



UNIVERSIDAD DE TALCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL EN OBRAS CIVILES

**ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE ÁCIDO BÓRICO EN
EL PROCESO DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA
CIVIL EN OBRAS CIVILES

PROFESOR GUÍA: Marco Antonio Alsina Corvalán

Claudia Sofía Hidalgo Zapata

CURICÓ, CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

DEDICATORIA

para mi querido Tata Rodo

AGRADECIMIENTOS

Ante todo agradecer a mi profesor guía, Marco Antonio Alsina Corvalán, por haberme dado la posibilidad de trabajar junto a él y por haberme guiado durante todo este proceso. Igualmente agradecer a Ariel Valdivia, quien formó parte importante de esta memoria.

Dar las gracias a mi familia, principalmente a mis padres, Gonzalo y Mariana, quienes confiaron en mí y me apoyaron desde mi primer día universitario hasta al cierre de mi carrera, y que anhelo sea así por muchos años más. Agradecer también a mis hermanitos, Paula y Diego, por su fiel compañía, cariño y apoyo. Asimismo darles las gracias a mis queridos Palacios Santana, por su cariño incondicional y sincero.

A mi pareja, por ser el mejor compañero, por creer en mí y enseñarme que la constancia y responsabilidad permite obtener hermosos frutos, gracias por ser parte de mi vida.

A mi maravillosa amiga Antonia, quien a pesar de la distancia siempre es parte importante de mí, por su apoyo incondicional y confiar en mí como nadie más, muchas gracias por todo amiga.

Muchas gracias a mi familia curicana, Muñoz Moraga, por recibirme en su casita y hacerme parte de ella, en especial a mi Javi, por apoyarnos y acompañarnos siempre, a pesar de las malas o buenas decisiones que tomamos durante nuestra vida universitaria.

Finalmente, agradecer a mis queridos amigos que me dejó la U, Bastián Valdivia, Carolina Contreras, Matías Vásquez, Paulo Goncalves y Diego Ortega, muchas gracias por su paciencia y hermosa compañía.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 8 |
| ABSTRACT | 9 |
| CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 10 |
| 1.1. OBJETIVOS | 12 |
| 1.1.1. Objetivo General | 12 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 12 |
| CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO | 13 |
| 2.1. RECURSOS HÍDRICOS | 13 |
| 2.1.1. Distribución del recurso hídrico a nivel nacional | 13 |
| 2.1.2. Distribución de los usos consuntivos del agua | 17 |
| 2.2. INSTITUCIONALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN CHILE | 20 |
| 2.2.1. Conflictos de recursos hídricos | 24 |
| 2.3. DESALACIÓN PARA ABORDAR LA ESCASEZ HÍDRICA | 30 |
| 2.3.1. Desalación de agua de mar | 30 |
| 2.3.2. Ósmosis Inversa | 32 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.3.3. | Plantas de ósmosis inversa a nivel internacional | 36 |
| 2.4. | QUÍMICA DEL BORO EN EL AGUA | 39 |
| 2.4.1. | Boro en la hidrosfera | 39 |
| 2.4.2. | Distribución del boro en Chile | 40 |
| 2.4.3. | Toxicidad del boro | 42 |
| CAPÍTULO III METODOLOGÍA | | 45 |
| 3.1. | ETAPAS DE INVESTIGACIÓN | 45 |
| 3.1.1. | Etapa I: Recopilación de antecedentes | 46 |
| 3.1.2. | Etapa II: Levantamiento mediante sistema de información geográfica | 49 |
| 3.1.3. | Etapa III: Clasificación de las tecnologías | 50 |
| 3.1.4. | Etapa IV: Análisis de información | 50 |
| CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS | | 51 |
| 4.1. | PLANTAS DESALADORAS A NIVEL NACIONAL | 51 |
| 4.2. | ENTREVISTA A EMPRESAS DE PLANTAS DESALADORAS | 64 |
| 4.3. | TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE ÁCIDO BÓRICO | 71 |
| 4.3.1. | Ósmosis Inversa | 73 |
| 4.3.2. | Ósmosis Inversa de Doble Paso | 73 |
| 4.3.3. | Resinas de Intercambio Iónico | 74 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.4. Carbón activado | 76 |
| 4.3.5. Funcionalización de membranas | 77 |
| 4.4. PROPUESTA TECNOLÓGICA | 82 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 87 |
| BIBLIOGRAFÍA | 89 |
| ANEXO | 93 |

