

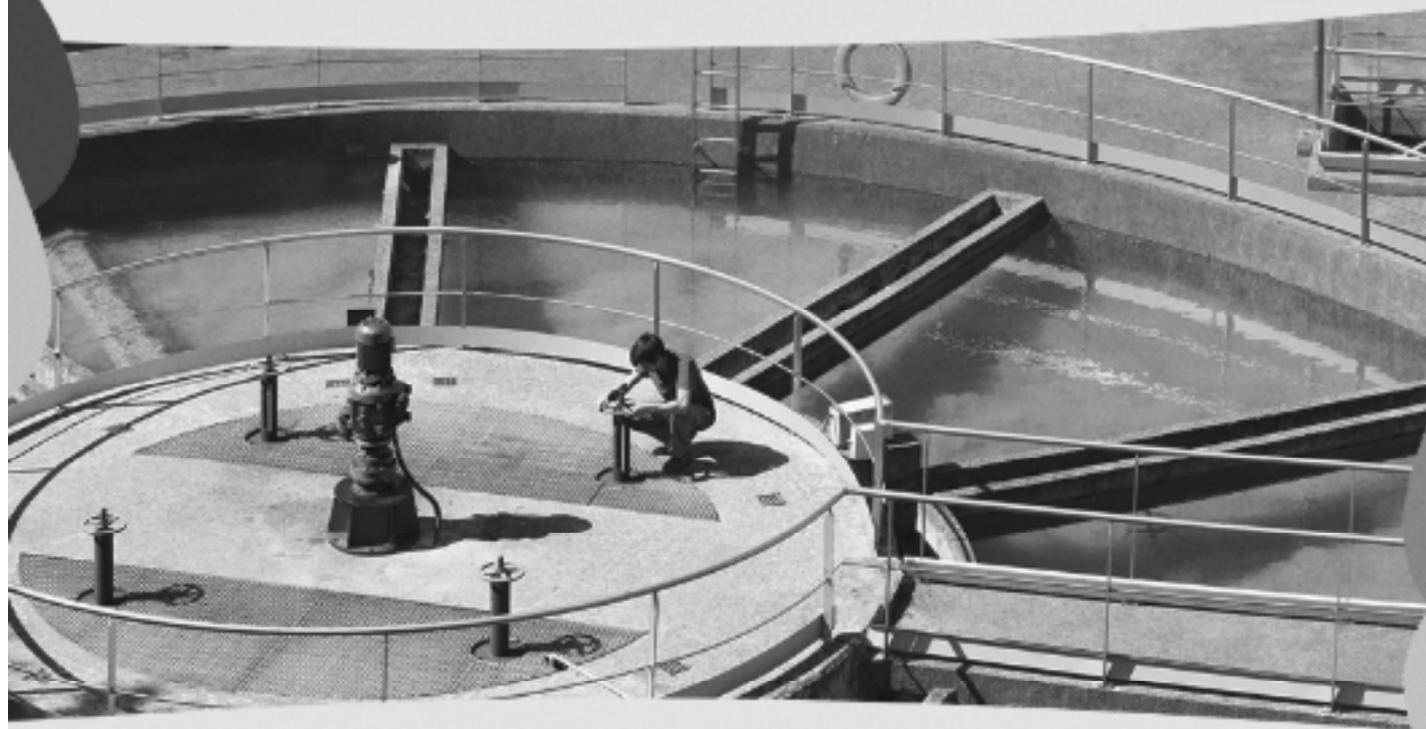


Agencia de  
Sustentabilidad y  
Cambio Climático



**ACADES**

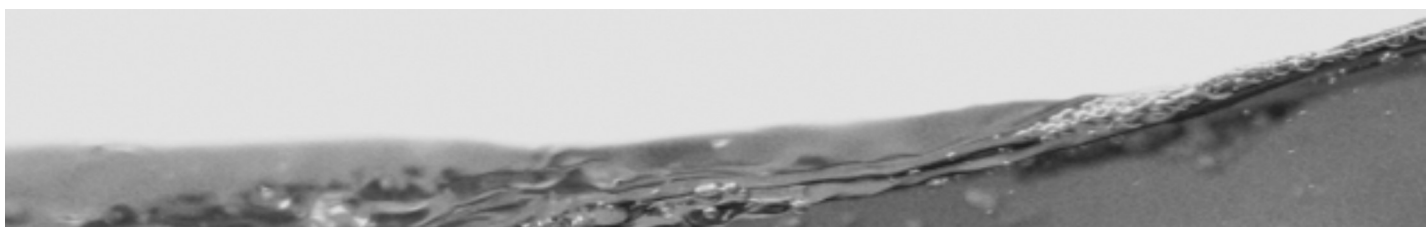
Asociación Chilena de  
Desalación y Reúso A.G.



# DIAGNÓSTICO SECTORIAL

## APL Sector Desalación y Reúso de agua

Noviembre 2023



## Índice

<b>Glosario de términos .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Potenciales suscriptores y grupos de interés .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Fundamento del Acuerdo.....</b>	<b>6</b>
3.1 Motivaciones de los involucrados para el desarrollo de un APL.....	6
3.2 Oportunidades y amenazas del entorno .....	6
<b>4. Objetivos del Diagnóstico General .....</b>	<b>7</b>
<b>5. Empresas que participan del diagnóstico .....</b>	<b>7</b>
<b>6. Caracterización del sector .....</b>	<b>8</b>
6.1. Caracterización general del sector.....	8
6.2. Caracterización del proceso productivo de la desalación.....	14
6.2.1. Captación de agua de mar .....	14
6.2.2. Fase de pretratamiento .....	15
6.2.3. Proceso de RO .....	16
6.2.4. Postratamiento .....	18
6.2.5. Rechazo de los vertidos.....	18
6.2.6. Sistema de distribución de agua producto.....	19
6.3. Marco Regulatorio .....	19
6.3.1. Normativa aplicable.....	19
6.3.2. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental .....	20
6.3.3. Programas de vigilancia ambiental .....	21
6.4. Aspectos ambientales de la desalación .....	21
6.4.1. Captación de agua de mar.....	21
6.4.2. Descargas de vertidos de rechazo.....	22
6.4.3. Efectos en el litoral.....	23
6.4.4. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo .....	24
6.5. Aspectos energéticos del sector de la desalación .....	25
6.5.1. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo .....	25
6.6. Desempeño social del sector de la desalación .....	26
6.6.1. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo .....	30
6.7. Sector reúso .....	32
6.7.1. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo .....	32
<b>7. Referencias .....</b>	<b>34</b>

## Glosario de términos

**Tratamiento primario:** tratamiento de las aguas servidas con el objetivo de remover los productos orgánicos e inorgánicos en suspensión, a través de llevar a cabo diferentes procesos fisicoquímicos (BCN).

**Tratamiento secundario:** tratamiento de las aguas servidas con el objetivo de eliminar la materia orgánica, principalmente disuelta, a través de procesos biológicos (BCN).

**Aguas residuales:** aquellas que se descargan después de haber sido utilizadas en un proceso o producidas por éste, y que no tienen ningún valor inmediato para dicho proceso (Ley 21.075).

**Aguas grises:** aguas servidas domésticas residuales provenientes de las tinas de baño, duchas, lavaderos, lavatorios y otros, excluyendo las aguas negras (Ley 21.075).

**Aguas negras:** aguas residuales que contienen excretas (Ley 21.075).

**Reúso de agua grises:** uso de aguas grises tratadas en diferentes posibles destinos: urbano (riego de jardines o descarga de aparatos sanitarios), recreativos (áreas verdes públicas, campos deportivos, etc.), ornamentales (áreas verdes), industriales (procesos no destinados a productos alimenticios y fines de refrigeración no evaporativos), y ambientales (especies reforestadas, mantención de humedales, entre otros) (Ley 21.075).

**Cambio climático:** Cambio de clima, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables, según definición de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC).

**Eficiencia energética:** Relación entre la generación de energía de un proceso de conversión o de un sistema y su consumo.

**Medidas de mitigación:** Aquellas que tienen por finalidad evitar o disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, ya sea mediante reducciones directas y/o compensación de emisiones.

**Seguridad hídrica:** posibilidad de acceso al agua en cantidad y calidad adecuadas, considerando las particularidades naturales de cada cuenca, para su sustento y aprovechamiento en el tiempo para consumo humano, la salud, subsistencia, desarrollo socioeconómico, conservación y preservación de los ecosistemas, promoviendo la resiliencia frente a amenazas asociadas a sequías y crecidas y la prevención de la contaminación “energética (Ley Marco de CC).

**Desalinización:** proceso por el cual el agua de mar (o agua salobre) disminuye su concentración de sales o se separa de éstas, hasta convertirse en agua dulce, apta para el consumo de agua potable y otros usos domésticos (Reporte Comité CC).

## 1. Introducción

Hoy existe un amplio consenso científico en que el fenómeno del cambio climático es un hecho inequívoco, causado por la actividad humana. Según lo indicado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en su último reporte<sup>1</sup>, muchos de los cambios observados en el clima desde la década de 1950 no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera han aumentado. Los efectos adversos del cambio climático son considerados como amenazas, cuyos impactos pueden poner en riesgo el desarrollo de los países y la integridad ecosistémica a nivel mundial. En este contexto, la adaptación ha cobrado gran relevancia en las negociaciones internacionales de cambio climático, en la creación de fondos para apoyarla en los países en desarrollo, en la generación de conocimiento y en el desarrollo de estrategias y planes en varios países.

Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático, tal como lo indican los estudios realizados a nivel internacional y nacional, y sus efectos ya se están haciendo notar en el territorio nacional. Según el último Reporte del Estado del Medio Ambiente (REMA)<sup>2</sup>, las temperaturas máximas han tendido al alza durante los últimos 60 años, con aumentos en promedio de 1,1°C en la zona central del país, 0,8°C en la zona sur, y 1°C en la zona austral. Así mismo, el reporte demuestra que las precipitaciones en el territorio nacional han tendido a la baja en el mismo período, con una tendencia acentuada en la zona sur.

Así es como las fuentes de agua superficiales del país se encuentran en estrés hídrico. EL REMA destaca que la totalidad de los ríos que se monitorean tienen caudales inferiores a su promedio histórico, algunos hasta 93% más bajo, y que casi el 80% de los embalses tenían en 2021 un déficit respecto de su volumen promedio histórico (2015-2020).

La escasez hídrica, inseguridad o brecha hídrica, ocurre cuando la capacidad de proveer agua no es suficiente para satisfacer las necesidades de agua para algún uso (de subsistencia, ambiental o productivo)<sup>3</sup>. En Chile, la escasez hídrica se concentra entre las regiones centro norte y centro sur, donde se combina una disminución en la disponibilidad de agua y un aumento en las necesidades de agua desde distintos sectores, en particular, el sector agrícola. Ante esto, la desalación, que ya opera en Chile de manera continua desde fines de los años 90, se presenta como una alternativa de adaptación, para hacer frente a la crisis hídrica, además de otras posibilidades como el reúso de aguas grises o servidas. A la fecha, existen al menos 23 plantas desalinizadoras en operación y 6 en construcción, lo que entregaría en el corto plazo 8.200 l/s de agua tratada. Se espera un aumento de la capacidad de desalación, que podría llegar a 25.000 l/s considerando 12 proyectos que se encuentran actualmente en evaluación por el SEA.

---

<sup>1</sup> IPCC (2023) Synthesis Report of the Sixth Assessment Report (AR6)

<sup>2</sup> MMA (2022) Reporte del Estado del Medio Ambiente 2022

<sup>3</sup> Vicuña, Sebastián, Linda Daniele, Laura Farías, Humberto González, Pablo A. Marquet, Rodrigo Palma-Behnke, Alejandra Stehr, et al. 2022. "Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile". Chile: Comité Asesor Ministerial Científico sobre Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.



Este crecimiento exponencial pone de manifiesto ciertos desafíos relacionados con sustentabilidad del sector, por ejemplo, en lo que respecta a la disponibilidad de energías limpias para abastecerlo y con el control de los impactos ambientales potenciales en el borde costero.

El presente documento contiene el Diagnóstico Sectorial elaborado como base para establecer una propuesta de Acuerdo de Producción Limpia (APL) para el sector de desalación y reúso de agua, con el objetivo de propiciar acciones que permitan posicionar estas fuentes alternativas de agua como alternativas sustentables para enfrentar la crisis hídrica.

