanda de agua (indicados en tabla 4) mediante plantas desaladoras que operan con tecnología de ósmosis inversa indicados en tabla 5, se considera un rango de consumo específico entre 3 y 4 kWh/m³ de agua tratada.

Se empleará la siguiente fórmula para calcular la energía total requerida:

$$\text{Energía Total (kWh/día)} = \text{Demanda Total (m}^3\text{/día)} \times \text{Consumo específico (kWh/m}^3\text{)}$$

Energía requerida para operar las plantas de ósmosis inversa necesarias para cubrir

la demanda nacional de agua potable e industrial.

Tabla 12 Energía requerida para demanda de agua

Fuente: Elaboración propia.

	Energía requerida demanda agua a nivel nacional		
	2015	2030	2040
kWh/m³	3	3	3
Demanda Mm³/año	10.339	10.874	11.413
GWh/año	31.016	32.621	34.238

La tabla 12 muestra la estimación del requerimiento energético asociado a la producción de agua mediante desalinización para los años 2015, 2030 y 2040 para la demanda nacional, considerando un consumo específico de 3 kWh/m³. Bajo este supuesto, se observa un aumento gradual en la demanda energética. En términos anuales, el consumo total de energía se incrementa desde 31.016 GWh/año a 34.238 GWh/año. Estas proyecciones permiten dimensionar el desafío energético que implica la implementación de un sistema de abastecimiento hídrico basado en plantas desaladoras a escala nacional, y constituyen un insumo clave para el análisis de su viabilidad técnica y su articulación con la planificación energética del país, especialmente en escenarios de transición hacia fuentes renovables.

Con el objetivo de dimensionar el requerimiento energético asociado a la implementación de plantas desaladoras a nivel nacional, se analiza el estado de la generación eléctrica en Chile, con el fin de establecer una comparación entre las necesidades energéticas del estudio y la capacidad del sistema eléctrico nacional.

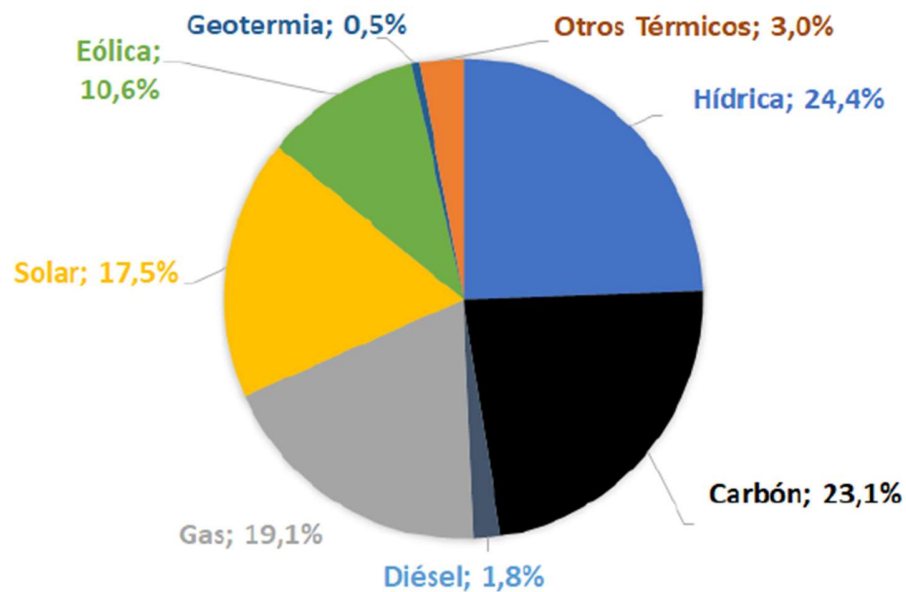


Gráfico 4 Generación a nivel nacional SEN 2022.

Fuente: Reporte anual de desempeño del sistema eléctrico nacional 2022, CEN [20].

Del gráfico 4 se muestra la generación de energía en el SEN durante el año 2022, la cual alcanzó los 83,6 TWh, de los cuales 16,6 TWh corresponden a energía solar, 9,9 TWh a energía eólica y 23,9 TWh a energía hídrica. Chile presenta una matriz energética robusta en ERNC, lo cual favorece al suministro de energía limpia a los requerimientos de abastecer este recurso con este tipo de energías.

Respecto a la capacidad instalada es relevante dimensionar su potencial de generación con el fin de poder evaluar si nuestro sistema SEN tiene la capacidad de entregar esta energía requerida.

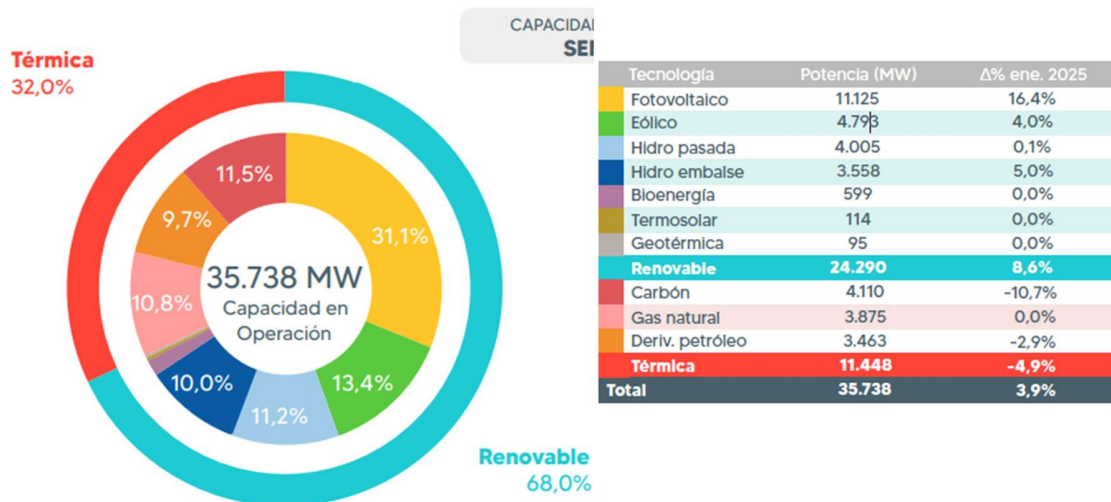


Gráfico 5 Capacidad de generación desagregada por tipo de fuente

Fuente: Reporte anual de desempeño del sistema eléctrico nacional 2024, CEN.

El gráfico 5 muestra la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en Chile, el cual alcanza los 35.738 MW, de los cuales un 68% corresponde a fuentes renovables, lo que refleja un cambio estructural hacia una matriz energética más limpia y sustentable. Este predominio de energías renovables, destacan la solar (31,1%), eólica (13,4%) e hidráulica (11,2%), lo cual se alinea directamente con los requerimientos energéticos para la implementación masiva de plantas desaladoras en el país.

En este contexto, la alta participación de ERNC en la matriz eléctrica nacional representa una ventaja estratégica para el desarrollo de infraestructura de desalinización a gran escala, especialmente en las regiones norte y centro-norte del país, donde coinciden la escasez hídrica, el alto potencial solar y la presencia de nodos energéticos relevantes.

La potencia requerida para abastecer la operación de todas las plantas desaladoras proyectadas a nivel nacional representa aproximadamente un 11% de la capacidad total instalada del Sistema Eléctrico Nacional (3.909 MW de un total de 35.738 MW). Bajo este escenario, es técnicamente factible cubrir la demanda energética de desalinización con la capacidad actual del sistema.

En el caso de abastecer exclusivamente con fuentes ERNC, se estima que se requeriría una capacidad instalada de entre 10.437 MW (eólica) o 14.611 MW (solar) para generar los 32 TWh anuales necesarios, lo cual supera ampliamente la

potencia destinada a desalinización. Esto evidencia que, aun considerando únicamente tecnologías renovables variables, sería posible suplir la demanda energética del proceso, especialmente si se implementan soluciones complementarias como el almacenamiento energético y una gestión flexible de la producción. Cabe destacar que este análisis no contempla eventuales limitaciones del sistema de transmisión, que deberán abordarse en una etapa posterior.

c) Estimación costo anual PPA.

Si bien el costo de la energía forma parte del OPEX del proyecto, se analizará específicamente costo proyectando que estos valores pueden impactar como alternativa de suministro de energía renovable. Contratación mediante un acuerdo de compraventa de energía Power Purchase Agreement, PPA.

Tabla 13 Valores anuales de energía de acuerdo con contratos PPA
Fuente CNE y CEN.