Índice de figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Escorrentía per cápita en Chile. | 16 |
| 2. | Contraste Cuenca Río Los Choros y Cuenca Río Mataquito. | 17 |
| 3. | Distribución de usos consuntivos del agua en Chile. | 18 |
| 4. | Demanda de agua por sectores productivos. | 20 |
| 5. | Institucionalidad Pública del Recurso Hídrico en Chile. | 22 |
| 6. | Distribución de Plantas Desaladoras por regiones a nivel mundial. | 31 |
| 7. | Planta desaladora de ósmosis inversa | 32 |
| 8. | Demanda de agua por sectores productivos. | 33 |
| 9. | Procesos de una planta desaladora de ósmosis inversa. | 34 |
| 10. | Estrés Hídrico a nivel Mundial. | 36 |
| 11. | Distribución Mundial de principales Plantas de Ósmosis Inversa. | 36 |
| 12. | Planta Desaladora Shuaqaiq3, Arabia Saudita. | 38 |
| 13. | Planta Desaladora IDAM Torrevieja, España. | 38 |
| 14. | Diagrama de ácido bórico $B(OH)_3$ | 40 |
| 15. | Diagrama del tetrahidroxiborato $B(OH)_4^-$ | 40 |
| 16. | Distribución del boro en la zona Norte. | 41 |
| 17. | Etapas de investigación de esta memoria. | 46 |

| | | |
|-----|---|----|
| 18. | Cantidad de plantas desaladoras por macrozona. | 52 |
| 19. | Cantidad plantas y agua producida por regiones. | 54 |
| 20. | Uso agua desalada a nivel Nacional. | 55 |
| 21. | Cantidad de Plantas Desaladoras según macrozona y uso del agua desalada. | 56 |
| 22. | Uso del agua desalada en la Región de Tarapacá. | 57 |
| 23. | Uso del agua desalada en la Región de Antofagasta. | 58 |
| 24. | Uso del agua desalada en la Región de Atacama. | 59 |
| 25. | Uso del agua desalada en la Región de Coquimbo. | 60 |
| 26. | Tipología de ingreso SEA. | 62 |
| 27. | Efecto del tamaño de partículas de las resinas para la eliminación de boro. | 75 |
| 28. | Estructura química de ligandos. | 78 |
| 29. | Distribución de especies con razón molar 1:1 entre ácido bórico y ligando. | 79 |
| 30. | Distribución de especies con razón molar 1:2 entre ácido bórico y ligando. | 81 |

Índice de tablas

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Cuencas Hidrográficas disponibles en Chile. | 14 |
| 2. | Clasificación de cultivos según su tolerancia al boro. | 43 |
| 3. | Preguntas y aspectos de las entrevistas. | 48 |
| 4. | Preguntas y aspectos de las entrevistas. | 65 |
| 5. | Preguntas y aspectos de las entrevistas (continuación). | 66 |
| 6. | Tecnologías de remoción de ácido bórico. | 72 |
| 7. | Resumen de parámetros de ligandos estudiados. | 78 |
| 8. | Matriz de priorización de tecnologías de remoción de ácido bórico. | 85 |

RESUMEN

El boro es considerado un micronutriente vital para los seres vivos, y se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente, con concentraciones que fluctúan desde los 5 mg/L en el medio acuático marino hasta los 10 mg/L en el medio terrestre. En el contexto del agua de mar el boro presenta concentraciones entre 4 y 5 mg/L, la cual debe reducirse a 0,5 mg/L para su uso en agricultura y agua potable de acuerdo al límite establecido por la Organización Mundial de la Salud.