## 2. Potenciales suscriptores y grupos de interés

El presente APL se propone para el sector de desalación de agua de mar y el de reúso de aguas residuales. En el caso de la desalinización, se trata de una tecnología de tratamiento de agua que consiste en retirar las sales disueltas y minerales de un agua de mar o salobre captada, para transformarla en agua dulce de calidad. Este proceso garantiza que el agua cumpla con los estándares de calidad requeridos para el abastecimiento de consumo humano, actividades agrícolas, actividades industriales, entre otros usos.

En el caso del reúso de aguas residuales, se trata de un proceso que consiste en la captación de las aguas servidas, principalmente por las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), para llevar a cabo procesos físicos, químicos y/o biológicos para remover los contaminantes presentes en el agua, con fines a alcanzar la calidad necesaria para su uso en actividades industriales, agrícolas, usos recreativos, entre otros. Las aguas residuales pueden ser de rigen doméstico, institucional, comercial o industrial.

Además de las empresas sanitarias y de tratamiento de agua, en ambos casos, la cadena de valor la completan proveedores de equipos, maquinarias y tecnologías, proveedores de insumos y de servicios, incluyendo consultoría y de transporte de agua, y las empresas cliente de los sectores minería, industria y agricultura. Por tanto, **los potenciales suscriptores de este acuerdo desde el sector privado** lo componen las empresas: 1) desarrolladores y proveedores de tecnología, 2) desarrolladores de proyectos, 3) operadores de plantas de desalinización y reúso de aguas residuales. El sector lo conforman +100 empresas pequeñas que son desarrolladores y proveedores de tecnología y +30 empresas medianas que son desarrolladores de proyectos de desalinización y reúso de aguas residuales. Las empresas operadoras de las plantas son empresas de gran tamaño, en muchos casos empresas mineras.

Por su parte, los Órganos de la Administración del Estado que tienen competencias en la materia y que podrían ser los **suscriptores del acuerdo desde el sector público** son el Ministerio de Minería / Ministerio de Medio Ambiente/ Dirección General de Agua / Comisión Nacional de Riego / Agencia de Sostenibilidad Energética.

Por último, se identifica como **potencial tercero asociado** que podría apoyar al cumplimiento de los objetivos del APL al INACAP, ANESCO y CETAQUA, todos ellos participantes de la etapa del diagnóstico.

### 3. Fundamento del Acuerdo

La disponibilidad de agua dulce se ha visto fuertemente reducida debido a la creciente demanda de recursos hídricos para distintos usos (ej. consumo humano, turismo, agricultura, actividades industriales, entre otros), así como por los efectos del cambio climático y la deficiente gestión de estos. Dado este contexto, urge la necesidad de buscar nuevas fuentes de agua para satisfacer la creciente demanda de agua dulce y solventar los problemas de escasez hídrica a corto y largo plazo. Por ello, el uso de tecnologías como la desalación y reúso de aguas residuales se presentan como las principales alternativas en el contexto hídrico nacional para garantizar el suministro de agua dulce tanto para consumo humano como las actividades productivas e industriales a largo plazo.

#### 3.1 Motivaciones de los involucrados para el desarrollo de un APL

Las motivaciones de este Acuerdo corresponden, de manera general, en promover al sector como una alternativa segura, limpia y accesible de abastecimiento del recurso hídrico, frente a los escenarios de escasez resultantes de las consecuencias del cambio climático. Se identifican estas motivaciones:

- Incentivar el sector de la desalación y reúso como alternativas hídricas sustentables para solventar los problemas de demanda de agua tanto para actividades productivas como para consumo humano.
- Gestionar los aspectos ambientales y energéticos del sector de la desalación y reúso para el desarrollo de actividades productivas más sostenibles.
- Fortalecer las competencias que se requieren para el desarrollo y operación de proyectos de generación de agua.
- Evaluar la provisión de energía renovable para la operación de plantas desalinizadoras y en los proyectos de reúso de aguas tratadas.
- Mejorar la evaluación, monitoreo y gestión de los potenciales impactos de la disposición de los vertidos de rechazo y la captación del sector de la desalación en los ecosistemas marinos.
- Articular la vinculación de los distintos actores de la industria de producción de aguas con los servicios públicos encargados de la planificación del uso del borde costero.
- Mejorar la percepción pública del sector como alternativa segura, limpia y accesible de abastecimiento del recurso hídrico

#### 3.2 Oportunidades y amenazas del entorno

El sector de la desalación y reúso todavía contemplan una serie de desafíos y/o amenazas en los que respecto a 3 ejes principales: el aspecto **energético**, ligado al a la demanda de consumo energético del sector y la oferta de suministro de energías renovables no convencionales para el desarrollo de proyectos actuales y futuros; los aspectos **ambientales**, principalmente asociado a los impactos ambientales de la captación y vertidos de rechazos en los ecosistemas marinos, los cuales todavía generan una barrera para el desarrollo de proyectos; y el **capital humano**

**especializado**, respecto a la disponibilidad de personal especializado tanto en el contexto previo de desarrollo de proyectos, como en la fase de operación y mantenimiento de las plantas de desalación y tratamiento de aguas residuales. Por ello, se acentúa la necesidad del desarrollo de un APL con el objetivo principal de identificar las brechas de la desalación y reúso para proponer acciones clave que permitan mejorar la sustentabilidad y eficiencia del sector, y de este modo, impulsar estas alternativas claves para hacer frente a la escasez hídrica y desarrollo socio-económico de Chile.

## 4. Objetivos del Diagnóstico General

El objetivo general de este diagnóstico sectorial es examinar las variables productivas del sector de plantas desaladoras y reúso de agua para articular acciones que permitan mejorar la sustentabilidad del sector y de este modo hacer frente a la escasez hídrica y adaptación al cambio climático.

Objetivos específicos del diagnóstico

- 1) Involucrar de manera temprana a los suscriptores y grupos de interés para el acuerdo
- 2) Caracterizar el sector desde el punto de vista económico, ambiental y social
- 3) Identificar y validar las problemáticas del sector a abordar mediante el acuerdo
- 4) Difundir y validar el diagnóstico sectorial entre los potenciales suscriptores

## 5. Empresas que participan del diagnóstico

La Asociación Chilena de Desalinización A.G. (ACADES) representa al gremio del sector de la desalación y reúso, como gestora de acuerdo APL. ACADES, como asociación nace en el año 2021, con el objetivo de agrupar a todos aquellos interesados en promover el desarrollo de la desalinización y el reúso como fuentes de agua fresca para Chile, a través de soluciones sustentables, y eficientes y que se desarrollen en armonía con las comunidades y el medio ambiente. A la fecha, la asociación agrupa a más de 70 empresas de origen nacional e internacional, incluyendo empresas desarrolladoras de proyectos, empresas sanitarias y operadoras de plantas desalinizadoras. Actualmente, es la única asociación gremial existente en el contexto nacional en material del sector de la desalación y reúso.

Las empresas que participaron del Diagnóstico a través de visitas a terreno y desempeño de la encuesta de caracterización del sector fueron:

1. La planta desalinizadora de Atacama (Nueva Atacama/ECONSSA) emplea la tecnología de osmosis inversa, y entró en funcionamiento en el año 2021. Se trata de un proyecto cuya construcción se ejecutará en tres etapas, las que una vez terminadas permitirán una capacidad máxima final de 1.200 litros por segundo (l/s) de agua desalada. Actualmente, consta de la primera etapa que representa una capacidad máxima de 450 L/s para uso en consumo humano. El proyecto contempla un costo total estimado de US\$ 250.000.000, financiado esta primera etapa por la capitalización de Econssa Chile,

por parte de Corfo. La planta desalinizadora presenta la captación del agua de mar a través de un túnel submarino que finaliza con una torreta de captación situada a 25 m de profundidad. Una vez desalinizada, el agua desalada es impulsada a través de 39 km de tuberías, a los distintos puntos de abastecimiento de las localidades de Chañaral, Caldera, Copiapó y Tierra Amarilla. El sistema de rechazo de la desalinizadora está compuesto por un emisario de 169 m de longitud, el cual conecta en su parte final con tramo de difusores de 8 difusores de 23,3 metros de longitud.

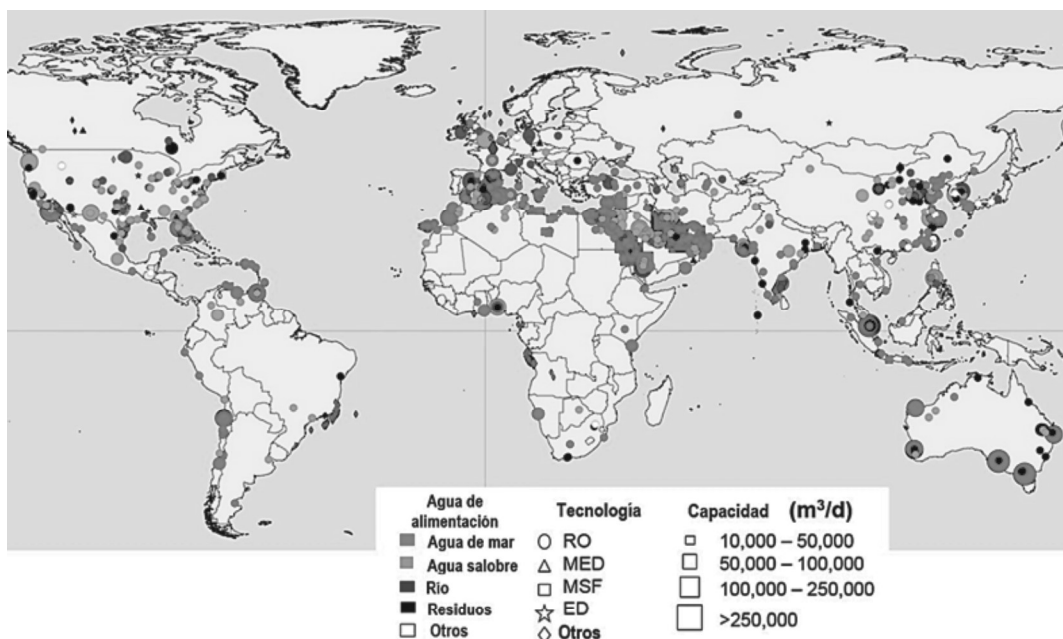
2. La planta desalinizadora de la chimba (Aguas de Antofagasta) emplea la tecnología de osmosis inversa, y entró en funcionamiento en el año 2003. La planta presenta actualmente una capacidad máxima de producción de agua desalinizada de 980 L/s, y abastece el 85% de la demanda de Antofagasta y el 100% de Mejillones, destinando el 100% de la producción de agua desalinizada para consumo humano. El proyecto contempla un monto total de inversión de US\$ 77.848.090. Para el desempeño del proceso de desalación, se lleva a cabo la captación de agua de mar a través de un inmisario situado en la costa de aproximadamente 350 m de longitud. Por otro lado, el vertido de rechazo se descarga al mar a través de un emisario submarino de 200 m de longitud desde la línea de costa, a una profundidad de 15 m y a través de 6 difusores en forma de "L".

## 6. Caracterización del sector

### 6.1. Caracterización general del sector

El incremento de la demanda de agua sumado al cambio de las condiciones climáticas pone de manifiesto el grave déficit hídrico que atraviesa la zona centro-norte de Chile. Además, esta situación de escasez hídrica podría duplicarse para 2030-2060 atendiendo a las proyecciones de los modelos de cambio climático, que estiman que los recursos de agua disponibles disminuyan hasta más del 50% para la zona centro-norte (Garreaud et al., 2019). La falta de recursos hídricos disponibles podría afectar tanto al desarrollo socio-económico de distintas actividades productivas, así como la falta de agua potable para el consumo de las comunidades.