Zona / Barra	Precio PPA Renovable Promedio (USD/MWh)	Fuente y energía considerada
Norte (Atacama)	32,5	Solar fotovoltaica y eólica - Energía Abierta CNE, Licitaciones Renovables 2023-2024
Centro (Santiago/Quillota)	42,5	Solar fotovoltaica, eólica e hidro de pasada - Energía Abierta CNE, Coordinador Eléctrico Nacional 2024
Sur (Puerto Montt)	52,5	Eólica e hidro de pasada - SEN 2024, proyectos renovables zona sur

La tabla 13 muestra un resume los precios promedio de contratos PPA de energías renovables (solar, eólica e hidro de pasada) en el norte, centro y sur de Chile, junto con el costo anual estimado de energía para un consumo de referencia. Los precios fueron obtenidos de fuentes oficiales como Energía Abierta (CNE) y el Coordinador Eléctrico Nacional, reflejando condiciones actuales del mercado renovable chileno.

Se observa que los costos anuales son más bajos en el norte, donde predomina la energía solar, y más altos en el sur, debido al mayor costo asociado a la generación renovable en esa zona.

6.9 Evaluación económica

La presente tesina tiene por objetivo evaluar la viabilidad económica de implementar una planta desaladora de agua de mar mediante tecnología de ósmosis inversa, con una capacidad de producción de 1.000 litros por segundo, en zonas costeras de Chile. Esta planta se considera como un modelo tipo, cuya evaluación económica y técnica permite extrapolar resultados y proyecciones al requerimiento nacional de abastecimiento de agua potable.

La estimación de los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) constituye el eje central del análisis económico. Para ello, se utilizan referencias provenientes del estado del arte y de casos reales citados. Esta aproximación permite sustentar decisiones estratégicas para la eventual implementación de infraestructura de desalación a gran escala en el país.

6.9.1 Metodología

La metodología a utilizar en esta tesis se basa en una aproximación para estimar y evaluar los costos y beneficios asociados a la implementación de una planta desaladora de agua de mar mediante ósmosis inversa, con una capacidad de tratamiento de 1.000 litros por segundo. Con esto se extrapola al requerimiento nacional.

En primer lugar, se desarrollará un flujo de caja proyectado a 30 años. El flujo incluirá los siguientes componentes:

- CAPEX: costos de inversión inicial, incluyendo obras civiles, adquisición e instalación de equipos, sistemas eléctricos, conducción de agua, permisos, ingeniería y contingencias.
- OPEX: costos anuales de operación, tales como consumo energético, reposición de membranas, productos químicos, personal, mantenimiento, monitoreo ambiental y disposición de salmuera.
- Proyecciones de ingresos o beneficios esperados: dependiendo del modelo de negocio, se evaluará el valor de venta del agua tratada, subsidios potenciales u otros flujos de ingresos aplicables.

Con base en esta información, se calcularán los principales indicadores financieros que permitan evaluar la rentabilidad del proyecto:

- Valor Actual Neto (VAN): para estimar la rentabilidad en términos absolutos descontando los flujos futuros al valor presente.

- Tasa Interna de Retorno (TIR): para determinar la tasa de rentabilidad del proyecto.
- Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI): tiempo requerido para recuperar el capital invertido.

Finalmente, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad sobre las variables más relevantes que pueden afectar significativamente los resultados del proyecto, tales como la tasa de descuento, el precio de la energía eléctrica y el valor de venta del agua tratada. Esto permitirá identificar umbrales de rentabilidad y evaluar la robustez del proyecto frente a escenarios de incertidumbre.

6.9.2 Estimación costos

a) CAPEX

Para definir el CAPEX se consideran valores referenciales obtenidos del estado del arte, referencias citadas y de información levantada desde proyectos de desalación ya ejecutados.

Se contempla no solo los costos directos asociados a la construcción e instalación de los sistemas, sino también los costos indirectos vinculados a la gestión, permisos y diseño de ingeniería. En la Tabla 16 se detalla la estimación de los costos asociados a un proyecto de planta desaladora con tecnología de ósmosis inversa, con una capacidad de producción de 1.000 litros por segundo. Esta distribución permite visualizar el peso relativo de cada componente sobre el costo total.

Tabla 14 Detalle de composición CAPEX para una planta desaladora de capacidad 1000 l/s.

Fuente elaboración propia.

Ítem	Porcentaje	Costos MMUSD
Infraestructura para captar agua de mar: pozos de playa, torres, tuberías.	21%	39
Sistema principal de desalación: membranas, bombas de alta presión, racks de filtrado.	20%	37
Equipos y procesos previos a la ósmosis: filtración, dosificación química, tamices, etc.	10%	18
Ajustes finales al agua (pH, remineralización, desinfección) antes de su distribución.	2%	4
Tanques, sistemas de bombeo y redes para distribuir el agua desalinizada.	10%	18
Instalaciones eléctricas, controladores, tableros, instrumentación y automatización.	8%	15
Obras civiles, habilitación del sitio, permisos ambientales, y balance de planta (BOP).	8%	15
Sistemas para el vuelco seguro de salmuera y tratamiento de sólidos retenidos.	9%	17
Ingeniería de detalle, gestión del proyecto, desarrollo técnico y costos indirectos.	12%	22
TOTAL CAPEX		184

Para el flujo de caja se agrupan los ítems de manera de simplificar el análisis.

Tabla 15 Costos agrupados del CAPEX

Fuente elaboración propia.

ITEM	PORCENTAJE	MMUSD
Obras civiles e infraestructura	29%	\$ 53
Equipos	59%	\$ 108
Ingeniería y desarrollo proyecto	12%	\$ 22

b) OPEX

El análisis de costos de operación (OPEX) es fundamental para evaluar la sostenibilidad económica de una planta desaladora durante su ciclo de vida útil. Estos costos corresponden a los gastos anuales recurrentes asociados a la operación, mantenimiento y cumplimiento normativo del sistema, e incluyen componentes tanto fijos como variables. En esta tesis, se estima el OPEX para una planta tipo de ósmosis inversa con capacidad de 1.000 l/s, considerando las condiciones técnicas y energéticas del contexto chileno.

Tal como se observa en la Tabla 16, los principales costos operacionales están dominados por el consumo de energía eléctrica, que representa el 50% del total, seguido por los costos de personal (15%) y los insumos químicos utilizados en el pretratamiento y limpieza de membranas (8%). También se consideran ítems relevantes como mantenimiento, monitoreo ambiental, reemplazo de membranas y gestión de residuos. Esta desagregación permite identificar oportunidades de eficiencia, especialmente en el uso de energía, que es el principal determinante del costo operativo en este tipo de tecnologías

Tabla 16 Detalle de composición OPEX para una planta desaladora de capacidad 1000 l/s.

Fuente elaboración propia.

Ítem	Porcentaje	MMUSD
Energía eléctrica (operación bombas RO, captación, distribución)	50%	5,9
Costos de personal y administración	15%	1,8
Químicos de pretratamiento y limpieza CIP	8%	0,9
Costos de mantenimiento correctivo y preventivo	9%	1,1
Reemplazo de membranas y filtros de cartucho	7%	0,8
Monitoreo ambiental, seguros, otros	6%	0,7
Manejo y disposición de residuos y salmuera	3%	0,4
Costo anual concesión marítima	2%	0,3
TOTAL		11,7

c) Costo concesión marítima

Uno de los aspectos fundamentales a considerar es la obtención de la concesión marítima para el uso de bienes nacionales de uso público, como el borde costero. Esta concesión, regulada por la DIRECTEMAR, implica costos anuales que deben ser incorporados en la evaluación económica del proyecto. A partir del análisis de antecedentes referenciados [15] [7] y casos reales —incluyendo proyectos como el de Punta Zorro en Atacama, se identifican valores estimativos por hectárea. Estos costos son relevantes para definir la viabilidad financiera.

Tabla 17 Costo anual de concesión marítima.

Fuente elaboración propia.

Concepto	Valor estimado en UF	Valor estimado en CLP	Valor estimado en USD	Fuente/Referencia
Uso concesión marítima	1 UF/m ² /año	\$39.075,41/m ² /año	≈ \$40,24/m ² /año	Basado en prácticas industriales observadas en Chile (DIRECTEMAR y proyectos similares)
Uso concesión marítima	400 UF/ha/año	\$15.630.164/ha/año	≈ \$16.099/ha/año	Basado en prácticas industriales observadas en Chile (DIRECTEMAR y proyectos similares)

Notas:

- Valor de la UF al 30 de abril de 2025: \$39.075,41 [18].
- Promedio del dólar observado en abril de 2025 \$971,37 por USD [18].

La tabla 17 muestra valores referenciales para el pago anual por concepto de uso de concesión marítima en proyectos de plantas desaladoras en Chile.

6.9.3 Análisis de flujo de caja

Para el desarrollo de esta tesis, se elaboró un flujo de caja proyectado que permite analizar la viabilidad económica de una planta desaladora de tipo ósmosis inversa, con una capacidad de tratamiento de 1.000 litros por segundo con un horizonte de 30 años. Se considera los costos más relevantes y beneficios esperados a lo largo de la vida útil del proyecto, y sirve como base para calcular indicadores económicos como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).