En términos de recursos hídricos Chile es privilegiado, ya que supera ampliamente la escorrentía total media mundial y el umbral establecido para alcanzar la sostenibilidad en un país. Sin embargo, las características geográficas y la diversidad de climas produce importantes diferencias hídricas en el país. Es por esto, que la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos presenta 5 desafíos que permitan armonizar los distintos intereses y usos de los recursos hídricos.

La desalación de agua de mar es una tecnología prometedora en la actualidad para enfrentar los problemas de recursos hídricos. No obstante, remover el boro es particularmente un desafío en la desalación mediante ósmosis inversa.

Este trabajo incluyó un catastro de plantas desaladoras existentes en Chile, identificando 45 plantas desaladoras, las cuales se concentran mayormente en la macrozona norte del país y se encuentran ligadas principalmente a la minería. El 100% de las plantas catastradas a nivel nacional utiliza la tecnología de desalación mediante ósmosis inversa, lo que se presenta como una solución robusta y madura para asegurar el acceso seguro al agua.

Por otra parte, mediante el estudio de literatura se logró delimitar aquellas tecnologías que son prometedoras para la remoción de boro en el agua de mar. Dentro de estas se incluyen i) tecnología de doble paso de ósmosis inversa, ii) resinas selectivas de boro, iii) carbón activado y iv) funcionalización de membranas.

ABSTRACT

Boron is considered an essential micronutrient for living things and it is widely distributed around the environment, with concentrations that fluctuate between 5 mg/L in the marine aquatic habitat up to 10 mg/L in the terrestrial habitat. Regarding seawater, boron has concentrations among 4 and 5 mg/L, which ought to be reduced to 0,5 mg/L for agricultural purpose and drinking water according to the limit established by the World Health Organisation.

In terms of water resources Chile is a privileged country, because of the runoff that far exceeds the worldwide average and the threshold recognised to reach a country's sustainability. Nevertheless, the geographical characteristics and the variety of climate cause numerous water differences in the nation. Therefore, the National Water Resources Strategy introduces 5 challenges to harmonise the diverse attentions and usage of water resources.

Seawater desalination is a promising technology today to face the hydric resources issues. However, removing boron is particularly a challenge when it comes to desalinate through reverse osmosis.

This research included a cadastre of desalination plants existent in Chile, identifying 45 of them, which are mostly placed In the Northern region of the country and mainly linked to mining. 100% of the nationwide registered plants use reverse osmosis desalination, which is presented as a robust and mature solution to ensure safe access to water.

On the other hand, through the study of literature, it was possible to outline those technologies that are favourable for the removal of boron in seawater. These include i) double-pass reverse osmosis, ii) boron-selective resins, iii) activated charcoal and iv) membrane functionalisation.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El 28 de julio de 2010 la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho humano al agua y al saneamiento, revalidando que ambos son esenciales para la realización de todos los otros derechos humanos. Al ser considerada un recurso indispensable y fundamental, el agua es concebida como una necesidad humana básica, es decir, su falta compromete la acción o acto de vivir. Las necesidades humanas respecto a este importante recurso abarcan consumo, preparación de alimentos, higiene personal, funcionamiento de servicios sanitarios y crecimiento de sectores productivos.

Según la Dirección General de Aguas, Chile cuenta con 1.251 ríos, emplazados en 101 cuencas principales y 12.784 cuerpos de agua. Estos recursos hídricos cuentan en términos generales con un agua de buena calidad y son importante reguladores de flujos en cuencas. Adicionalmente, Chile es privilegiado en términos de recursos hídricos, debido a que su zona austral posee una de las mayores reservas mundiales de agua. Sin embargo, debido a las características geográficas y a su diversidad de climas, los recursos hídricos están distribuidos de manera irregular dentro del país. Lo anterior, sumado al crecimiento de la población y una mayor intensidad de uso del recurso han agudizado los problemas de escasez, particularmente al norte del país.