Ante este contexto de emergencia hídrica, urge la necesidad de complementar las fuentes de agua tradicionales con la incorporación de nuevas fuentes de agua alternativas que aseguren la subsistencia de las actividades productivas, industriales y el bienestar de la población. Entre estas alternativas, se encuentra la tecnología de la desalación, que se presenta como una de las tecnologías más plausibles en el mundo para producir agua dulce para múltiples usos. La desalación es una actividad en continuo crecimiento, y presenta más de 18,000 plantas de desalación en más de 170 países de todo el mundo con una capacidad máxima de producción de agua desalada instalada de más de 100 millones de m<sup>3</sup>/día, de las cuales aproximadamente 9,000 plantas corresponden a plantas desalinizadoras de aguas de mar. Sin embargo, la capacidad de producción difiere entre los distintos países y regiones, representando la región de Oriente Medio un 39% del total de la capacidad de producción instalada en el mundo (Eke et al., 2020; Jones et al., 2019).



**Figura 1.** Distribución global de las plantas y capacidades operativas de desalación. Fuente: Jones et al., 2019.

El proceso de desalación consiste en la separación de sales y minerales de un agua de mar o salobre captada, para producir agua de potable para múltiples usos, principalmente para abastecer de agua potable a la población, como también para el uso en actividades agrícolas, actividades industriales (ej. Mineras o centrales eléctricas), turismo, entre otras (Eke et al., 2020; Mezher et al., 2011). Las plantas de desalación pueden dividirse de acuerdo a la tecnología comercial de desalación empleada, estas se pueden dividir en dos grandes grupos: desalación por membranas y desalación térmica (Eke et al., 2020; Mezher et al., 2011; Zarzo and Prats, 2018). La desalación térmica utilizando la destilación multietapa (MSF) y destilación multiefecto (MED) suministra actualmente alrededor el 25% del total de la capacidad de producción, aunque fue la tecnología que dominaba entre los años 1950 - 1970. No obstante, la desalación por membranas mediante Ósmosis Inversa (RO) representa más de un 69% de la capacidad total instalada en el mundo, siendo la tecnología más empleada globalmente debido a su mayor eficiencia energética y, por tanto, menor coste en la producción comparado con otras tecnologías de desalación (Jones et al., 2019; Zarzo and Prats, 2018). Asimismo, se trata de una fuente de agua dulce de excelente calidad que no presenta ningún tipo de contaminante, y es un recurso ilimitado e independiente de las fluctuaciones climáticas (Mezher et al., 2011). Por ello, se presenta como una de las mejoras alternativas para proporcionar agua dulce de calidad y combatir el escenario de cambio climático que atravesará la zona centro norte a corto y largo plazo (Garreaud et al., 2019).

Actualmente, existen numerosos casos de éxito en el mundo donde el desarrollo de plantas de desalación ha permitido solventar las necesidades de demanda de agua (Eke et al., 2020). Entre estos casos, y similar a la problemática de escasez hídrica que atraviesa la zona centro-norte de Chile, se puede destacar el caso de estudio de la zona sudeste mediterránea en España (Downward and Taylor, 2007). El clima en el sudeste mediterráneo español es principalmente seco, con lluvias extremadamente escasas e irregulares, alta frecuencia de períodos de sequías, y específicamente algunas localidades como Almería presentan un clima casi desértico. Este

contexto climático junto a la alta demanda de agua del sector de la agricultura que representa un 75% de la demanda de agua de España (y en algunas zonas como Almería representa más del 90%) propició la búsqueda de nuevas fuentes de agua alternativas para hacer frente a la limitada disponibilidad de agua. Por ello, se adoptó la estrategia de la desalación como alternativa para atender las necesidades de agua en la zona del sudeste mediterráneo (AEDyR, 2018; Zarzo et al., 2013). Entre 1995 y 2000 se estimó que se implementaron más de 200 plantas desaladoras con capacidades de producción entre 500 m<sup>3</sup>/día y 10.000 m<sup>3</sup>/día para atender principalmente las demandas de agua del sector agrícola (Zarzo et al., 2013). Actualmente, se han instalado más de 765 desaladoras de agua de mar y salobre, principalmente ubicadas en la costa sudeste mediterránea e Islas Canarias, que representan una capacidad instalada de más de 5 millones de m<sup>3</sup>/día para uso principal en abastecimiento humano, para atender las necesidades de consumo humano en un contexto de sequía, así como fomentando el desarrollo económico del país para atender la demanda de agua del turismo. Además, para el impulso importante de la actividad agrícola y sector industrial (AEDyR, 2018; Sola et al., 2019).

En el contexto de agua para la agricultura, España se trata de un ejemplo a nivel internacional en el uso de la desalación para solventar el problema de escasez hídrica, siendo el mayor productor de agua desalada en el mundo para este propósito. Actualmente, más del 20% de la producción de agua desalada en España se destina para consumidores agrícolas. La disponibilidad de agua para el sector agrícola ha permitido que la agricultura represente un pilar económico fundamental en España, representando el 9,7% del total de la contribución económica al país, y en algunas zonas específicas como Almería casi el 20% (Maudos et al., 2021).

El desarrollo de plantas de desalación también se ha llevado a cabo en otras regiones del mundo con baja disponibilidad de recursos hídricos para atender actividades de consumo humano y/o agricultura, como por ejemplo: Kuwait, que destina un 13% de la producción total de agua desalada a la agricultura, seguido de Italia (1,5 %), Estados Unidos (1,3%), Bahrein (0,4%) o Qatar (0,1 %). A pesar de que en algunos países la producción de agua desalada para la agricultura no representa un % de producción muy alto, el uso de la desalación ha permitido el desarrollo de una actividad agrícola de regadío muy productiva y mejora de la actividad económica del país.

En el contexto de Chile, el número de proyectos de desalación está incrementando considerablemente, presentando más de 22 proyectos de desalación en operación, y 9 en fase de construcción y/o desarrollo con la respectiva aprobación ambiental del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), lo que representaría próximamente una capacidad de producción total de agua desalada de aproximadamente 8.200 L/s, y una capacidad máxima de agua de rechazo de aproximadamente 10.000 L/s empleando un ratio de conversión promedio del 45% (Sola et al, 2019). La totalidad de estos proyectos están empleando durante su fase de operación y/o construcción, el uso de la tecnología de RO, debido a su mayor eficiencia energética y menor coste económico del agua desalada producida. Además, se espera un aumento de la capacidad de desalación, que podría llegar a 25.000 l/s considerando 12 proyectos en evaluación por el SEA.

Por otro lado, más del 75% de la producción de agua desalada de los proyectos en operación está destinada con fines industriales, principalmente para el uso de agua dulce para el desarrollo de la actividad minera, y más del 90% de los proyectos están instalados en la zona norte de Chile, principalmente concentrados entre la Región de Atacama y la Región de Antofagasta (Sola et al.,

2019). A continuación, se presentan las plantas desalinizadoras instaladas en Chile, presentando su localización, producción y uso final del agua desalada de cada proyecto (Figuras 2.1 - 2.3.).



Figura 2.1. Catastro de plantas desaladoras en la zona norte de Chile. Fuente: ACADES

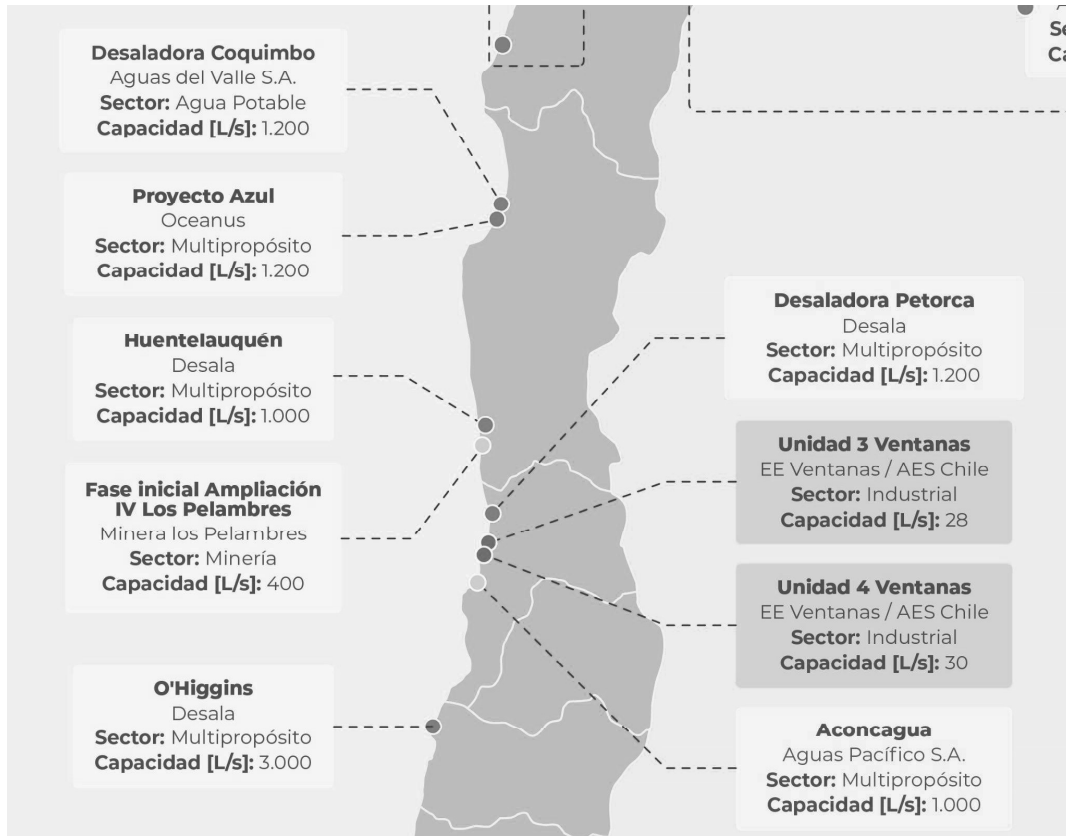


Figura 2.2. Catastro de plantas desaladoras en la zona central de Chile. Fuente: ACADES

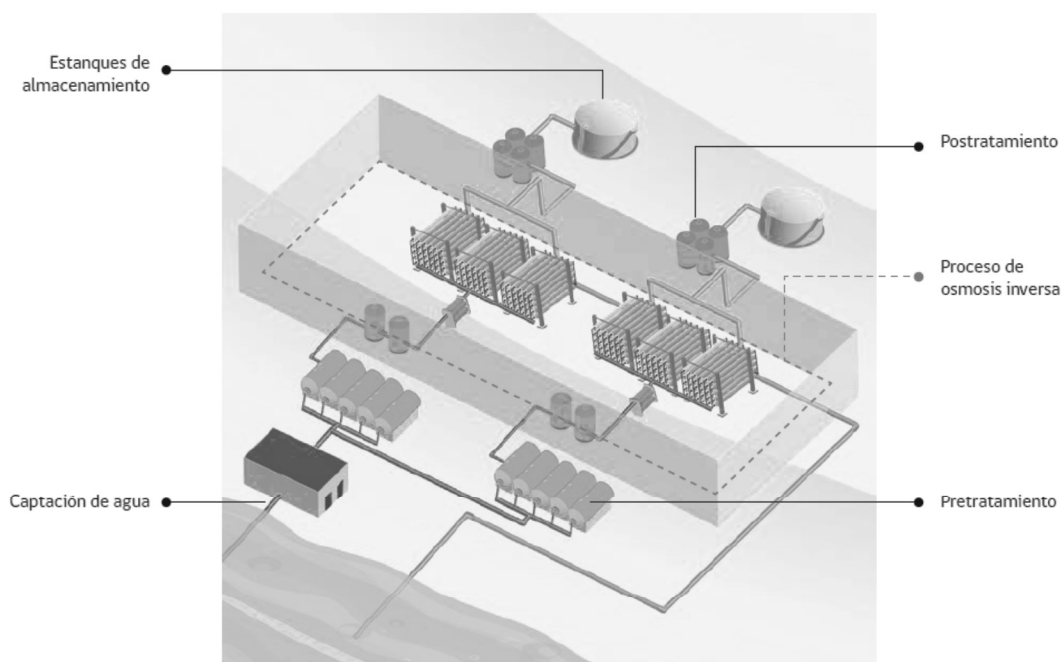




Figura 2.3. Catastro de plantas desaladoras en la zona sur de Chile. Fuente: ACADES

## 6.2. Caracterización del proceso productivo de la desalación

El proceso de desalación consiste en la separación de sales y minerales a partir de la captación de fuente de agua de mar o agua salobre para obtener un agua dulce de calidad (Figura 3). Como se ha abordado en secciones anteriores, el uso de la tecnología de RO predomina tanto a nivel nacional como en el contexto internacional debido a su mayor eficiencia energética, y por tanto, reducción de los costos del agua producto final (Zarzo and Prats, 2018). Además, la desalinización de agua de mar también predomina debido al uso de un recurso ilimitado e independiente de las condiciones climáticas, lo que lo sitúa en una alternativa de alta relevancia en un contexto de cambio climático y disponibilidad de agua dulce a largo plazo. Las principales etapas de esta tecnología se pueden clasificar en: captación de agua de mar, fase de pretratamiento, proceso de RO, postratamiento del agua de permeado, rechazo del vertido de salmuera resultante del proceso de RO, y distribución de agua producto al consumidor final.