El análisis se apoya en antecedentes técnicos y económicos recopilados del estado del arte y referencias citadas. Para la estimación de la inversión inicial (CAPEX), consideré un total de 184 MMUSD, desglosados en ítems como infraestructura de captación, sistema de alta presión, automatización, obras civiles y costos indirectos (ver Tabla 14 y 16). Por otro lado, los costos de operación (OPEX) fueron estimados en 11,7 MMUSD anuales (ver Tabla 14, 15 y 16).

Esta estructura de flujo de caja permitirá modelar distintos escenarios de sensibilidad frente a variaciones en el precio de la energía, el valor de venta del agua tratada y la tasa de descuento, con el fin de evaluar la factibilidad financiera del proyecto en el contexto chileno actual.

Depreciación del proyecto

Para la depreciación se presenta la tabla 18 de acuerdo con lo estipulado por SII [17].

Tabla 18 Detalle de depreciación activos planta desaladora.

Fuente SII.

Activo	Plazo tributario típico (normal/acelerado)
Obras civiles (estanques, fundaciones, edificios)	25–40 años / 8–13 años
Bombas, motores, válvulas	10–15 años / 3–5 años
Membranas de ósmosis inversa	5 años / 2 años
Tuberías, accesorios de HDPE o acero	20–30 años / 6–10 años
Equipos eléctricos, tableros, variadores	10 años / 3 años
SCADA y sistemas de control	8–12 años / 3–4 años
Software de automatización	3 años

Dado los rangos de depreciación indicados en la tabla 18, se opta por considerar una depreciación acelerada del proyecto a 10 años.

Respecto al valor de venta del agua [16], este puede variar de acuerdo con valores corresponden a rangos observados en diferentes usos como humano, industrial y agrícola.

Valor venta agua generada.

Las fuentes utilizadas incluyen publicaciones de asociaciones del rubro y tarifas sanitarias vigentes.

Tabla 19 Valores estimados de venta de agua potable normal y de plantas desaladoras.

Fuentes SASIPA y ACADES [16].

Fuente del Agua	Precio Aproximado (CLP/m ³)	Fuente Referencial
Agua Convencional	\$755 – \$1.500	SASIPA, empresas sanitarias y tarifas urbanas/rurales
Agua Desalinizada	\$1.400 – \$5.600	ACADES (2024), estudios técnicos y costos de transporte

Como se aprecia en la tabla 19, los valores presentan una variación importante lo cual va a depender el costo que tenga la generación de agua en una planta desaladora y las aristas a considerar en el proyecto.

Flujo de caja.

Con los antecedentes indicados anteriormente, se proyecta un análisis de flujo de caja para un proyecto de 1000 l/s con los siguientes supuestos:

- ✓ Valor de venta agua producida de 1.6 USD/M³.
- ✓ Tasa de descuento real 12%.
- ✓ Proyección a 30 años.
- ✓ Depreciación a acelerada a 10 años
- ✓ Costo energía 52 USD/MWh.

Tabla 20 Flujo de caja para proyecto de planta desaladora de 1000 l/s.

Fuente elaboración propia.

Flujo de Caja Proyecto (1000 l/s)		Año 0	Año 1	Año 29	Año 30
Inversiones					
Obras civiles e infraestructura costera.	MMUSD	53			
Equipamiento	MMUSD	108			
Ingeniería y desarrollo proyecto	MMUSD	22,04			
Costos no planificados (10%)	MMUSD	18,4			
Total Inversion	MMUSD	-202,0	0	0	0
Ingresos					
Venta agua tratada	MMUSD		50,5	50,5	50,5
Subtotal Ingresos	MMUSD		50,5	50,5	50,5
Costos O&M					
Energía eléctrica (operación bombas RO, captación, distribución)	MMUSD		5,9	5,9	5,9
Costos de personal y administración	MMUSD		1,8	1,8	1,8
Químicos de pretratamiento y limpieza CIP	MMUSD		0,9	0,9	0,9
Costos de mantenimiento correctivo y preventivo	MMUSD		1,1	1,1	1,1
Reemplazo de membranas y filtros de cartucho	MMUSD		0,8	0,8	0,8
Monitoreo ambiental, seguros, otros	MMUSD		0,7	0,7	0,7
Manejo y disposición de residuos y salmuera	MMUSD		0,4	0,4	0,4
Concesión marítima	MMUSD		0,3	0,3	0,3
Subtotal Costos	MMUSD		11,7	11,7	11,7
Ingresos- Costos					
Subtotal Ingresos	MMUSD		50,5	50,5	50,5
Subtotal Costos	MMUSD		11,7	11,7	11,7
Total Ingresos-Costos (EBITA)	MMUSD		38,7	38,7	38,7
Utilidad Bruta					
Depreciación Equipos	MMUSD		10,8		
Total Utilidad Bruta	MMUSD		27,9	38,7	38,7
Utilidad Neta					
Impuestos (27%)	MMUSD		7,5	10,5	10,5
Total Utilidad Neta	MMUSD		20,4	28,3	28,3
Depreciación Equipos					
			10,8		
Flujo caja		-202,0	31,2	28,3	28,3

6.9.4 Indicadores económicos

Del análisis anterior, se generan los indicadores mencionados en la metodología punto 7.9.1. Se presenta la tabla 21 los indicadores.

Tabla 21 Indicadores económicos proyecto planta desaladora.

Fuente elaboración propia.

Tasa de descuento	12%
TIR	14%
VAN MMUSD	26
PAYBACK años	7

- ✓ TIR 14 %: Supera la tasa de descuento (12 %), lo que indica que el proyecto genera un retorno marginalmente superior al costo del capital. Aunque es aceptable, idealmente se espera un mayor spread para aumentar el atractivo del proyecto.
- ✓ VAN 26 MMUSD: El Valor Actual Neto positivo demuestra que el proyecto genera valor presente neto para los inversionistas. Es una señal clara de rentabilidad desde el punto de vista económico-financiero.
- ✓ Payback 7 años: Si bien 7 años es un período relativamente largo para recuperar la inversión, puede considerarse aceptable en proyectos de infraestructura como plantas desaladoras, que tienen vidas útiles superiores a 30 años.

6.9.5 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite identificar las variables que inciden de forma más significativa en la viabilidad del proyecto. Se realizaron iteraciones en el flujo de caja con el fin de visualizar cómo se comporta el VAN y la TIR.

Antes de realizar el análisis de sensibilidad se itera el modelo económico para el VAN sea 0 USD, con lo cual se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 22 Análisis de flujo de caja para el VAN igual a 0 USD.

Fuente elaboración propia.

Tasa de descuento	14%
TIR	14%
VAN MMUSD\$	\$0,0
PAYBACK años	7

En la Tabla 22 se iteró el flujo de caja con el objetivo de obtener un VAN igual a cero, lo que indica que el proyecto alcanza su punto de equilibrio, recuperando la inversión a la tasa mínima exigida (tasa de descuento). En este caso, la TIR coincide con dicha tasa (14,1%), lo que justifica un VAN de \$0,0 MMUSD. Esto implica que el proyecto no genera pérdidas ni utilidades adicionales, pero cumple con el costo de oportunidad del capital. Este resultado constituye un criterio fundamental para evaluar la viabilidad mínima de una inversión.

A continuación, se presenta el análisis de sensibilidad para un proyecto de planta desaladora de 1000 l/s.

a) Primer análisis de sensibilidad.

Se evaluaron dos factores clave, la tasa de descuento real y el valor de venta del agua tratada. Estas variables fueron seleccionadas por su impacto directo en los flujos de caja proyectados y en los principales indicadores económicos del proyecto, como el VAN y es TIR. A continuación, se muestra la tabla 24 los resultados del análisis. Importante destacar que este análisis considera el costo de energía en 85 USD/MWh.

Tabla 23 Resultados del primer análisis de sensibilidad VAN.

Fuente elaboración propia.

ANÁLISIS SENSIBILIDAD VAN (MMUSD)					
		VALOR VENTA AGUA TRATADA USD/M3			
		1	1,5	2	2,5
TASA DESCUENTO REAL	8%	(\$65)	\$48	\$161	\$274
	10%	(\$82)	\$16	\$114	\$212
	12%	(\$96)	(\$10)	\$76	\$162
	14%	(\$108)	(\$31)	\$45	\$121
	16%	(\$117)	(\$49)	\$20	\$88

El análisis de sensibilidad presentado en la Tabla 23 muestra cómo varía el Valor Actual Neto (VAN) en función de la tasa de descuento real y el valor de venta del agua tratada. Se observa que el proyecto solo presenta VAN positivo cuando el precio del agua supera los 1,5 USD/m³ y la tasa de descuento no excede el 12 %. El escenario más favorable (VAN de 274 MMUSD) ocurre con una tasa de descuento del 8 % y un valor de 2,5 USD/m³. En cambio, con precios de agua bajo 1,5 USD/m³, el proyecto no es rentable. Esto evidencia una alta sensibilidad del VAN ante cambios en ambas variables, siendo el precio del agua el factor más determinante.