En términos generales Chile posee un volumen de agua procedente de las precipitaciones equivalente a 51.218 m³/persona/año (DGA, 2016), valor que es ampliamente superior a la escorrentía total media mundial de 6.600 m³/persona/año (Banco Mundial, 2004) y al criterio internacional para alcanzar el desarrollo sostenible de 2000 m³/persona/año (Banco Mundial, 2004). A pesar de tal diferencia, existe una gran variación de disponibilidad de recursos a lo largo de las regiones: desde la Región Metropolitana hacia el Norte, la media de disponibilidad de agua está por debajo de los 500 m³/persona/año (DGA, 2016), mientras que desde la Región de O'Higgins hacia el sur la media esta por sobre los 7.000 m³/persona/año (DGA, 2016).

En relación a los recursos hídricos en los últimos años se ha notado un creciente nivel de conflictividad, impactando en las condiciones de vida de la población y el medio ambiente. Tales conflictos derivan de diversos factores, incluyendo mal manejo del recurso, monopolización de acceso, incapacidad de gestión e insuficiencia de regulación, falta de inversión de infraestructura de aprovechamiento, entre otros (Martín, L et. al., 2015). Es por esto que la escasez del agua no puede centrarse exclusivamente como un problema de hídrico, sino que es reflejo a su vez de conflictos políticos, sociales, ambientales, culturales y/o económicos.

Una de las soluciones de infraestructura de aprovechamiento para resolver los problemas ocasionados por la escasez de hídrica es la implementación de plantas desaladoras de agua de mar. Este proceso consiste en la separación de las sales de una disolución salobre, con el objetivo de obtener agua apta para consumo humano, procesos industriales, e irrigación de cultivos de alto valor comercial. Para desalar agua existen diferentes tecnologías, incluyendo ósmosis inversa, la cual consiste en generar presión en el fluido a través de una membrana para retener sólidos disueltos y obtener agua purificada.

A pesar de eficacia en remover iones disueltos del agua, el agua producida a través de ósmosis inversa contiene elevadas concentraciones de boro, un micro-nutriente con un límite estrecho entre deficiencia y toxicidad. La concentración del boro en el agua de mar es entre 4-5 mg/L (Argust, 1998), pero límite para agua potable es de 0,5 mg/L (Xu, R et. al., 2010). Es por esto que la necesidad de remover el boro del agua de mar y conocer los estándares de calidad presenta un importante desafío de costo-efectividad en la remoción de boro mediante ósmosis inversa en el proceso de desalación de agua de mar.

Considerando la gran cantidad de plantas desaladoras con tecnología de ósmosis inversa que existen en Chile, junto con los desafíos asociados al abastecimiento de agua potable en el país, el propósito de esta memoria es recopilar antecedentes de las tecnologías actuales que existen para la remoción del boro del agua, con la finalidad de proponer alternativas para mejorar la eficiencia de remoción de boro en conjunto con la tecnología de ósmosis inversa.

1.1. OBJETIVOS

Esta memoria considera un enfoque metodológico de análisis de literatura y entrevistas semi-estructuradas a actores relevantes de la industria para caracterizar las principales tecnologías nivel nacional para desalación de aguas, incluyendo su capacidad para alcanzar los estándares de boro requeridos para consumo de agua potable y riego. A continuación se presenta el objetivo general y objetivos específicos de esta memoria.

1.1.1. Objetivo General

Investigar y analizar las tecnologías existentes de remoción de ácido bórico del agua, con énfasis en alternativas que permitan mejorar la eficacia de este proceso en las plantas desaladoras existente a nivel nacional.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Recopilar antecedentes sobre las tecnologías actuales para remover el ácido bórico del agua.
- Reunir antecedentes acerca de empresas que cuenten con plantas desaladoras en Chile, con la finalidad de conocer sus procesos de operación y gestión.
- Caracterizar las plantas desaladoras existentes en Chile mediante macrozonas territoriales.
- Clasificar las tecnologías de remoción de ácido bórico en base a las características hidráulica y químicas, entre otras.
- Proponer alternativas para mejorar la eficiencia de remoción de boro en las plantas desaladoras a nivel nacional en base a la revisión de literatura.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los antecedentes técnicos que sustentan esta memoria. Se aborda en primera instancia la distribución de recursos hídricos a nivel nacional, junto con los diversos conflictos que se desarrollan en torno al agua. En el contexto de alternativas para enfrentar los conflictos por el agua se describe el proceso de desalación mediante tecnología de ósmosis inversas y su presencia a nivel internacional y nacional. Finalmente, se entregan antecedentes acerca de la presencia del boro en el agua, su distribución en el país y los diversos problemas que pueden provocar en términos toxicológicos para animales y cultivos.