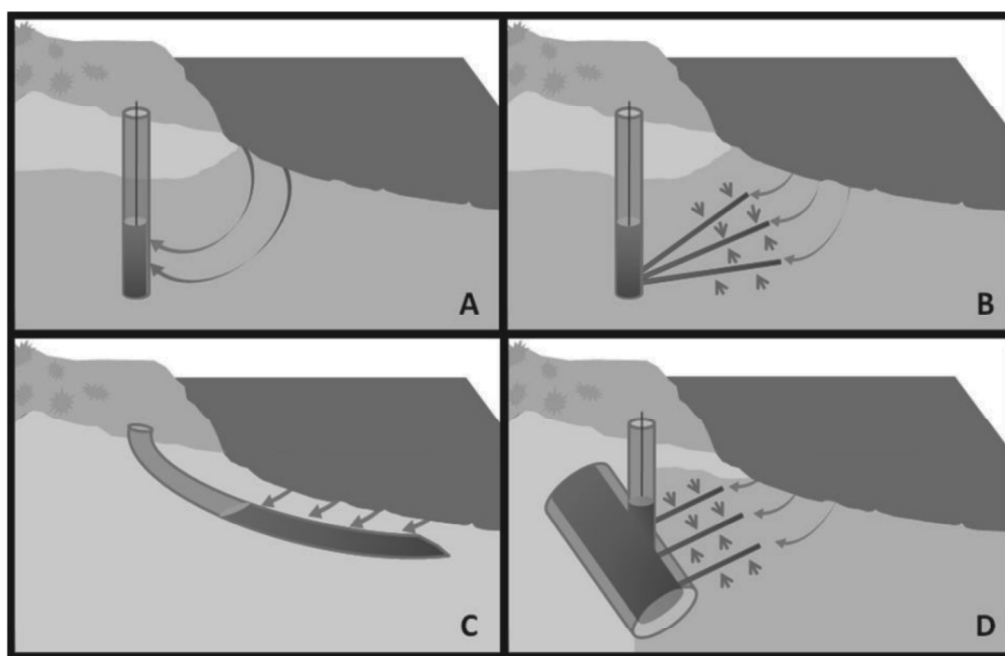
**Figura 3.** Esquema general de funcionamiento de planta desaladora empleando tecnología de ósmosis inversa. Fuente: SEIA, 2023.

### 6.2.1. Captación de agua de mar

Existen diferentes configuraciones de captación de agua de mar, pero principalmente se pueden resumir en captaciones de tomas abiertas y captaciones cerradas a través de pozos costeros. La adopción de cada configuración dependerá principalmente de las características específicas de cada proyecto y la calidad físico-química del agua de captación. No obstante, el principal método de captación de agua de mar en el contexto nacional, es a través de una captación abierta sumergida en el mar, la cual está conectada a través de un inmisario sumergido en el mar. La toma de captación se instala a una longitud y profundidad determinada, que dependerá de las características oceanográficas y calidad físico-química del medio marino. La captación abierta

proporciona un caudal continuo, que permite garantizar una alta producción de agua desalada en el tiempo. No obstante, este método también presenta algunos inconvenientes, ya que el agua de mar puede presentar materia orgánica en suspensión, microorganismos, sólidos en suspensión, entre otros. Por ende, es necesario llevar a cabo un adecuado pretratamiento para eliminar dichas partículas en suspensión previo al proceso de RO (Missimer and Maliva, 2018; Fernández-Torquemada et al., 2019).

Por otro lado, los métodos de captación a través de sistemas cerrados, consisten en la captación a través de pozos de infiltración o drenajes costeros (Figura 4). Estos presentan un coste logístico e/o económico más elevado respecto al método de captación abierta, y se obtiene un caudal de agua de captación menor, y por tanto, permite desalar una producción de agua desalada menor o en su defecto, se requiere el uso de múltiples pozos costeros para garantizar una producción mayor. No obstante, a través de estos métodos se obtienen algunas ventajas, como la obtención de un agua de alimentación con unas características físico-químicas más constantes y homogéneas en el tiempo, y por tanto, una mejor calidad del agua captada debido a que dicha agua de captación está previamente prefiltrada. Esto supone el uso de un pretratamiento físico-químico menos agresivo y con un menor costo económico (Fernández-Torquemada et al., 2019).



**Figura 4.** Otros métodos de captación de agua de mar para el proceso de RO. A) Pozos verticales costeros, B) Pozos radiales de costa, C) Pozos horizontales costeros y D) Captaciones de agua de mar abierto. Fuente: Fernández-Torquemada et al., 2019.

#### 6.2.2. Fase de pretratamiento

El proceso de pretratamiento tiene como objetivo la eliminación de partículas y sustancias en suspensión que podrían afectar a las membranas de RO. La fase de pretratamiento incluye tanto tratamientos físicos como químicos con el objetivo de garantizar la producción de un agua

desalada producto de excelente calidad. Los tratamientos físicos incluyen principalmente el uso de medios filtrantes con el objetivo de eliminar partículas sólidas en suspensión de mayor tamaño presentes en el agua de captación, estos pueden incluir una fase de filtración a través de filtros de arena (Figura 5), filtración por cartuchos, entre otros.

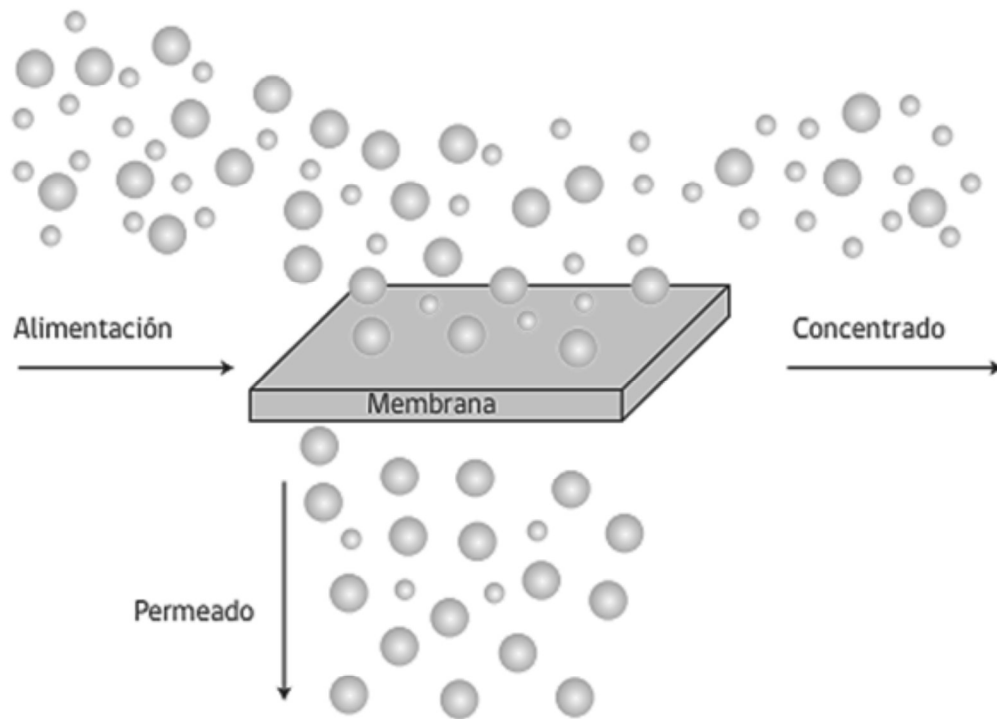


**Figura 5.** Configuración del módulo de filtros de arena en la planta desaladora de Aguas de Antofagasta (Antofagasta). Fuente: Autor

Por otro lado, el uso de aditivos químicos es comúnmente utilizados durante la fase de pretratamiento, y a su vez para el proceso de limpieza de membranas y filtros. El uso de estos dependerá principalmente de las características específicas de la calidad del agua de captación, características específicas de cada planta y toma de decisiones durante la fase de diseño y/o operación. Esta puede incluir el uso de productos como: coagulantes (ej. cloruro férrico, cloruro de aluminio, entre otros) para incrementar la eliminación de partículas en suspensión del agua de mar captada, eliminando los sólidos en suspensión, partículas coloidales, y materia orgánica (ej. ácidos húmicos y fúlvicos, algas, etc.); antiincrustantes (ej. ácido sulfúrico, fosfatos, entre otros) para inhibir la precipitación de sales en las membranas; agentes desinfectantes (ej. bisulfito de sodio, hipoclorito de sodio, entre otros), entre otros.

### 6.2.3. Proceso de RO

La ósmosis inversa consiste en pasar el agua salada captada por una membrana selectiva a través de bombas de alta presión, separando las sales y minerales del agua origen (Figura 6). Por un lado, se obtiene un agua permeada de gran calidad, y por otra parte, se obtiene un agua concentrada que contiene las sales y minerales que son rechazadas junto al vertido de rechazo (Mezher et al., 2011).



**Figura 6.** Esquema de desalación por tecnología de ósmosis inversa basada en transporte selectivo de uno o más componentes de una mezcla a través de una membrana semipermeable. Fuente: Hunger et al. (2012).

Las membranas de ósmosis inversa pueden presentar diferentes configuraciones y disposiciones de acuerdo a las características técnicas-específicas de cada planta desaladora y/o diseño de cada planta, y van instaladas en módulos que almacenan un número determinado de membranas (Figura 7).



**Figura 7.** Configuración de módulo de membranas de ósmosis inversa en planta desaladora de Nueva Atacama (Caldera). Fuente: Autores

#### 6.2.4. Postratamiento

El permeado obtenido es comúnmente tratado químicamente a través de la dosificación de productos químicos, con fines a ajustar su calidad físico-química para el uso final del agua desalada al que vaya destinado, el cual puede ser para consumo humano (potable), uso agrícola, uso industrial, entre otros. Para ello, se ajustan parámetros tales como el pH o dureza, los cuales se alcanzan comúnmente a través de la dosificación de productos químicos como hidróxido de calcio (lechada de cal), anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), hipoclorito de sodio, fluoruro cálcico, entre otros.

#### 6.2.5. Rechazo de los vertidos

Los vertidos de rechazo del proceso de RO pueden desecharse a través de diferentes métodos, entre los que se pueden identificar el rechazo en redes de aguas residuales, vertido en costa o emisario submarino, técnicas de evaporación del vertido, inyección en pozos profundos, entre otros (Missimer and Maliva, 2018). Aunque, el método más común empleado globalmente es rechazar los vertidos de salmuera al mar a través de un vertido en costa o mediante un emisario submarino, ya que, desde el punto de vista logístico y económico, supone el menor coste energético-económico respecto a los otros métodos (Fernández-Torquemada et al., 2019).

#### 6.2.6. Sistema de distribución de agua producto

Una vez obtenida el agua desalada producto, se distribuye al consumidor final es a través de sistemas de bombeo de impulsión. El agua producto se puede distribuir para uso en consumo humano (incluyendo el uso como agua potable), uso industrial (especialmente para uso de minería en el contexto nacional), riego agrícola, entre otros.

### 6.3. Marco Regulatorio

#### 6.3.1. Normativa aplicable

Los proyectos de desalación se localizan en territorio costero. En primer lugar, se destaca que de acuerdo con lo dispuesto por el artículo 589 del **Código Civil (Ley N°4.808)**, el territorio marino y litoral corresponden a bienes de uso público y que cualquier emplazamiento costero industrial, entre los cuales se encuentran plantas desaladoras, se deben ajustar a la **Ley de Concesiones Marítimas (Ley N°340)**.