Respecto a la TIR, se presenta los resultados.

Tabla 24 Resultados del primer análisis de sensibilidad TIR.

Fuente elaboración propia.

ANÁLISIS SENSIBILIDAD TIR					
		VALOR VENTA AGUA TRATADA USD/M3			
		1	1,5	2	2,5
TASA	8 at 16%	3,0%	11,2%	17,8%	24,0%

Se acuerdo a los resultados indicados en la tabla 24, la TIR aumenta significativamente con el valor de venta del agua. A 1 USD/m³, el proyecto no es atractivo (TIR de 3,0 %), pero desde 1,5 USD/m³ (TIR de 11,2 %) se acerca a la viabilidad financiera. Con precios de 2 USD/m³ o más, la TIR supera ampliamente el 12 %, confirmando que el proyecto es rentable bajo esos escenarios.

Respecto a la TIR, esta no depende de la tasa de descuento porque es un indicador que se calcula internamente, buscando la tasa que hace que el VAN sea igual a cero. Es decir, es inherente al flujo de caja del proyecto y no requiere comparar contra una tasa externa para su cálculo.

b) Segundo análisis de sensibilidad.

Se evalúa el costo de la energía (USD/MWh) y el valor de venta del agua tratada (USD/m³). Estas variables fueron seleccionadas por su impacto directo en los costos operacionales y en la generación de ingresos, lo que afecta significativamente los flujos de caja proyectados y, en consecuencia, los principales indicadores económicos del proyecto, como VAN y TIR. Se considera para este análisis una tasa de descuento real del 12%.

Tabla 25 Resultados de segundo análisis de sensibilidad del VAN.

Fuente elaboración propia.

SEGUNDO ANÁLISIS SENSIBILIDAD VAN (MMUSD)						
		COSTO DE ENERGÍA USD/MWh				
		30	50	70	90	110
VALOR	1	(\$68)	(\$78)	(\$88)	(\$99)	(\$109)
VENTA AGUA	1,5	\$18	\$8	(\$2)	(\$13)	(\$23)
TRATADA	2	\$104	\$94	\$84	\$73	\$63
USD/M3	2,5	\$190	\$180	\$170	\$159	\$149

El segundo análisis de sensibilidad indicados en la tabla 25, se muestra cómo el VAN del proyecto varía ante distintos costos de energía y precios de venta del agua tratada. Se observa que el proyecto es rentable (VAN positivo) solo cuando el valor del agua es igual o superior a 2 USD/m³. En este rango, el VAN se mantiene positivo incluso con costos energéticos altos (hasta 110 USD/MWh), aunque con márgenes decrecientes. En contraste, con precios del agua bajo 1,5 USD/m³, el proyecto pierde viabilidad rápidamente a medida que aumenta el costo energético. Esto evidencia que la rentabilidad del proyecto depende fuertemente del precio de venta del agua y, en menor medida, del costo de la energía.

Tabla 26 Resultados del segundo análisis de sensibilidad TIR.

Fuente elaboración propia.

SEGUNDO ANÁLISIS SENSIBILIDAD SENSIBILIDAD TIR						
		COSTO DE ENERGÍA USD/MWh				
		30	50	70	90	110
VALOR	1	6,0%	5,0%	3,9%	2,8%	1,5%
VENTA AGUA	1,5	13,5%	12,6%	11,8%	10,9%	10,1%
TRATADA	2	19,9%	19,2%	18,4%	17,6%	16,9%
USD/M3	2,5	25,9%	25,2%	24,5%	23,8%	23,1%

De los resultados indicados en la tabla 26, la TIR mejora significativamente con mayores precios de venta del agua y se reduce al aumentar el costo de la energía. A un valor de 2 USD/m³, el proyecto mantiene una TIR robusta ($\geq 16,9\%$) incluso con altos costos energéticos, lo que demuestra una buena resiliencia. En cambio, con precios bajos del agua (1 USD/m³), la TIR cae por debajo del 6 %, volviendo el proyecto financieramente inviable.

En este segundo análisis, la TIR se ve afectada porque se están modificando dos

variables que impactan directamente los flujos de caja del proyecto: el valor de venta del agua tratada, que aumenta los ingresos, y el costo de la energía, que incrementa los costos operacionales. Como la TIR se calcula internamente a partir de esos flujos netos, cualquier cambio en ingresos o egresos afecta directamente su resultado.

Comparación de costo unitario de producción de agua.

La estimación del costo unitario de producción de agua desalada es un elemento clave para evaluar la viabilidad técnica y económica de este tipo de soluciones hídricas. Este indicador, expresado en USD/m³, nos da un valor unitario el cual se puede comparar con otros proyectos y poder realizar los análisis necesarios para la viabilidad del proyecto.

A continuación, se presentan los resultados del costo unitario de producción, junto con una comparación entre el valor obtenido en el presente estudio y aquellos reportados en la literatura y en proyectos relevantes en Chile, con el objetivo de contextualizar los resultados alcanzados.

Tabla 27 Resultados costo unitarios para una planta de 1000n l/s.

Fuente elaboración propia.

COSTOS UNITARIOS PARA UNA PLANTA DE 1000 L/S		
Producción anual de agua	31.536.000	m ³
CAPEX anualizado	25.082.086	USD
OPEX anualizado	11.712.783	USD
Costo Unitario producción	1,2	USD/m³

Formulas utilizada para el cálculo:

$$\text{CAPEX anualizado} = \text{CAPEX Total} \times \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad \text{Costo Unitario} = \frac{\text{OPEX} + \text{CAPEX anualizado}}{\text{Producción anual de agua}}$$

Tabla 28 Comparación de valores unitarios con otros proyectos.

Fuente elaboración propia.

Proyecto / Fuente	Tecnología principal	Escala (L/s)	Costo unitario (USD/m ³)	Comentarios
Valores obtenidos	Ósmosis inversa (OI)	1000	1,2	Incluye CAPEX y OPEX anualizados según flujo de caja propio
Montes (U. de Chile, 2011)	OI + Energía Solar CSP	2000	2,3–5,3	Rango según demanda y escenario financiero
Proyecto Econssa – PDAM (2022)	Ósmosis inversa (OI)	1200 (en fases)	~1,0	Estimado tarifario con CAPEX y OPEX incluidos. Proyecto con subsidio estatal

El valor obtenido en este estudio para una planta de ósmosis inversa de 1000 L/s es de 1,20 USD/m³, considerando un horizonte de 30 años, tasa de descuento del 12%, incluyendo tanto el CAPEX anualizado (25 MMUSD) como el OPEX (11,7 MMUSD) para una producción anual de 31 millones de m³.

De acuerdo con la tabla 28, el estudio de Montes (2011), que evalúa una planta de 2000 L/s con integración solar, reporta un rango de 2,32 a 5,27 USD/m³, dependiendo del escenario de demanda y de financiamiento. Estos valores son considerablemente más altos, principalmente debido a la inclusión de energía solar CSP y a las condiciones del modelo financiero proyectado.

Por otro lado, el proyecto PDAM de Econssa —una planta de osmosis inversa de 1200 L/s en Tarapacá — reporta un costo estimado de producción de aproximadamente 1,00 USD/m³. Este valor es más bajo que el obtenido en el presente análisis, pero se explica por el subsidio estatal que financió completamente la inversión inicial (CAPEX), lo que reduce artificialmente el costo unitario desde una perspectiva de mercado.

Estas comparaciones nos permiten analizar que los valores obtenidos en el desarrollo de esta tesis están bien encaminados. Importante destacar que la diferencia de esta tesina con los estudios y proyectos citados, este aborda la demanda del recurso agua a nivel país, con una mirada integral en lo energético y ambiental.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que el valor de costo unitario de 1,20 USD/m³ obtenido en este análisis es razonable y se encuentra dentro del rango esperado para plantas de gran escala sin subsidios.

6.10 Proyección de evaluación económica para demanda nacional.

Para la evaluación de los requerimientos asociados a plantas desaladoras destinadas al abastecimiento de agua potable en Chile, se considera la distribución de la demanda de agua consuntiva a nivel nacional. A partir de esta base, se estima la cantidad de plantas necesarias por región, tal como se observa en la Tabla 29. Esta distribución refleja una planificación gradual hacia el año 2040, incorporando criterios territoriales y de crecimiento demográfico. Se evidencia un aumento sostenido en regiones como Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, mientras que zonas extremas como Aysén presentan nula proyección en este tipo de infraestructura.

Tabla 29 Cantidad de plantas desaladoras requeridas para abordar demanda de agua por región.

Fuente elaboración propia.