2.1. RECURSOS HÍDRICOS

Una de las principales fuentes de recursos hídricos en nuestro país son las cuencas hidrográficas. Una cuenca hidrográfica es la superficie terrestre dentro de la cual las aguas precipitadas son drenadas por un río o una red cauces. En caso de que desemboquen en un cuerpo de agua o en el mar, la cuenca se denomina **exorreica**. En cambio cuando las aguas fluyen hacia un valle cerrado sin salida, la cuenca se denomina **endorreica**. La Dirección General de Aguas identifica 101 cuencas hidrográficas, 467 subcuencas hidrográficas y 1496 subsubcuencas (DGA, 2016).

2.1.1. Distribución del recurso hídrico a nivel nacional

Las cuencas hidrográficas disponibles en Chile se distribuyen a lo largo de sus regiones. Para una mejor comprensión de distribución del recurso hídrico se optó por agrupar las regiones en cuatro grandes zonas, denominadas macrozonas (ver Anexo 1). La tabla 1 muestra las cuencas hidrográficas existentes en Chile, clasificadas por macrozonas territoriales:

| Macrozona | N° | Región | N° Cuencas |
|--------------|------|---|------------|
| Norte | XV | Arica y Parinacota | 5 |
| | I | Tarapacá | 5 |
| | II | Antofagasta | 10 |
| | III | Atacama | 11 |
| | IV | Coquimbo | 10 |
| Centro | V | Valparaíso | 8 |
| | RM | Metropolitana | 2 |
| | VI | Libertador General Bernardo O'Higgins | 2 |
| | VII | Maule | 5 |
| Sur | VIII | Biobío | 9 |
| | IX | La Araucanía | 3 |
| | XIV | Los Ríos | 2 |
| | X | Los Lagos | 7 |
| Austral | XIV | Aysen del General Carlos Ibáñez del Campo | 9 |
| | XII | Magallanes y la Antártica Chile | 13 |
| Total | | | 101 |

Tabla 1: Cuencas Hidrográficas disponibles en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir de Atlas del Agua, Chile 2016 (DGA, 2016).

Dentro del contexto mundial, Chile puede considerarse un país privilegiado en materia de recursos hídricos: la escorrentía total media¹ corresponde a 51.218 m³/persona/año (DGA, 2016), valor que es ampliamente superior a la media mundial de 6.000 m³/persona/año. Sin embargo, las diferencias hídricas en Chile son importantes, debido a sus características geográficas y a la diversidad de climas. Desde la región Metropolitana hacia el norte la escorrentía total media se encuentra cercana a los 500 m³/persona/año (DGA, 2016), en tanto desde la región de O'Higgins hacia el sur está por sobre los 7.000 m³/persona/año (DGA, 2016). A continuación se describe la situación hídrica nacional nivel de macrozona.

La macrozona Norte se caracteriza por un clima árido a semiárido, con escasas precipitaciones que van en aumento en dirección sur, y con un promedio de lluvia caída de 87 mm/año. Presenta la menor escorrentía per cápita de 510 m³/persona/año.

La macrozona Centro posee un clima mediterráneo con moderadas precipitaciones que llegan hasta los 943 mm/año, las cuales se concentran en invierno. Esta macrozona también presenta una estación seca prolongada de 7 a 8 meses. Sin embargo la escorrentía per cápita es aproximadamente 6 veces la correspondiente a la macrozona Norte, alcanzando 3.196 m³/persona/año (DGA, 2016).