Así mismo, cualquier proyecto con potencial impacto sobre el medio ambiente tiene que contar con una Resolución de Calificación Ambiental, de acuerdo al Artículo 10 de la **Ley de Bases del Medio Ambiente (Ley N°19.300)**. No obstante, no existe claridad jurídica de las características específicas y/o envergadura del proyecto de desalación, en cuanto su pertinencia de consideración por parte del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), o su tramitación a través de una Declaración o Evaluación de Impacto Ambiental (DIA o EIA, respectivamente).

Las plantas desaladoras generan una descarga de residuos líquidos (ej. salmuera), la cual se encuentra sujeta al **Decreto Supremo N°90**, como cualquier industria con efluentes a cuerpos acuático. En este caso a las tablas N°4 o 5 del mencionado Decreto, dependiente de la descarga dentro o fuera, respectivamente, de la Zona de Protección Litoral (ZPL) marítima.

Si bien no tienen carácter normativo sino instructivo, la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) de la Armada de Chile, ha preparado una serie de guías y métodos relacionados al emplazamiento y funcionamiento de plantas desaladoras. En este contexto, se pueden mencionar:

- El D.G.T.M. Y M.M. ORD. N°12600/05 /1447 VRS del 15 de noviembre de 2021, que aprueba la “Guía sobre lineamientos técnicos para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la autoridad marítima”
- La D.G.T.M. Y M.M. ORD. N°12600/05 /1403 VRS del 9 de noviembre de 2021, que aprueba la “Guía metodológica de revisión técnica sectorial de lineamientos oceanográficos para estudios de impacto ambiental de proyectos que contemplen descargas de residuos líquidos industriales de jurisdicción de la autoridad marítima”
- La Guía DIRECTEMAR para el modelado de la hidrodinámica del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas asociadas a proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras.

Cabe destacar que la ORD. N°12600/05 /499 VRS 18 abril 2023 revoca la ORD. N°12600/05 /1447 VRS del 15 noviembre de 2021 antes mencionada. Lo anterior, debido a que el SEA, mediante Resolución Exenta N° 202399101278, del 29 de marzo de 2023 publica la nueva “Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadores en el SEIA”.

Existen interpretaciones jurídicas que entienden al agua desalada como bien dominio público, toda vez que es de origen marino/costero. Por el contrario, una diferente interpretación considera que al agua desalada como “artificial”, al ser un producto manufacturado industrial.

En el contexto de un crecimiento exponencial de la industria desaladora en Chile, en el año 2018 ingresa a tramitación un Proyecto de Ley, desde la Comisión sobre Recursos Hídricos, Desertificación y Sequía del Senado. El propósito del Proyecto de Ley es abordar las brechas existentes y regular la industria de desalación y el agua desalada como producto. Lamentablemente, el Proyecto de Ley sigue en trámite hasta la fecha.

En relación al reúso de aguas residuales, es relevante mencionar que un 96% de las producidas a nivel nacional son descargadas a cuerpos de agua naturales superficiales (i.e. ríos, lagos, mar), en gran proporción sin ningún tipo de tratamiento. Solo el 4% de las aguas residuales en Chile son sujetas a tratamiento primario y secundario, de las cuales como total solo el 1% son reutilizadas para riego (0,7%) y el resto (0,3%) para otros usos (SISS 2018).

En términos regulatorios, no existe en Chile normativa que regule específicamente el reúso de aguas residuales. En este contexto, solo se le relaciona el **Decreto Supremo 90**, que “Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales”. Por otra parte, se puede mencionar la **Ley N.º 21.075**, con reglamento pendiente para operar, que “Regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises”. No obstante, las aguas grises solo constituyen un 30% de las aguas residuales y no pueden ser consideradas directamente como agua de reúso (ej. riego o consumo humano).

Por otra parte, Chile también cuenta con la NCh 1.333, que define los “Requisitos de calidad de agua para diferentes usos”, con excepción de agua potable, que se regula por la NCh 409. En el caso de la NCh 1.333, solo aplica para el pequeño porcentaje de agua de reúso que pueda terminar en riego, aguas recreacionales y/o en cuerpos con vida acuática.

Finalmente, en abril de 2023 ingresó a tramitación en el Congreso Nacional de Chile una iniciativa legal que “Regular y fomenta los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas residuales”. Así también en marzo de 2023, el Gobierno de Chile anuncia ingreso de proyecto de ley corta para permitir el riego con agua de reúso. Todas estas iniciativas se encuentran en pleno desarrollo y estudio, por lo que se espera la participación de distintas instancias y representantes del sector político, público y privado, de manera que permitan incrementar el reúso y sus distintos potenciales de aplicación.

### 6.3.2. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

El proceso de evaluación de impacto ambiental, se establece como la herramienta legal de gestión más importante dentro de la regulación ambiental, para prevenir y/o adoptar las medidas de mitigación adecuadas para minimizar el impacto medioambiental del desarrollo de un proyecto de desalación (Elsaid et al., 2020; Sola et al., 2019). Durante el desarrollo de este,



se incluyen una serie de herramientas administrativas y estudios de evaluación ambiental para identificar los posibles impactos ambientales asociados a las plantas de desalación, con el fin de adoptar las medidas preventivas, medidas de mitigación y programas de vigilancia ambiental adecuados para el seguimiento de los efectos de los vertidos de salmuera sobre los ecosistemas costeros (Sadhvani Alonso and Melián-Martel, 2018).

### 6.3.3. Programas de vigilancia ambiental

En cuanto a la evaluación de los requerimientos establecidos en los programas de vigilancia ambiental (PVA), existe evidencia científica que demuestra de una gran heterogeneidad en los requerimientos implementados para el seguimiento ambiental de los vertidos de salmuera de entre los proyectos de desalación de similares características aprobados con Resolución de Calificación Ambiental (RCA). Asimismo, se identifican requerimientos no acordes al control de un vertido de salmuera, y que más bien parecen responder al control de descargas de otro tipo de industrias (ej. vertido de una planta de aguas residuales), o requerimientos que responden más bien a una fase de proyecto diferente a la de operación (ej. fase de construcción o estudios previos). Específicamente, la normativa actual en Chile se apoya en la norma D.S. Nº90, que establece requerimientos generales para vertidos industriales a cuerpos acuáticos. Por ello, en el contexto de la desalación, considera un gran número de requerimientos irrelevantes para un vertido de salmuera y sus potenciales consecuencias ambientales. Por ello, se acentúa la necesidad de establecer una regulación ambiental específica para vertidos de salmuera, que esté apoyada por el mejor criterio científico conocido hasta la fecha (ver Sola et al., 2019). Por ello, acorde a la evidencia científica, se recomienda revisar los requerimientos ambientales exigidos en los PVAs de Chile, incluyendo descriptores esenciales para la vigilancia de los efectos de los vertidos de salmuera en el medio marino cuando no están presentes, y eliminando los descriptores innecesarios que generan costes económicos añadidos sin aportar herramientas efectivas para el diagnóstico ambiental. La definición de estos requerimientos debe ir de la mano del mejor conocimiento científico hasta la fecha y ser flexible para adaptarse a las condiciones específicas de cada proyecto de desalación y a la mejor evidencia científica (Sola et al. 2019).

## 6.4. Aspectos ambientales de la desalación

### 6.4.1. Captación de agua de mar

Las principales inquietudes han recaído sobre los procesos de captación de agua de mar y la descarga de salmuera. Una captación mal diseñada puede resultar en la succión significativa de organismos marinos pequeños (ej. larvas, peces y zooplancton en general). No obstante, ha habido notables avances en este respecto en las últimas décadas. Entre ellas, se pueden mencionar la reducción de caudal de entrada a través de mayor superficie de succión, lo cual se ha ensayado empíricamente con distintos organismos marinos. Del mismo modo, la instalación de la captación bajo la zona fótica, que es la sección de la columna de agua donde existe el mayor potencial fotosintético del fitoplancton, y en consecuencia la abundancia de zooplancton, reduce la posibilidad de succión de vida marina. En efecto, es importante considerar que la succión no solo representa un riesgo ambiental, sino que también implica importantes costos para la industria, considerando que un mayor contenido de organismos, materia orgánica y debri en general, representa mayor inversión en limpieza, prefiltros y pretratamiento antes del

proceso de ósmosis inversa; por lo mismo, existen múltiples estímulos ambientales y económicos para evitar impactos ecológicos asociados a la succión de vida marina. De cualquier manera, y considerando que el volumen de captación es alrededor del doble de la producción de agua desalada, actualmente en Chile se están captando alrededor de 700.000 m<sup>3</sup>/día de agua de mar. Del mismo modo, bajo las proyecciones de crecimiento de la industria en Chile, ciertamente se hace necesario poner énfasis en este respecto para no producir una afección en las comunidades costeras.

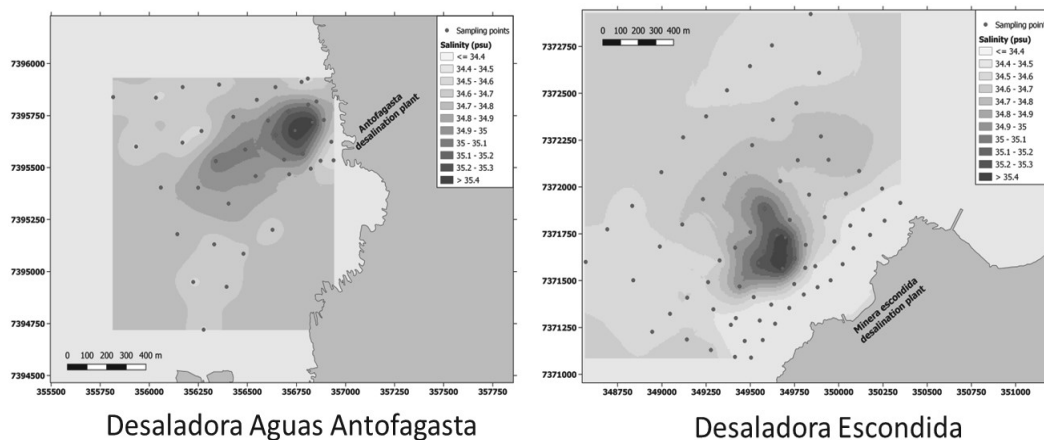
#### 6.4.2. Descargas de vertidos de rechazo

El segundo aspecto, y el que recibe mayor atención, es el potencial impacto de las descargas de salmuera en el medio marino. El vertido de desaladoras, también llamado salmuera, constituye con centrado de agua de mar que puede llegar a doblar la salinidad natural del medio marino; adicionalmente, puede contener trazas de otros compuestos usados durante el proceso industrial (ej. antiescalantes, floculantes, detergentes). Existen distintos métodos de rechazo de los vertidos de salmuera, sin embargo, el método que se ha empleado en las desaladoras de Chile es a través de un emisario submarino al mar, debido a su mayor factibilidad económica y logística respecto a otros métodos (Fernández-Torquemada et al., 2019).

A pesar del exponencial desarrollo de la desalación en Chile en los últimos 30 años, hasta hace pocos años se conocía muy poco en relación a sus efectos ecológicos. Ciertamente, aquello también se manifiesta en aspectos regulatorios y normativos. Antecedentes recopilados en Chile, muestran que los Planes de Vigilancia Ambiental (PVAs) tiene una alta dispersión en relación a los parámetros requeridos a medir en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCAs); en efecto, muchas veces considerando parámetros ambientales irrelevantes en el contexto de potenciales impactos de vertidos de salmuera (ej. estudios de comunidades en intermareal), y por otra parte sin contemplar importantes vectores (ej. pluma de salinidad) (Sola et al., 2019).