Región	Unidades plantas desaladoras		
	2015	2030	2040
XV Arica y Parinacota	3	3	3
I Tarapacá	3	3	3
II Antofagasta	8	7	7
III Atacama	6	8	8
IV Coquimbo	18	26	29
V Valparaíso	27	29	31
XIII Metropolitana	64	67	71
VI O'Higgins	60	64	68
VII Maule	92	83	81
VII Biobío	30	31	35
IX Araucanía	8	8	9
XIV Los Ríos	3	6	8
X Los Lagos	6	7	8
XI Aysén	0	0	0
XII Magallanes	0	0	1
TOTAL	328	345	362

La tabla 29 muestra la proyección de requerimientos de plantas desaladoras en Chile para los años 2015, 2030 y 2040, con un aumento total de 328 a 362 unidades. Las regiones con mayor número proyectado para 2040 son el Maule (81), Metropolitana (71) y O'Higgins (68), lo que refleja una alta demanda hídrica, especialmente en sectores agrícolas e industriales, incluso en zonas no costeras. En el norte, regiones como Antofagasta, Atacama y Coquimbo mantienen una presencia relevante debido a su aridez y actividad minera. Aysén no presenta cambios y Magallanes incorpora una planta hacia 2040, lo que sugiere un posible impacto del cambio climático o aumento de demanda. La tendencia nacional muestra un crecimiento gradual, indicando la necesidad de planificar inversiones en infraestructura y transporte de agua para enfrentar desafíos futuros de abastecimiento hídrico.

Para un mayor detalle del requerimiento de agua se segrega la demanda de agua se detalla por los grupos principales de consumos.

Tabla 30 Demanda de agua requeridas para abordar requerimientos de agua a nivel nacional por tipo de uso.

Fuente elaboración propia.

Región	Demanda Agua potable rural y urbano (Mm ³ /año)			Demanda agua minero e industrial (Mm ³ /año)			Demanda agua agrícola (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040	2015	2030	2040	2015	2030	2040
XV Arica y Parinacota	14	28	36	1	1	1	73	68	63
I Tarapacá	22	30	35	56	55	58	17	17	17
II Antofagasta	39	45	50	181	148	136	46	42	42
III Atacama	18	19	20	40	49	34	140	189	210
IV Coquimbo	46	55	60	47	53	49	462	720	791
V Valparaíso	113	124	130	64	67	64	672	736	780
XIII Metropolitana	671	786	857	62	102	125	1270	1217	1253
VI O'Higgins	72	82	86	83	92	93	1723	1839	1955
VII Maule	60	64	67	33	51	63	2823	2504	2438
VII Biobío	113	124	129	351	423	545	476	433	416
IX Araucanía	45	49	52	26	47	60	172	168	171
XIV Los Ríos	23	34	35	75	146	196	5	7	8
X Los Lagos	39	43	45	138	186	211	3	3	4
XI Aysén	7	7	8	4	3	4	1	0	0
XII Magallanes	11	12	12	1	1	2	2	3	3
TOTAL	1.291	1.503	1.622	1.161	1.424	1.639	7.886	7.947	8.151

La tabla 30 presenta la proyección de demanda de agua potable, industrial y agrícola en Chile para los años 2015, 2030 y 2040. Se observa un aumento

sostenido en todas las categorías, especialmente en el sector agrícola, que concentra la mayor parte del consumo. Las regiones con mayor demanda proyectada al 2040 son Maule, O'Higgins y Metropolitana, con énfasis en el uso agrícola, lo que sugiere que allí se requerirá un número significativo de plantas desaladoras. En el norte, Antofagasta y Atacama destacan por su alta demanda industrial, lo que también justifica la instalación de plantas en esas zonas. El crecimiento general de la demanda refuerza la necesidad de ampliar la capacidad de desalación a nivel nacional para asegurar el abastecimiento futuro.

Con la demanda de agua establecida por regiones y por grupos de interés, se presenta la proyección de cantidad de plantas desaladoras.

Tabla 31 Cantidad de plantas desaladoras requeridas para abordar la demanda de agua nivel nacional por tipo de uso.

Fuente elaboración propia.

Región	Unidades plantas desaladoras agua potable rural y urbano			Unidades plantas desaladoras minero y industrial			Unidades plantas agrícola		
	2015	2030	2040	2015	2030	2040	2015	2030	2040
XV Arica y Parinacota	0	1	1	0	0	0	2	2	2
I Tarapacá	1	1	1	2	2	2	1	1	1
II Antofagasta	1	1	2	6	5	4	1	1	1
III Atacama	1	1	1	1	2	1	4	6	7
IV Coquimbo	1	2	2	1	2	2	15	23	25
V Valparaíso	4	4	4	2	2	2	21	23	25
XIII Metropolitana	21	25	27	2	3	4	40	39	40
VI O'Higgins	2	3	3	3	3	3	55	58	62
VII Maule	2	2	2	1	2	2	90	79	77
VII Biobío	4	4	4	11	13	17	15	14	13
IX Araucanía	1	2	2	1	1	2	5	5	5
XIV Los Ríos	1	1	1	2	5	6	0	0	0
X Los Lagos	1	1	1	4	6	7	0	0	0
XI Aysén	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XII Magallanes	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	41	48	51	37	45	52	250	252	258

La tabla 31 muestra la proyección del número de plantas desaladoras necesarias por región en Chile para los años 2015, 2030 y 2040, diferenciando su uso en agua potable (urbana y rural), uso minero-industrial y uso agrícola. Se observa un aumento moderado en las plantas para agua potable, de 41 unidades en 2015 a 51 en 2040, con un crecimiento más significativo en regiones de alta concentración poblacional como la Región Metropolitana, Valparaíso y Biobío, donde la presión

sobre los sistemas tradicionales de abastecimiento podría requerir fuentes alternativas como la desalación. Para el uso minero e industrial, las regiones del norte, en particular Antofagasta, Atacama y Tarapacá, concentran el mayor número de plantas, lo que responde al carácter intensivo en agua de sus actividades productivas. Destaca el caso de Biobío, que, a pesar de no estar en el norte, muestra un crecimiento sostenido en desalación industrial, lo cual puede estar relacionado con su perfil productivo y presión hídrica local. En el sector agrícola, la región del Maule lidera ampliamente con 77 unidades proyectadas para 2040, seguida por O'Higgins y Coquimbo, lo que reafirma el rol dominante de la agricultura en la demanda hídrica nacional y la necesidad de fuentes no convencionales para sostener su desarrollo. Este escenario implica importantes desafíos en materia de planificación territorial, inversiones en infraestructura de transporte de agua, y regulación del uso eficiente del recurso, especialmente en regiones del centro-sur donde la desalación se presenta como una medida de adaptación frente al cambio climático y la creciente escasez hídrica.

6.11 CAPEX, OPEX y costos unitarios para diferentes usos de agua.

La finalidad del uso del agua producida por una planta desaladora influye directamente en los costos de inversión (CAPEX), operación (OPEX) y en el valor unitario del recurso tratado. En el caso del consumo humano, las exigencias sanitarias son más estrictas, lo que requiere etapas adicionales como remineralización, desinfección y control de boro, elevando tanto la inversión inicial como los costos operacionales. Por el contrario, el uso agrícola permite una calidad de agua menos rigurosa, lo que simplifica el tratamiento y reduce los costos asociados. En aplicaciones industriales, los requerimientos varían según el sector: algunas industrias demandan agua ultrapura, mientras que otras requieren solo desmineralización, generando una variabilidad en los costos totales del proyecto.

Estas diferencias también se reflejan en la configuración del sistema de ósmosis inversa. Las plantas diseñadas para agua potable suelen incorporar sistemas de doble pasada, mientras que en el uso agrícola es común operar con una sola etapa, lo que disminuye el consumo energético y la cantidad de equipos requeridos. Asimismo, aspectos como los costos de monitoreo, la disposición del concentrado y las normativas aplicables dependen tanto del uso del agua como de la localización del proyecto.

Según Voutchkov (2018) [11], el costo unitario de producción de agua desalinizada varía entre 0,9 y 3,0 USD/m³ para agua potable, entre 0,5 y 2,0 USD/m³ para uso industrial y entre 0,3 y 1,5 USD/m³ para uso agrícola. Estas variaciones deben considerarse en cualquier evaluación técnico-económica que busque determinar la

viabilidad de un proyecto de desalación.

En el presente estudio, se obtuvieron valores específicos para una planta de 1.000 l/s destinada a la producción de agua potable, con un CAPEX estimado de 184 MMUSD, un OPEX anual de 11,7 MMUSD y un costo unitario de 1,2 USD/m³. A partir de estos resultados, se extrapolaron escenarios comparativos para los usos industrial y agrícola, utilizando los rangos de costos señalados en la literatura.

Tabla 32 Valores CAPEX, OPEX y costo unitario para diferentes tipos de agua generada por planta desaladora.