Por otra parte, la macrozona Sur se caracteriza por la presencia de un clima que va desde templado lluvioso a marítimo lluvioso con abundantes precipitaciones que aumentan hacia el Sur, con un promedio de lluvia caída de 2.420 mm/año y una escorrentía per cápita promedio de 56.799 m³/persona/año (DGA, 2016).

Finalmente, la macrozona Austral posee grandes precipitaciones a lo largo del año, cuyo promedio alcanza los 2.963 mm/año, presentando la mayor escorrentía per cápita de todo el territorio nacional de 2.340.227 m³/persona/año (DGA, 2016). La figura II.1 contrasta de forma gráfica la escorrentía per cápita por macrozona territorial, con el uso de escala logarítmica para una mejor visualización.

¹Volumen de agua procedente de las precipitaciones que escurren por los cauces superficiales y subterráneos.

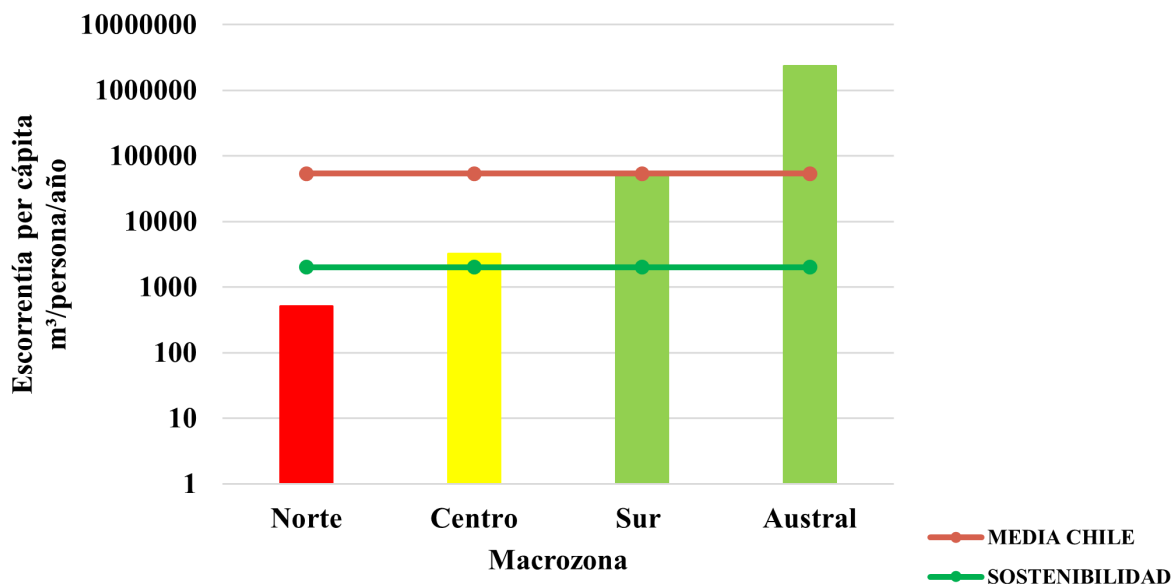


Figura 1: Escorrentía per cápita en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir del Atlas del Agua, Chile 2016 (DGA, 2016).

La línea horizontal verde de la Figura 1 corresponde al umbral definido a nivel internacional para el desarrollo de la sostenibilidad de 2.000 m³/persona/año (Banco Mundial, 2010). De forma gráfica podemos observar que la macrozona Norte se encuentra en déficit de recursos hídricos, mientras que la macrozona Sur y Austral presentan un superávit significativo del recurso.

Podemos observar de forma gráfica la diferencia de recursos hídricos a lo largo del país mediante la comparación de dos cuencas, una con déficit hídrico y otra con superávit, como se presenta en la Figura 2. La cuenca de Río Los Choros, Región de Coquimbo, posee un consumo mayor a la oferta hídrica, junto con una fuerte presión sobre los recursos, limitando el desarrollo económico de la zona. Por otra parte, la cuenca Río Mataquito, Región del Maule, presenta un superávit de sus recursos hídricos en comparación a otras zonas del país, y no experimenta presiones importantes sobre sus recursos hídricos.