Por otra parte, un aspecto de particular interés ha sido el eventual efecto negativo de las salmueras de desalación sobre organismos costeros. Esto ha sido investigado en diferentes partes del mundo (ej. Mar Mediterráneo, Golfo Pérsico, Australia), información que no puede ser directamente extrapolada a las particularidades de las costas de Chile. En este respecto, las costas chilenas han demostrado una favorable respuesta para minimizar los impactos de la salmuera. Las costas de Chile son generalmente de profundas y de una alta dinámica de corrientes debido a fenómenos de escala local y regional, como surgencias costeras y la Corriente de Humboldt, respectivamente. Esto ha quedado de manifiesto en investigaciones recientes del grupo consultor a través de modelaciones de dispersión de plumas de salmuera en distintas plantas desaladoras de Chile (Figura 1). Independientemente de la magnitud del proyecto desalador, se observa una rápida dilución desde el punto de descarga con incrementos de salinidad que no llegan a superar 2 psu sobre los niveles naturales promedios del mar (34 psu). Aunque los incrementos de salinidad son pequeños en el contexto de las costas de Chile, diferentes investigaciones han evaluado respuestas en organismos marinos usando una proyección incluso conservadora de incrementos de salinidad; para esto, se han estudiado distintas especies de macrófitos marinos (i.e. macroalgas y plantas marinas) como modelos de

investigación. Tanto en experimentos de situación controlada de laboratorio como en trasplantes dentro de zonas de influencia de salmuera, las investigaciones han demostrado respuestas específicas ante el estrés osmótico que produce el incremento de salinidad, pero en general sin consecuencias importantes a nivel fisiológico; lo anterior, se puede extrapolar a impactos ecológicos poco significativos, sin perjuicio de que no es recomendable precautoriamente dirigir vertidos de salmuera directamente sobre ecosistemas de alto valor biológico (Blanco-Murillo et al 2023a; Muñoz et al 2020, 2023a, 2023b; Rodríguez-Rojas et al 2020).



**Figura 8:** Ejemplos de plumas salinas de dispersión de salmuera en diferentes desaladoras de Chile (elaboración equipo consultor).

Finalmente, otro motivo de inquietud son otros potenciales aditivos empleados durante el proceso de desalación que son rechazados junto al vertido de salmuera, evaluándose su potencial impacto más allá del exceso de salinidad. En este contexto, los vertidos de salmuera pueden contener ciertos niveles trazas de compuestos usados a lo largo del proceso de desalación (ej. antiincrustantes, floculantes, detergentes, entre otros). No obstante, investigaciones recientes han demostrado que la presencia de estos compuestos a nivel traza no son significativos desde el punto de vista fisiológico, por lo que el exceso de salinidad sigue siendo el principal factor de atención en términos de la gestión de impactos de los vertidos de rechazo de la desalación (Blanco-Murillo et al. 2023b).

#### 6.4.3. Efectos en el litoral

Las instalaciones de desalinización a menudo requieren infraestructura costera que puede alterar los ecosistemas litorales, las poblaciones locales y eventualmente patrimonio cultural. En este sentido, Chile cuenta con un exhaustivo proceso de autorización ambiental de proyectos de infraestructura costera, incluyendo plantas desaladoras, sujetas al Sistema de Evaluación Ambiental (SEIA) del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) (Ley 19.300). En este contexto, distintos estudios y permisos sectoriales deben conseguirse durante el proceso de DIA o EIA, según corresponda, que eviten la afectación de la instalación de plantas desaladoras y sus líneas de transmisión de agua.

#### 6.4.4. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo

A continuación, se presentarán a través de un análisis FODA los desafíos, oportunidades y problemas relacionados con los aspectos ambientales del sector de la desalación, y como estos serán abordados a través de las metas y acciones del APL. La caracterización de este surge con el levantamiento de fuentes primarias de diferentes proyectos desempeñados por el equipo consultor, y las reuniones con expertos llevadas a cabo en el marco de la APL.

##### Tema: Aspectos ambientales de la desalación

<b>Fortalezas</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Evidencia científica demuestra que es posible llevar a cabo una desalación sustentable cuando se lleva a cabo una gestión adecuada de los impactos ambientales.</li> </ul>	<b>Debilidades</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Existe una gran heterogeneidad en el número de requerimientos implementados en los PVA.</li> <li>El potencial impacto ambiental de la captación está poco estudiado en Chile.</li> </ul>
<b>Oportunidades</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>El sector de la desalación está en pleno desarrollo en Chile.</li> <li>Implementar medidas de regulación y gestión de los vertidos que se implementen en los próximos proyectos.</li> </ul>	<b>Amenazas</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Oposición al desarrollo de proyectos por parte de autoridades públicas y población ante la preocupación de los impactos ambientales de la desalación.</li> </ul>
<b>Problemas</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>No existe una normativa ambiental específica para la gestión de los impactos ambientales de la desalación.</li> <li>Se identifican requerimientos implementados en los PVAs, no acordes al control de un vertido de salmuera, y que más bien parecen responder al control de descargas de otro tipo de industrias (ej. vertido de una planta de aguas residuales), o requerimientos que responden más bien a una fase de proyecto diferente a la de operación (ej. fase de construcción o estudios previos).</li> </ul>	<b>Objetivo del APL</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Caracterizar y mejorar el conocimiento científico/técnico del potencial impacto ambiental de la captación de agua de mar.</li> <li>Revisar los requerimientos establecidos en los PVAs para garantizar una correcta gestión de los impactos ambientales de los vertidos salmuera y reducir costos económicos eliminando criterios irrelevantes.</li> <li>Colaboración académica/pública/privada para el desarrollo de proyectos de desalación de manera sustentable.</li> </ul>

## 6.5. Aspectos energéticos del sector de la desalación

Uno de los desafíos ambientales asociados con la desalinización ha sido el consumo energético. Las plantas de desalinización requieren una importante cantidad de energía para operar, lo que se asocia al pre-filtrado de agua de mar y principalmente al proceso mismo de osmosis inversa. Esto puede llevar a un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero si esta energía proviene de fuentes no renovables. No obstante, las tecnologías de desalación han tenido un significativo avance en las últimas décadas con respecto a la eficiencia energética en sus procesos; esto, principalmente debido a los avances tecnológicos desde la aparición de la osmosis inversa. Mientras que en los años 60 el requerimiento energético era de 30 kWh/m<sup>3</sup> de agua producida, en la actualidad ha caído a un aproximado de 3 kWh/m<sup>3</sup>; esto representa alrededor de 44% de los costos operacionales de una planta desaladora, que en estos momentos llega a una eficiencia de aproximadamente 0,5 USD/m<sup>3</sup>. Tomando en cuenta lo anterior y la producción actual de agua desalada en Chile, de alrededor de 8.200 L/s, implican necesidades energéticas de cerca de 260 GW/año y una inversión de 775 M USD/año. Considerando que las predicciones indicarían hasta triplicar el volumen de agua desalada producida para el 2030 en Chile, queda de manifiesto las necesidades de inversión y apuesta por renovables para complementar la matriz energética.

En este sentido, Chile se encuentra bien encaminado; en efecto, es pionero en Sudamérica en el desarrollo de energías renovables. Por ejemplo, en 2020, Chile estuvo dentro de los 30 primeros países con mayor capacidad de generación renovable en el mundo, con 6,9, 3,2 y 2,1 GW/año de potencia instalada proveniente de generación hidroeléctrica, solar y eólica, respectivamente (IRENA 2021). En este momento, la capacidad instalada de energías renovables equivale al 41,3% del total de la matriz energética en Chile. Sin perjuicio de lo anterior, y conociendo las proyecciones de requerimientos energéticos para la industria desaladora, sigue siendo primordial abocar los esfuerzos para expandir la capacidad de energías renovables ante las necesidades de los años venideros.

### 6.5.1. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo

A continuación, se presentarán a través de un análisis FODA los desafíos, oportunidades y problemas relacionados con los aspectos energéticos del sector de la desalación, y como estos serán abordados a través de las metas y acciones del APL. La caracterización de este surge con el levantamiento de fuentes secundarias de índole científica, y las reuniones con expertos llevadas a cabo en el marco de la APL.

**Tema: Uso de Energía en el sector**

<p><b>Fortalezas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los nuevos proyectos contemplan tecnologías nuevas que son eficientes en el uso de energía.</li> <li>• La energía es el principal costo de producción de agua desalada, por lo que hay un incentivo en el uso eficiente de energía.</li> </ul>	<p><b>Debilidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La desalación se trata de un proceso que presenta una importante demanda energética de manera continua.</li> <li>• El principal uso actual que se le da al agua desalada (minería) no es determinante para buscar oportunidades de reducción en el costo de tratamiento.</li> </ul>
<p><b>Oportunidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descarbonización del SEN permite que el sector tenga menos emisiones GEI indirectas</li> </ul>	<p><b>Amenazas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desconoce si la capacidad instalada en el sistema eléctrico nacional es suficiente para abordar la proyección de consumo del sector</li> <li>• El costo de implementar medidas de eficiencia energética aún es elevado.</li> </ul>
<p><b>Problemas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de incentivos para la incorporación de medidas de eficiencia energética.</li> <li>• Incertidumbre sobre cómo se considera la desalación en la planificación de la transmisión.</li> </ul>	<p><b>Objetivo del APL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestionar los consumos de energía para lograr mitigar y compensar las emisiones de GEI indirectas del sector.</li> <li>• Participar de la planificación energética.</li> </ul>

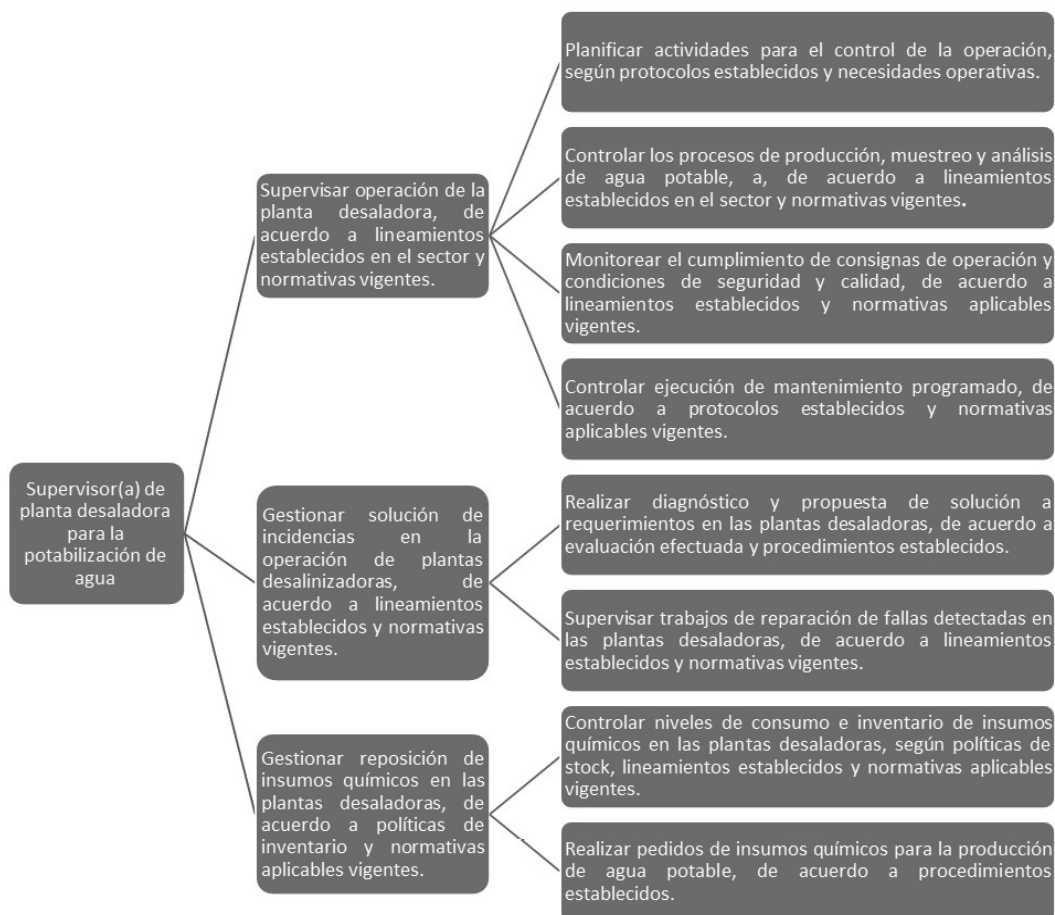
## 6.6. Desempeño social del sector de la desalación

En el contexto de capital humano, el sector de la desalación y reúso afrontan la dificultad para encontrar personal capacitado con las competencias laborales en diversas áreas de especialización, incluyendo las competencias para realizar el diseño, construcción, operación y labores de mantenimiento, entre otros. Específicamente, en el contexto de la desalación, las plantas desaladoras de empresas sanitarias, presentan un porcentaje de especialización de sus trabajadores inferior al 10%, enfatizándose la escasez de mano de obra especializada para la operación y mantenimiento de las plantas, y la competencia del sector sanitario con la demanda de personal cualificado de las empresas que pertenecen al sector de la minería.