Fuente Elaboración propia.

Tipo de Uso	Costo Unitario (USD/m ³)	CAPEX Estimado (MMUSD)	OPEX Anual Estimado (MMUSD)
Agua Potable	1,2	184	11,7
Agua Industrial	0,84 (↓30%)	128,8 (↓30%)	8,19 (↓30%)
Agua Agrícola	0,55 (↓54%)	84,6 (↓54%)	5,38 (↓54%)

En la tabla 32, de muestra que para el uso industrial se aplicó una reducción del 30% en los valores de CAPEX y OPEX, justificada por menores exigencias sanitarias y una posible simplificación del tratamiento. En el caso agrícola, se estimó una disminución del 54%, dado que este tipo de aplicación permite prescindir de procesos como la remineralización y desinfección, operando generalmente con configuraciones de una sola pasada, lo que reduce significativamente los costos energéticos y de insumos químicos.

Esta metodología de extrapolación permite evaluar alternativas de uso bajo un mismo marco técnico y de diseño, adaptando únicamente los requerimientos de calidad del agua según su destino. La coherencia de esta aproximación se encuentra respaldada por los costos y parámetros técnicos reportados por Voutchkov (2018) [11], así como por las prácticas internacionales aplicadas al diseño de plantas desaladoras en distintos contextos de uso.

Con estos valores se puede proyectar el costo de implementar plantas desaladoras a nivel nacional segregado por regiones.

Tabla 33 Costo de implementación de plantas desaladoras a nivel nacional.

Fuente elaboración propia.

Región	Costo implementar plantas desaladoras agua a nivel nacional MMUSD		
	2015	2030	2040
XV Arica y Parinacota	\$ 278	\$ 348	\$ 387
I Tarapacá	\$ 403	\$ 445	\$ 486
II Antofagasta	\$ 1.090	\$ 982	\$ 958
III Atacama	\$ 643	\$ 818	\$ 820
IV Coquimbo	\$ 1.697	\$ 2.467	\$ 2.670
V Valparaíso	\$ 2.724	\$ 2.977	\$ 3.111
XIII Metropolitana	\$ 7.577	\$ 8.269	\$ 8.873
VI O'Higgins	\$ 5.380	\$ 5.786	\$ 6.123
VII Maule	\$ 8.056	\$ 7.295	\$ 7.187
VII Biobío	\$ 3.367	\$ 3.616	\$ 4.091
IX Araucanía	\$ 831	\$ 930	\$ 1.009
XIV Los Ríos	\$ 460	\$ 813	\$ 1.026
X Los Lagos	\$ 796	\$ 1.022	\$ 1.137
XI Aysén	\$ 57	\$ 55	\$ 62
XII Magallanes	\$ 74	\$ 81	\$ 85
TOTAL	33.433	35.904	38.024

La tabla 33 presenta el costo proyectado de implementar plantas desaladoras en Chile por región para los años 2015, 2030 y 2040, expresado en millones de dólares (MMUSD). Se observa un aumento progresivo del costo total nacional, pasando de 33.433 MMUSD en 2015 a 38.024 MMUSD en 2040. Las regiones Metropolitana, Maule y O'Higgins concentran las mayores inversiones, superando los 5.000 MMUSD en cada periodo analizado.

Para poder analizar en mayor detalle, se presenta el desglose del costo estimado para implementar plantas desaladoras en Chile, distribuidas por región y sector de consumo (agua potable, uso minero-industrial y uso agrícola) para los años 2015, 2030 y 2040. Los valores están expresados en millones de dólares estadounidenses (MMUSD), lo que permite visualizar la evolución de la inversión requerida en función del destino del recurso y su localización geográfica.

Tabla 34 Costo de implementación de plantas desaladoras segregado por región y por grupo de interés a nivel nacional.

Fuente elaboración propia.

Región	Costo implementar plantas desaladoras agua potable grupo rural y urbano MMUSD			Costo implementar plantas desaladoras grupo minero y industrial MMUSD			Costo implementar plantas desaladoras grupo agrícola MMUSD		
	2015	2030	2040	2015	2030	2040	2015	2030	2040
XV Arica y Parinacota	\$ 79	\$ 162	\$ 213	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ 196	\$ 183	\$ 169
I Tarapacá	\$ 129	\$ 174	\$ 204	\$ 228	\$ 225	\$ 237	\$ 46	\$ 47	\$ 45
II Antofagasta	\$ 229	\$ 263	\$ 290	\$ 738	\$ 606	\$ 554	\$ 124	\$ 114	\$ 114
III Atacama	\$ 103	\$ 112	\$ 118	\$ 163	\$ 199	\$ 137	\$ 376	\$ 508	\$ 564
IV Coquimbo	\$ 267	\$ 320	\$ 348	\$ 191	\$ 215	\$ 200	\$ 1.240	\$ 1.932	\$ 2.122
V Valparaíso	\$ 658	\$ 726	\$ 760	\$ 262	\$ 276	\$ 259	\$ 1.804	\$ 1.976	\$ 2.091
XIII Metropolitana	\$ 3.918	\$ 4.588	\$ 5.002	\$ 253	\$ 417	\$ 510	\$ 3.406	\$ 3.264	\$ 3.361
VI O'Higgins	\$ 418	\$ 479	\$ 499	\$ 339	\$ 375	\$ 380	\$ 4.623	\$ 4.933	\$ 5.244
VII Maule	\$ 348	\$ 371	\$ 392	\$ 136	\$ 207	\$ 256	\$ 7.572	\$ 6.716	\$ 6.540
VII Biobío	\$ 659	\$ 726	\$ 750	\$ 1.432	\$ 1.729	\$ 2.224	\$ 1.277	\$ 1.161	\$ 1.117
IX Araucanía	\$ 263	\$ 288	\$ 304	\$ 105	\$ 192	\$ 247	\$ 463	\$ 449	\$ 459
XIV Los Ríos	\$ 137	\$ 197	\$ 203	\$ 308	\$ 597	\$ 801	\$ 15	\$ 19	\$ 22
X Los Lagos	\$ 225	\$ 253	\$ 264	\$ 563	\$ 760	\$ 863	\$ 7	\$ 9	\$ 10
XI Aysén	\$ 39	\$ 43	\$ 46	\$ 16	\$ 11	\$ 15	\$ 2	\$ 1	\$ 1
XII Magallanes	\$ 64	\$ 68	\$ 69	\$ 5	\$ 6	\$ 8	\$ 6	\$ 7	\$ 8
TOTAL	\$ 7.535	\$ 8.769	\$ 9.461	\$ 4.742	\$ 5.818	\$ 6.696	\$ 21.156	\$ 21.318	\$ 21.867

De la tabla 34, se observa que el mayor componente del costo corresponde al sector agrícola, con más de 21.000 MMUSD en cada uno de los tres periodos analizados. Las regiones con mayores requerimientos económicos son Maule, O'Higgins y Metropolitana, reflejando una alta demanda proyectada de agua. Además, se observa una relativa estabilidad del costo total entre 2015 y 2040, con ligeras alzas en los sectores agrícola y agua potable, y una leve disminución en el sector minero-industrial. Esto sugiere un ajuste progresivo en la planificación de infraestructura, posiblemente asociado a eficiencia tecnológica, cambios en la demanda hídrica o políticas públicas orientadas al uso sostenible del recurso.

6.12 Evaluación económico social

La evaluación económica social permite analizar la conveniencia de un proyecto desde el punto de vista del bienestar colectivo, incorporando impactos económicos, sociales y ambientales más allá de la rentabilidad financiera. A través del uso de precios sociales o sombras, se valoran adecuadamente los recursos utilizados y se internalizan las externalidades asociadas.

En proyectos como una planta desaladora, este enfoque es clave para considerar beneficios como el acceso al agua potable, la mejora en la calidad de vida, y la mitigación de la escasez hídrica. La evaluación se basa en un flujo de caja social y el cálculo del Valor Actual Neto Social (VANS), utilizando la tasa de descuento recomendada o tasa de descuento Social (TDS) por el Ministerio de Desarrollo Social, para determinar si el proyecto genera beneficios netos para la sociedad.

En esta línea, el estado puede ser parte del proyecto con financiamiento bajo los siguientes puntos:

1. Equidad territorial: Se busca dotar de servicios a comunidades donde no hay incentivos privados suficientes.
2. Corrección de fallas de mercado: La inversión privada no refleja completamente los beneficios sociales, por lo que se requiere intervención pública.
3. Sustentabilidad y resiliencia: El Estado persigue objetivos de largo plazo que no necesariamente coinciden con los plazos de retorno privados.

a) La Tasa Social de Descuento (TSD) [19]

La TDS representa el costo de oportunidad social del capital y se estima como un promedio ponderado entre las tasas de interés del ahorro interno, la rentabilidad de la inversión privada y el costo marginal del ahorro externo.

El Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF) actualizó la TSD real en 2024, reduciéndose del 6% al 5,5% anual [20]. Esta modificación busca reflejar las nuevas condiciones económicas y sociales del país, promoviendo una inversión pública más eficiente y sostenible.

Este ajuste en la TSD facilita la evaluación de proyectos de inversión pública, permitiendo que más iniciativas sean susceptibles de financiamiento al reflejar de manera más precisa los beneficios y costos sociales en el tiempo.

Para un proyecto con participación privada y estado con beneficio social, se presentan los siguientes mecanismos de financiamiento los cuales se describen en la tabla 30.

Estos valores nos permiten considerar valores de venta de agua tratada 1.2 USD/M³.

Tabla 35 Mecanismos de financiamientos para un proyecto por aporte social.

Fuente Precios sociales, Sistema Nacional de Inversiones, Ministerio de Desarrollo Social y Familia [19].

Mecanismo de financiamiento	Descripción
Aporte privado	Inversión directa del privado (CAPEX y parte del OPEX), bajo régimen de concesión o empresa público-privada (PPP).
Aporte estatal directo	Subsidios al CAPEX, garantías, o cofinanciamiento de la inversión. Puede incluir acceso a líneas de financiamiento con tasas preferenciales.
Pago por disponibilidad o subsidio operativo	El Estado puede pagar al privado por asegurar la producción mínima de agua, especialmente en zonas donde no hay rentabilidad financiera.
Externalidades positivas	El proyecto genera beneficios que no se traducen directamente en ingresos del privado, pero sí en valor social (salud, empleo, seguridad hídrica), lo que justifica su evaluación con precios sombra y una tasa social.

Cuando un privado desea invertir en un proyecto con carácter social, como una planta desaladora para asegurar el suministro de agua en zonas con estrés hídrico, la evaluación social adquiere relevancia, especialmente si se busca algún grado de participación o cofinanciamiento por parte del Estado. En este contexto, se puede justificar el uso de una tasa de descuento social más baja que la de mercado, como la tasa de descuento del 5,5% real anual definida por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF).

El uso de la Tasa Social de Descuento por parte de un inversor privado no reduce directamente su costo de financiamiento, pero le permite alinear su proyecto con las prioridades del Estado, acceder a incentivos y fondos públicos, y facilitar su evaluación, aprobación y aceptación. Es una estrategia recomendada especialmente para proyectos que generan externalidades positivas para la sociedad, como los de agua potable, energía limpia, salud, transporte o educación.

b) Análisis económico social

Para el análisis económico se consideraron las variables de CAPEX y OPEX fijos, de acuerdo con los valores establecidos en el punto 6.15 de esta tesis. Se utilizó una Tasa Social de Descuento (TSD) del 5,5 %, conforme a lo propuesto en el documento [19] “Precios Sociales” del Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

Con estos antecedentes, se desarrolló un flujo de caja proyectado a 30 años, que incorpora los siguientes supuestos clave:

- Valor de venta del agua: 1,2 USD/m³
- Costo de la energía eléctrica: 85 USD/MWh
- Depreciación acelerada: a 10 años

Con estos antecedentes se genera el flujo de caja, el cual nos da los siguientes parámetros financieros.

Tabla 36 Indicadores financieros flujo de caja social.

Fuente elaboración propia.

Tasa de descuento	5,5%
TIR	6,9%
VAN MMUSD\$	\$23,8
PAYBACK años	11

Se concluye que un proyecto de implementación de planta desadora bajo este modo de proyecto, se hace rentable y atractivo para los inversionista dado que el estado se hace parte del proceso y presenta como parrner una seguridad que los inversionistas valoran. Necesito mejorar redacción y conclusiones de este análisis.

7. CONCLUSIONES

Conclusión General

El estudio de viabilidad realizado demuestra de forma concluyente que la implementación de plantas desaladoras en Chile constituye una solución técnica, económica y ambientalmente factible, capaz de responder eficazmente a la creciente escasez hídrica estructural que enfrenta el país. Mediante un enfoque integral que combina el análisis de tecnologías maduras como la ósmosis inversa (OI), la modelación de escenarios de consumo hídrico, la evaluación de marcos normativos y el dimensionamiento de requerimientos energéticos, se valida que la desalinización no solo es viable, sino que resulta imprescindible para garantizar la seguridad hídrica de sectores estratégicos como el consumo humano, la minería y la industria. Pese a los desafíos asociados al consumo energético y la gestión de salmuera, estos pueden ser mitigados mediante integración con fuentes de energía renovable y un diseño ambientalmente responsable. El análisis desarrollado concluye que la desalinización representa una herramienta estratégica para la resiliencia hídrica de largo plazo del país, con un potencial relevante para contribuir a un modelo de desarrollo sostenible en el contexto del cambio climático.

Conclusiones Específicas

- a) Analizar los consumos actuales y proyectar las necesidades futuras de agua potable en Chile, considerando el consumo humano e industrial, con el fin de identificar las tendencias y desafíos que deben abordarse para implementar plantas desaladoras.

El análisis del consumo hídrico nacional evidencia una creciente presión sobre las fuentes convencionales de agua, especialmente en las regiones centro-norte del país, donde convergen una alta densidad poblacional, desarrollo minero-industrial intensivo y una baja disponibilidad hídrica natural. Esta situación crítica, agravada por la prolongada sequía y el cambio climático, plantea una amenaza estructural a la seguridad hídrica del país. Las proyecciones indican que la brecha entre oferta y demanda de agua tenderá a ampliarse hacia 2030 y 2040, comprometiendo el abastecimiento tanto humano como productivo.

En este contexto, la desalinización emerge no solo como una fuente alternativa indispensable, sino como un componente coherente dentro de la estrategia nacional de transición energética. Dado que la desalinización mediante ósmosis inversa requiere un elevado consumo energético, su implementación sostenible debe ir de la mano con el desarrollo de capacidades de generación eléctrica renovable, especialmente en regiones con alto potencial solar y eólico.

La incorporación de la desalinización en una estrategia nacional permitiría transformar una vulnerabilidad (la escasez de agua) en una oportunidad para el desarrollo sostenible, fomentando la innovación tecnológica, la inversión público-privada y la resiliencia de los territorios más expuestos a la crisis hídrica.

- b) Evaluar las principales tecnologías de desalinización disponibles, analizando su eficiencia, costos operativos, impacto ambiental y sostenibilidad, con el objetivo de identificar las más adecuadas para el contexto país. Revisar la normativa vigente que rige los proyectos de plantas desaladoras.

La evaluación de las tecnologías de desalinización ha determinado que la Osmosis Inversa (OI) es la tecnología más adecuada y competitiva para el contexto chileno, dadas sus ventajas en eficiencia energética (cuando se utilizan recuperadores de energía), modularidad y menores costos operativos en comparación con otras alternativas como la destilación. Se ha concluido que, si bien la OI presenta un impacto ambiental asociado a la descarga de salmuera y un bajo consumo energético, la implementación de tecnologías de recuperación de energía y la aplicación de descargas difusas o la co-descarga pueden mitigar significativamente estos efectos. La revisión de la normativa vigente ha permitido identificar el marco legal existente para la aprobación y operación de estas plantas, aunque se destaca la necesidad de fortalecer y especificar regulaciones en torno a la gestión de la salmuera y la integración con fuentes de energía renovables para maximizar la sostenibilidad de los proyectos.

- c) Dimensionar las necesidades energéticas asociadas a la desalinización, explorando el potencial de integración con fuentes de energía renovables y evaluar la viabilidad de los espacios geográficos adecuados para la instalación de estas plantas.

El dimensionamiento de las necesidades energéticas revela que las plantas desaladoras, en particular las de OI, son altamente demandantes de energía, lo que constituye un desafío significativo en términos de costos operativos y huella de carbono. Sin embargo, el estudio demuestra un alto potencial de integración con fuentes de energía renovables (solar fotovoltaica y eólica) en Chile, especialmente en las regiones del norte, que poseen un recurso solar y eólico excepcional. Esta integración no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles y mitiga las emisiones de GEI. Se ha identificado que la viabilidad de los espacios geográficos adecuados está fuertemente correlacionada con la proximidad a la costa, la disponibilidad de terrenos, la cercanía a la demanda y la infraestructura eléctrica existente, con un énfasis en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo

como áreas prioritarias para la instalación de nuevas plantas.

Por otro lado, el requerimiento energético total asociado a la operación de plantas desaladoras es técnicamente abordable en el contexto chileno, considerando la actual matriz energética nacional, caracterizada por una participación creciente de fuentes renovables no convencionales (ERNC), así como los proyectos en desarrollo en generación solar, eólica y sistemas de almacenamiento. Esta capacidad instalada y proyectada, junto con las expansiones del sistema de transmisión en curso, especialmente en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), permite anticipar una integración viable y eficiente de la demanda energética de nuevas plantas desaladoras, sin comprometer la estabilidad del sistema ni aumentar significativamente la huella de carbono.