Figura 2: Contraste Cuenca Río Los Choros y Cuenca Río Mataquito.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2. Distribución de los usos consuntivos del agua

A nivel mundial el agua es un recurso estratégico para el desarrollo de los sectores productivos, y por ende la economía de un país. En Chile actualmente las aguas son un bien de uso público, es decir, su uso pertenece a todos los habitantes de la nación, y se otorgan a los particulares mediante derechos de aprovechamientos de conformidad. Estos aprovechamientos se clasifican en usos consuntivos y no consuntivos; los derechos consuntivos permiten que una vez usado, el recurso no se regresa. Por el contrario, los derechos no consuntivos, permiten emplear el agua sin consumirla y obligan a restituirla. La Figura 3 muestra la distribución de los usos consuntivos del agua para el sector silvoagropecuario, industrial, minero y sanitario a nivel nacional.

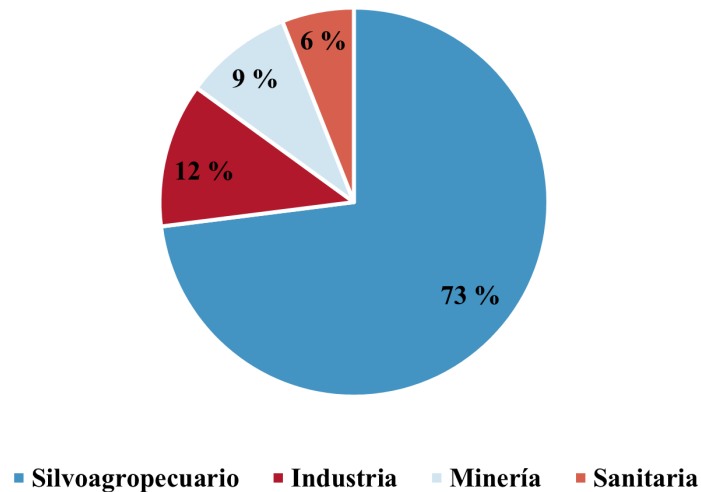


Figura 3: Distribución de usos consuntivos del agua en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (MOP, 2013).

El sector silvoagropecuario se conforma por actividades agrícolas, ganaderas y forestales, y representa un 73% de las extracciones consuntivas del agua a nivel nacional, permitiendo el riego de cerca de un 1 millón de hectáreas. Dentro de los desafíos entorno al agua se constituye principalmente el aumento de la eficiencia del uso, es decir, mejorar las tecnologías de riego, ejecución de obras de conducción y almacenamiento de las aguas y además, trabajar desafíos respecto al manejo de contaminantes que se generan.

El sector industrial aprovecha un 12% de los usos consuntivos del agua para diversos procesos productivos. Este sector tiene como desafío minimizar el riesgo de contaminación de las aguas y optimizar su uso en los diferentes procesos productivos.

El sector minero representa un consumo de usos consuntivos del agua de un 9% con respecto a la demanda nacional, sin embargo, en la actualidad gran parte de las empresas mineras que operan en Chile son productoras de agua para llevar a cabo los diversos procesos mineros. Por lo cual, el gran desafío del sector se centra en minimizar los riesgos de contaminación de aguas

Si analizamos las principales actividades productivas por macrozonas territoriales, podemos establecer que en la macrozona Norte una de las principales actividades que demandan recursos hídricos es la minería, concentrando una de las mayores producciones de cobre, oro, plata y otros minerales. El desarrollo de esta actividad requiere una demanda estimada de 10,41 m³/s para llevar a cabo los procesos de producción. Sumado a lo anterior, el sector silvoagropecuario es que el más agua utiliza en la macrozona Norte, con una demanda aproximada de 51,45 m³/s (DGA, 2016).