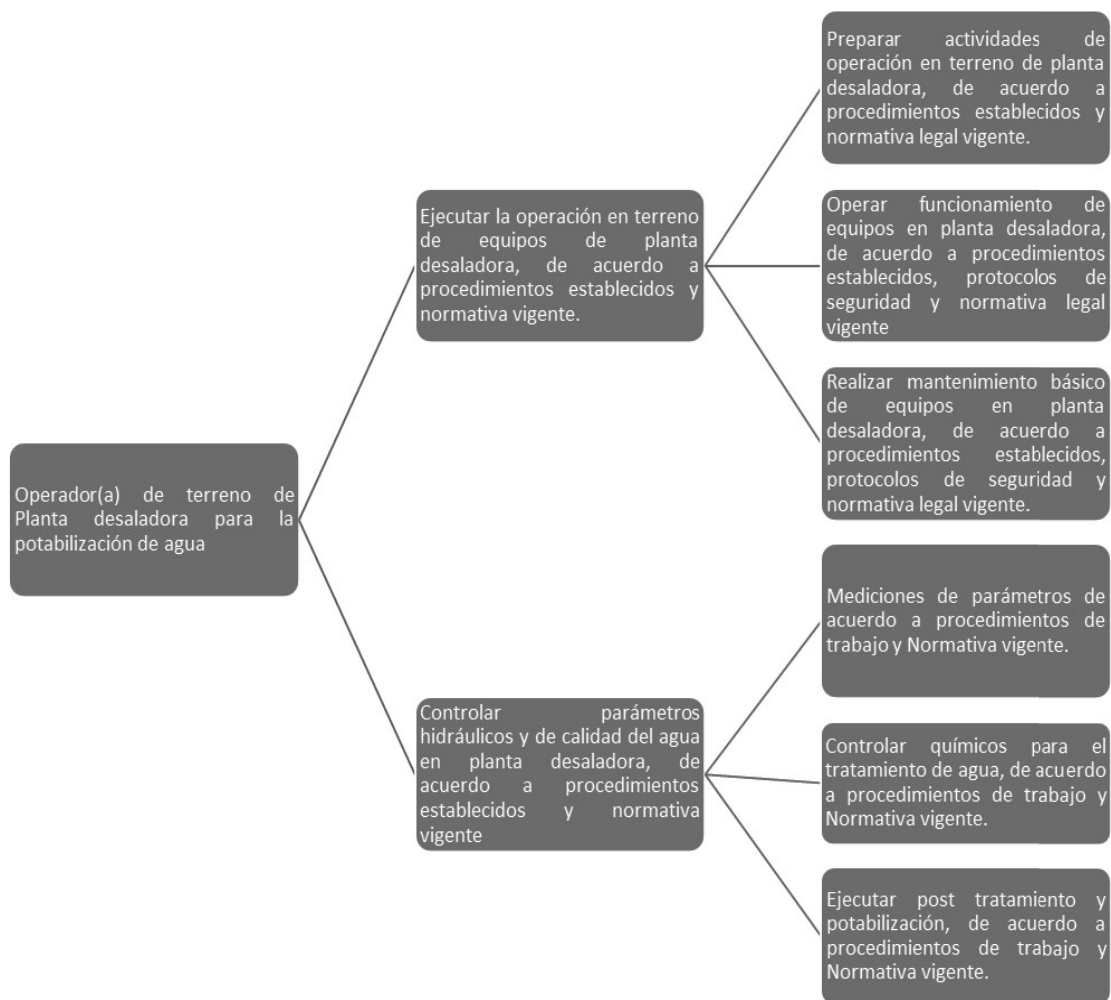
Entre los distintos factores que afectan a la disponibilidad de personal especializado y cualificado, la falta de programas de formación se trata de uno de los principales factores para dotar de las competencias requeridas por el sector. De acuerdo a la reciente evaluación de

Chilevalora (<https://www.chilevalora.cl/>) en el marco de las competencias laborales del sector de la desalación, y aplicable con algunas especificidades también al sector de reúso, se identificaron las principales competencias laborales requeridas para el sector:

1. **Supervisor(a) de planta desaladora para la potabilización de agua**, con el objetivo de asegurar el proceso de producción de agua potable y el cumplimiento de las consignas operativas definidas para producción y calidad de agua potable, de acuerdo a condiciones medioambientales, normativas del sector sanitario y de seguridad vigentes. Se adjunta el mapa funcional de la competencia laboral:

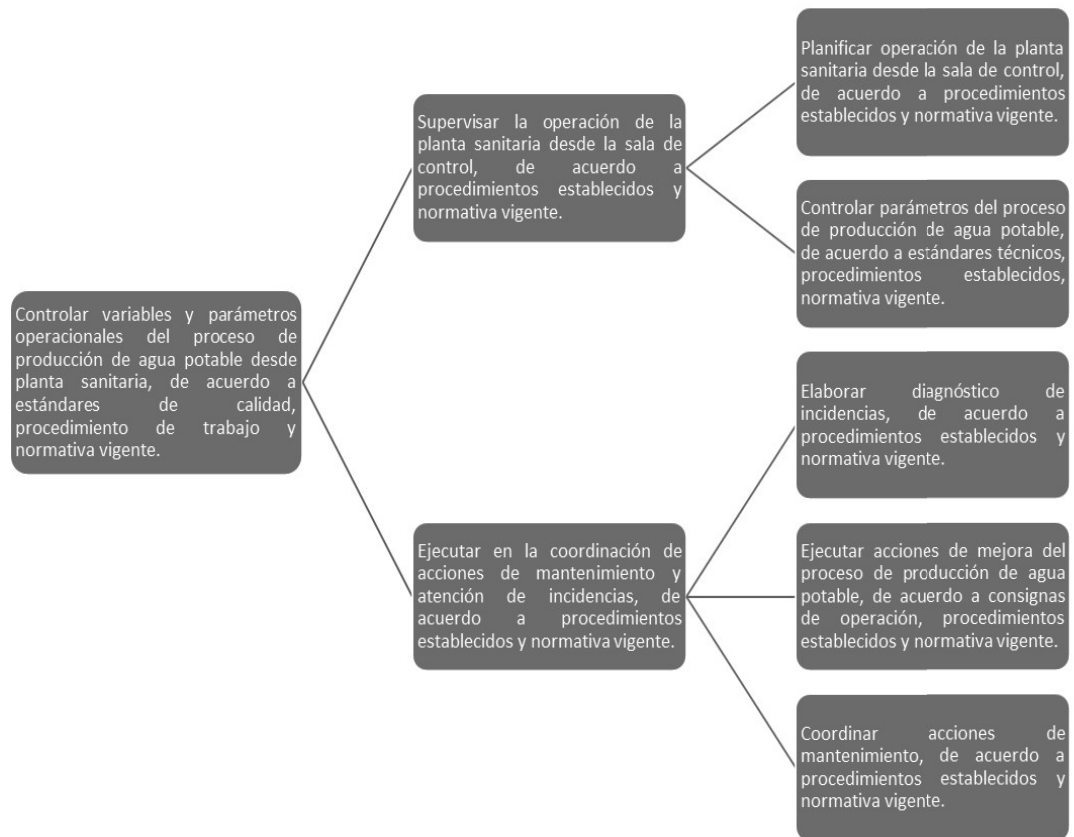


2. **Operador(a) de terreno de planta desaladora para la potabilización de agua**, con el objetivo de operar en terreno los equipos en el proceso de desalación de acuerdo a coordinación con personal de sala de control y cumpliendo los procedimientos y estándares de operación. Además, de realizar mediciones de parámetros operacionales, toma y análisis de muestras, ejecutar procedimientos de trabajo y respetar normativa vigente y reglamento interno de la empresa. Se adjunta el mapa funcional de la competencia laboral:

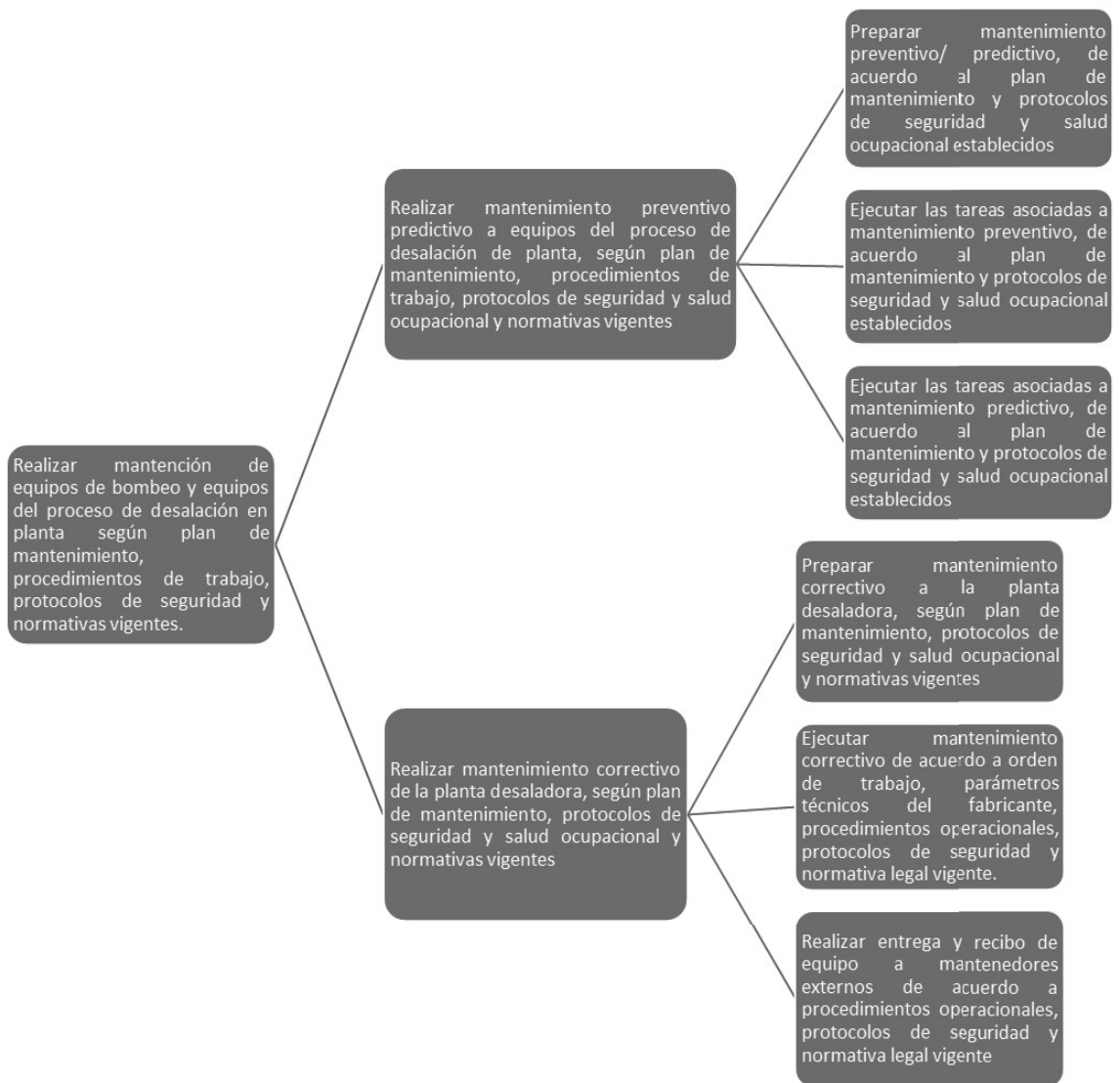


3. **Operador(a) sala de control de planta sanitaria**, con el objetivo de controlar variables y parámetros operacionales de los procesos de planta sanitaria desde sala de control para la producción de agua potable, de acuerdo a estándares de calidad, procedimiento de trabajo y normativa vigente. Se adjunta el mapa funcional de la competencia laboral:





4. **Mantenedor(a) mecánico(a) de planta desaladora para la potabilización de agua**, con el objetivo de realizar mantención de equipos de bombeo y equipos del proceso de desalación en planta según plan de mantenimiento, procedimientos de trabajo, protocolos de seguridad y normativas vigentes. Se adjunta el mapa funcional de la competencia laboral:



#### 6.6.1. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo

A continuación, se presentarán a través de un análisis FODA los desafíos, oportunidades y problemas relacionados con los aspectos de capital humano del sector de la desalación y reúso, y como estos serán abordados a través de las metas y acciones del APL. La caracterización de este surge con el levantamiento de fuentes primarias levantadas durante la caracterización en visitas a terreno, y las reuniones con expertos llevadas a cabo en el marco de la APL.