- d) Evaluar la viabilidad económica, considerando los costos de inversión, operativos y de mantenimiento, además de los beneficios a largo plazo, y su impacto en el desarrollo sostenible del país.

La evaluación económica realizada, que considera tanto los costos de inversión (CAPEX) como los costos operacionales y de mantenimiento (OPEX), junto con el análisis de flujo de caja e indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), confirma que los proyectos de desalinización en Chile son financieramente viables bajo esquemas contractuales de largo plazo. Esta viabilidad es especialmente sólida en contextos de demanda estable, como los sectores industrial y sanitario, donde el costo unitario del agua producida puede fluctuar entre 0,6 y 1,5 USD/m³, compitiendo favorablemente con otras fuentes no convencionales. La incorporación de modelos de financiamiento mixto (Estado-Privado), mejora significativamente el perfil de rentabilidad de los proyectos, haciéndolos más atractivos para la inversión privada y permitiendo una distribución más eficiente del riesgo.

A nivel macroeconómico y territorial, la desalinización representa una herramienta estratégica para fortalecer la seguridad hídrica nacional, reducir la dependencia de acuíferos sobreexplotados y mitigar los riesgos asociados a eventos extremos como sequías prolongadas. Su implementación contribuye al desarrollo sostenible al generar empleos, fomentar la inversión en regiones con menor dinamismo económico y disminuir los conflictos por el uso del recurso hídrico. En un escenario de escasez hídrica, estas plantas permiten diversificar las fuentes de abastecimiento y avanzar hacia una gestión más resiliente e integrada del recurso agua en Chile.

8. REFERENCIAS

[1] UNESCO - Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023.

[386807spa.pdf](#)

[2] Informe sobre la desalinización de agua de mar como una opción estratégica para el futuro de Chile – SONAMI.

<https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2023/10/carlos-foxley-curso-periodistas-2023.pdf>

[3] Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile.

<https://dga.mop.gob.cl/Estudios/04%20Resumen%20Ejecutivo/Resumen%20Ejecutivo.pdf>

[4] Marco normativo que aplica para la implementación y operación de plantas desaladoras en Chile.

<https://www.bcn.cl/leychile/>

[5] informe “Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile”, del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile

<https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/b38407dc-f89b-45fb-a37b-ea0d02773e05>

[6] Asesoría Técnica Parlamentario: Plantas Desaladoras en Chile.

https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33266/2/Minuta_Desaladoras_en_Chile.pdf

[7] Planta desaladora de atacama.

[Atacama-Case-Study-Spanish.pdf](#)

<https://www.acades.cl/wp-content/uploads/2022/06/Fernando-Velasquez.pdf>

sepchile.cl/2022/05/30/la-primera-planta-desaladora-estatal-de-chile-es-reconocida-y-premiada-a-nivel-mundial/

[8] Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Comité científico cambio climático, MINCIENCIA.

https://estudiosurbanos.uc.cl/wp-content/uploads/2022/12/2022_Com-Cambio-Climatico_Informe-Desalinizacion_vfinal_compressed.pdf

[9] Proyecto de ley sobre el uso de agua de mar para desalinización. Boletín N°11.608-09

https://tramitacion.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin_ini=11608-09

<https://www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmID=12126&prmBoletin=11608-09>

[10] Norma NCh409/1.Of2005. Requisitos de Calidad para Agua Potable

<https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh409.pdf>

[11] Estudio para la gestión de proyectos de plantas desaladoras. “*Desalination Project Cost Estimating and Management*. CRC Press, Taylor & Francis Group”.

<https://rexresearch1.com/DesalinationLibrary/Desalinationprojectcostestimatingmanagement.pdf>

[12] Guía para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima - DIRECTEMAR

[HTTPS://WWW.DIRECTEMAR.CL/DIRECTEMAR/SITE/DOCS/20211115/20211115120951/GUIA_DESALADORAS_2021_VF_2.PDF](https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20211115/20211115120951/GUIA_DESALADORAS_2021_VF_2.PDF)

[13] Desalación de agua de mar: situación en Chile y en el mundo Adalyr

[HTTPS://ALADYR.NET/H2O-PRESENTACIONES/](https://aladyr.net/h2o-presentaciones/)

[14] Informe monitoreo de la competencia en el mercado eléctrico 2024

[HTTPS://WWW.COORDINADOR.CL/WP-CONTENT/UPLOADS/2025/04/INFORME-MONITOREO-2024.PDF](https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2025/04/Informe-Monitoreo-2024.pdf)

[15] Sitio web de concesiones marítimas – sistema integrado de administración del borde costero SIABC

[HTTPS://WWW.CONCESIONESMARITIMAS.CL](https://www.concesionesmaritimas.cl)

[16] Valores de venta agua normal y tratada por plantas desaladoras

[HTTPS://WWW.ACADES.CL/TRANSPORTAR-AGUA-SALINA-A-LOCALIDADES-ALEJADAS-UN-DESAFIO-PARA-EL-FINANCIAMIENTO-DE-LA-SEGURIDAD-HIDRICA-DE-CHILE/?UTM_SOURCE=CHATGPT.COM](https://www.acades.cl/transportar-agua-salina-a-localidades-alejadas-un-desafio-para-el-financiamiento-de-la-seguridad-hidrica-de-chile/?utm_source=chatgpt.com)

[HTTPS://WWW.SASIPA.CL/TARIFAS-AGUA-POTABLE/?UTM_SOURCE=CHATGPT.COM](https://www.sasipa.cl/tarifas-agua-potable/?utm_source=chatgpt.com)

[17] Tabla de depreciación SII

[HTTPS://WWW.SII.CL/PAGINA/VALORES/BIENES/TABLA_VIDA_ENERO.HTM](https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm)

[18] Valores de uf y dólar del banco central de Chile.

[HTTPS://SI3.BCENTRAL.CL/INDICADORESSIETE/SECURE/INDICADORESDIARIOS.ASPX](https://si3.bcentral.cl/indicadoressi7e/secure/indicadoresdiorios.aspx)

[19] Precios sociales, Sistema Nacional de Inversiones, Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

[HTTPS://SNI.GOB.CL/STORAGE/DOCS/INFORME_PRECIOS_SOCIALES_2024_SNI-CHILE.PDF](https://sni.gob.cl/storage/docs/informe_precios_sociales_2024_sni-chile.pdf)

[20] Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA

[HTTPS://WWW.SEA.GOB.CL/SITES/DEFAULT/FILES/ADJUNTOS/NOTICIAS/GU%C3%ADA%20PARA%20LA%20DESCRIPCION%20DE%20PROYECTOS%20DE%20PLANTAS%20DESALINIZADORAS%20EN%20EL%20SEIA.PDF](https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/gu%C3%ADA%20PARA%20LA%20DESCRIPCION%20DE%20PROYECTOS%20DE%20PLANTAS%20DESALINIZADORAS%20EN%20EL%20SEIA.PDF)

[21] Producción de energía en el SEN. Fuente: CEN – Reportes y estadísticas 2022.

[HTTPS://WWW.COORDINADOR.CL/WP-CONTENT/UPLOADS/2022/12/CEN-REPORTE-ENERGETICO-SEN-DIC22.PDF](https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/12/CEN-REPORTE-ENERGETICO-SEN-DIC22.PDF)

9. ANEXOS

Carta Gantt de la tesis.

Cronograma de actividades para el desarrollo de la tesina. Fuente: elaboración propia

IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS DESALADORAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CHILE: UN ENFOQUE INTEGRAL EN TECNOLOGÍAS, ECONÓMICO Y RECURSOS HÍDRICOS							
N°	Actividades principales	mar-25	abr-25	may-25	jun-25	jul-25	ago-25
1	1RA ETAPA						
1.1	Selección tema Tesina						
1.2	Definir objetivos						
1.3	Revisar esto del arte						
1.4	<i>HITO 1 - Entrega 1er pre- informe Tesina</i>						
1.5	Realizar correcciones a pre-informe Tesina						
1.6	<i>HITO2 - Entrega informe final 3er semestre</i>						
2	2DA ETAPA						
2.1	Avaluar consumos agua y tipos de tecnologías						
2.2	Efectos ambientales - marco normativo						
2.3	Evaluación costos - requerimientos energeticos						
2.4	Identificar áreas para implementar solución						
2.5	Recomendaciones						
2.6	<i>HITO 3 - Entrega borrador Tesina para revisión</i>						
3	3RA ETAPA						
3.1	Realizar correcciones a tesina						
3.2	Generar presentación						
3.3	<i>HITO 4 - entrega tesina y presentación</i>						
4	4TA ETAPA						
4.1	Defensa de tesis						

Tabla 1. Cronograma de actividades para el desarrollo de la tesina. Fuente: elaboración propia