**Tema: Desarrollo de Capital Humano para el sector**

<p><b>Fortalezas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Hay competencias ya desarrolladas para trabajadores de empresas sanitarias, faltan competencias específicas para las tecnologías de desalación y reúso</li> <li>● Las necesidades de formación no se visualizan como complejas: encargados de centros de formación anticipan que podría cubrirse con programas de especialización y/o formación continua</li> </ul>	<p><b>Debilidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Si bien el requerimiento de mano de obra para la operación de una planta desaladora no es mucho, el aumento exponencial de proyectos anticipa una demanda de trabajadores relativamente importante.</li> <li>● El uso de nuevas tecnologías en la desalación requiere la contratación de personal extranjero para cargos gerenciales y/o ingenieros, que finalmente forman a los operadores</li> <li>● No existe una prospección de la demanda</li> <li>● No existe una prospección de las necesidades de formación</li> <li>● No existe un estudio de remuneraciones</li> </ul>
<p><b>Oportunidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Existen múltiples programas de capacitaciones para operadores y mantenedores en el sector minería que abordan electricidad, mecánica, seguridad, los cuales podrían tener contenido útil para el sector de desalación y reúso.</li> <li>● Para otros sectores, los centros de formación técnica han aplicado la “Importación de cualificaciones” de países extranjeros donde el sector tiene similitudes.</li> <li>● Hay industrias que se están desarrollando en paralelo y que podrían compartir ciertos requerimientos de formación (ej. H2 verde).</li> </ul>	<p><b>Amenazas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Los centros de formación no poseen conocimiento de una demanda específica de competencias para el sector.</li> </ul>
<p><b>Problemas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Escasa oferta de trabajadores con las competencias para diseñar, construir, operar y mantener una planta desaladora.</li> <li>● No existen programas de formación de competencias requeridas por el sector.</li> </ul>	<p><b>Objetivo del APL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Generar un programa de desarrollo de competencias requeridas por el sector.</li> </ul>

## 6.7. Sector reúso

La International Energy Agency (IEA) indica que el sector del agua, incluyendo la recolección y tratamiento de aguas residuales, representa aproximadamente el 4% del consumo total de electricidad a nivel mundial. El tratamiento de aguas residuales en sí representa aproximadamente un cuarto del consumo eléctrico del sector del agua. La IEA también proyecta que, si las ciudades siguen el modelo tecnológico actual para la capacidad centralizada de tratamiento de aguas residuales, el consumo de electricidad podría aumentar en más de 680 TWh para el 2030. Sin embargo, si se despliegan tecnologías de eficiencia energética económicamente viables en todas las nuevas instalaciones de tratamiento de aguas residuales, el aumento en el consumo de electricidad podría reducirse en aproximadamente un 10%.

Además, hay posibilidades de construir instalaciones neutras o incluso positivas en términos energéticos, donde el consumo de electricidad aumentaría menos de 460 TWh gracias a medidas adicionales de eficiencia energética, mientras que la recuperación de energía para biogás y unidades combinadas de calor y energía de alta eficiencia permitirían a las empresas de servicios públicos generar más del 50% de la electricidad que necesitan. Todos estos aspectos deben ser considerados en las políticas públicas asociadas a la expansión del reúso de aguas residuales en Chile, sobre todo teniendo en cuenta su incipiente desarrollo actual.

### 6.7.1. Identificación de los problemas a abordar con el Acuerdo

A continuación, se presentarán a través de un análisis FODA los desafíos, oportunidades y problemas relacionados con el sector del reúso en aspectos ambientales, productivos y sociales, y como estos serán abordados a través de las metas y acciones del APL. La caracterización de este surge con el levantamiento de información obtenidas con reuniones con expertos llevadas a cabo en el marco de la APL.

**Tema: Desarrollo del sector de Reúso en Chile**

<p><b>Fortalezas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Costes Reúso &lt; Costes desalación. (no para el caso dónde no existe depuración de agua (casos emisario submarino sin tratamiento).</li> <li>● Huella de carbono Reúso &lt; Huella de Carbono Desalación de Agua de Mar.</li> <li>● Posibilidad de adaptar la calidad del agua regenerada en función de las necesidades del usuario ('fit-for-use').</li> <li>● Única alternativa económica y medioambiental sostenible para localizaciones alejadas de la costa.</li> </ul>	<p><b>Debilidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Gobernanza del agua y dificultad en la implementación de proyectos / tarifas.</li> <li>● Adquisición de permisos.</li> <li>● Costes Reúso &gt; Costes tratamiento agua superficial / subterránea.</li> <li>● En zonas interiores el potencial de reúso está limitado por el volumen que es necesario devolver a la cuenca (si reutilizas el 100% del caudal de una depuradora, condicionas el caudal ecológico del río en el que vierte y la disponibilidad de recurso aguas abajo).</li> </ul>
<p><b>Oportunidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Resiliencia contra la escasez hídrica y blindaje de la disponibilidad de recursos en el territorio.</li> <li>● Existen modelos de casos de éxito a nivel mundial que pueden adaptarse al contexto nacional.</li> <li>● Preservación de los recursos hídricos continentales.</li> <li>● Equiparar el agua regenerada a calidad de agua potable.</li> <li>● Posibilidad de generar reservas de agua practicando la recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada.</li> </ul>	<p><b>Amenazas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Percepción pública del riesgo del agua regenerada.</li> <li>● Competencia con sector desalación en zonas costeras.</li> <li>● Regulación de parámetros recalcitrantes que obliguen a intensificar tratamientos y por lo tanto incrementen el coste.</li> </ul>
<p><b>Problemas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Percepción pública del riesgo.</li> <li>● Sistemas de recuperación de costes ineficientes.</li> <li>● Planificación estática vs una demanda creciente y variable.</li> <li>● Definir la propiedad del agua y quién puede beneficiarse de la producción del agua regenerada cuando el agua residual pasa de ser un "residuo" a ser una "materia prima"</li> </ul>	<p><b>Objetivo del APL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Desarrollo de estrategias comunicativas y educativas que ayuden a una mejor adopción del agua regenerada por parte de los usuarios y la administración.</li> <li>● Dar a conocer casos de éxito a nivel mundial para animar a inversores y romper barreras</li> <li>● Selección de tecnologías coste-efectivas y producción de las calidades necesarias en función del uso (evitar sobretratamientos).</li> <li>● Desarrollo de espacios colaborativos en los que codesarrollar proyectos.</li> </ul>

## 7. Referencias

AEDyR (Asociación Española de Desalación y Reúso), 2018. Desalación en España en primera persona: de hitos pioneros, a referente internacional. URL <https://historiadesalacion.es>

Blanco-Murillo, F., M. J. Díaz, F. Rodríguez-Rojas, C. Navarrete, P. S. M. Celis-Plá, J. L. Sánchez-Lizaso y C. A. Sáez (2023a). "A risk assessment on *Zostera chilensis*, the last relict of marine angiosperms in the South-East Pacific Ocean, due to the development of the desalination industry in Chile." *Sci. Total Environ* 883, 163538.

Blanco-Murillo, F., L. Marín-Guirao, I. Sola, F. Rodríguez-Rojas, C. J.M. Ruiz, J. L. Sánchez-Lizaso y C. A. Sáez (2023b). "Desalination brine effects beyond excess salinity: Unravelling specific stress signaling and tolerance responses in the seagrass *Posidonia oceanica*." *Chemosphere* 341, 140061.

DesalData, 2021. Global Water Intelligence, Desalination plants, Desaldata. URL <https://www.desaldata.com>

Downward, S.R., Taylor, R., 2007. An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almería, southeast Spain. *J. Environ. Manage.* 82, 277–289. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2005.12.015>

Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., Sodiq, A., 2020. The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination* 495, 114633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>

Fernández-Torquemada, Y., Carratalá, A., Sánchez Lizaso, J.L., 2019. Impact of brine on the marine environment and how it can be reduced. *Desalin. Water Treat.* 167, 27–37. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24615>

Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2019. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

Hunger, K., Schmeling, N., Jeazet, H.B.T., Janiak, C., 2012. Investigation of Cross-Linked and Additive Containing Polymer Materials for Membranes with Improved Performance in Pervaporation and Gas Separation 727–763. <https://doi.org/10.3390/membranes2040727>

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2021). Renewable Capacity Statistics. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf)

Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V., Kang, S., 2019. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Sci. Total Environ.* 657, 1343–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

Maudos, J., Salamanca, J., Raya, A., Miravalles, B., 2021. Observatorio sobre el sector agroalimentario español en el contexto europeo. Informe 2020, *Journal of Chemical Information and Modeling*. Cajamar Caja Rural.

Mezher, T., Fath, H., Abbas, Z., Khaled, A., 2011. Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *Desalination* 266, 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.035>

Missimer, T.M., Maliva, R.G., 2018. Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination* 434, 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>

Muñoz, P. T., F. Rodríguez-Rojas, P. S. M. Celis-Pla, L. Méndez, D. Pinto, D. Pardo, F. Moenne, J. L. Sánchez-Lizaso, C. A. Sáez (2020). "Physiological and metabolic responses to hypersalinity reveal interpopulation tolerance in the green macroalga *Ulva compressa* with different pollution histories." *Aquatic Toxicology* 225.

Muñoz, P. T., F. Rodríguez-Rojas, P. S. M. Celis-Pla, A. López-Marras, F. Blanco-Murillo, I. Sola, C. Lavergne, F. Valenzuela, R. Orrego, J. L. Sánchez-Lizaso, C. A. Sáez (2023). "Desalination effects on macroalgae (part A): Laboratory-controlled experiments with *Dictyota* spp. from the Pacific Ocean and Mediterranean Sea." *Frontiers in Marine Science* 10.

Muñoz, P. T., F. Rodríguez-Rojas, P. S. M. Celis-Pla, A. López-Marras, F. Blanco-Murillo, I. Sola, C. Lavergne, F. Valenzuela, R. Orrego, J. L. Sánchez-Lizaso, C. A. Sáez (2023). "Desalination effects on macroalgae (part b): Transplantation experiments at brine-impacted sites with *Dictyota* spp. from the Pacific Ocean and Mediterranean Sea." *Frontiers in Marine Science* 10.

Rodríguez-Rojas, F., A. López-Marras, P. S. M. Celis-Pla, P. Muñoz, E. Garcia-Bartolomei, F. Valenzuela, R. Orrego, A. Carratalá, J. L. Sánchez-Lizaso, C. A. Sáez (2020). "Ecophysiological and cellular stress responses in the cosmopolitan brown macroalga *Ectocarpus* as biomonitoring tools for assessing desalination brine impacts." *Desalination* 489.

Servicio de Evaluación Ambiental, 2023. Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA. Prim. edición, Santiago, Chile 178.

SISS (2018). Informe de gestión del sector sanitario. [http://www.siss.gob.cl/586/articles-17722\\_recurso\\_1.pdf](http://www.siss.gob.cl/586/articles-17722_recurso_1.pdf)

Sola, I., J. L. Sánchez-Lizaso, P. T. Muñoz, E. Garcia-Bartolomei, C. A. Sáez, D. Zarzo (2019). "Assessment of the Requirements within the Environmental Monitoring Plans Used to Evaluate the Environmental Impacts of Desalination Plants in Chile." *Water* 11(10).

Zarzo, D., Campos, E., Terrero, P., 2013. Spanish experience in desalination for agriculture. *Desalin. Water Treat.* 51, 53–66. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.708155>

Zarzo, D., Prats, D., 2018. Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? *Desalination* 427, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.046>