Debido a mayores precipitaciones y abundancia de agua de agua producto de los deshielos, la macrozona Norte es considerada una de las zonas de Chile con los suelos más fértiles, por lo que una de las principales actividades económicas que se realizan es el sector silvoagropecuario, con una demanda total de 389,25 m³/s. Además. el sector industrial demanda alrededor de 20,23 m³/s de los recursos hídricos y la minería un 4,04 m³/s de estos (DGA, 2016).

El sector silvoagropecuario también corresponde a la actividad productiva que más predomina en la macrozona Sur, con una demanda estimada de 84,26 m³/s de agua destina a riego de cultivos y áreas forestales. Mientras tanto, el sector industrial demanda en esta macrozona alrededor de 13,83 m³/s (DGA,2016).

En la macrozona Austral resaltan actividades productivas como la ganadería, industria forestal y la minería, siendo la principal demanda de recurso hídrico en el sector industrial de 5,99 m³/s, luego el rubro minero con un 2,83 m³/s y finalmente el sector silvoagropecuario con una demanda estimada de 1,76 m³/s de agua (DGA, 2016).

La Figura 4 presenta la demanda de agua de los diferentes sectores productivos con mayor predominancia en cada macrozona.

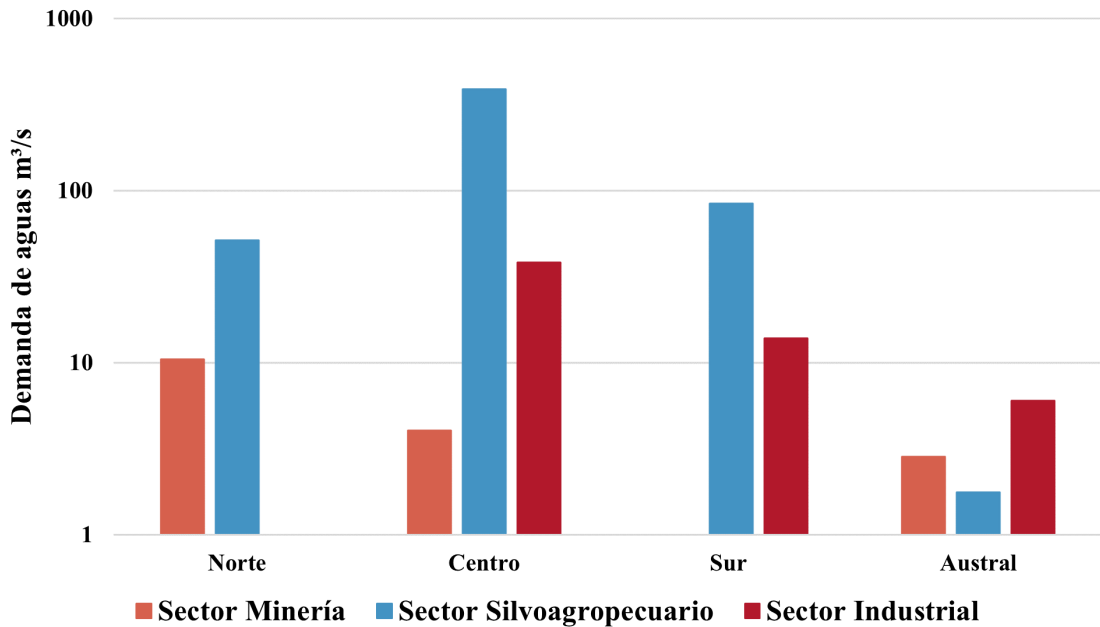


Figura 4: Demanda de agua por sectores productivos.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Dirección General de Aguas (DGA, 2016).

2.2. INSTITUCIONALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN CHILE

Debido a la importancia del agua y a su condición de recurso escaso, se crea la necesidad de reglamentar su uso, que en el caso de Chile, se realiza a través de varios instrumentos normativos, siendo el principal el Código de Aguas (DFL N° 1122-1981 del Ministerio de Justicia). En Chile las aguas son consideradas bienes nacionales de uso público y se otorgan a los particulares derechos de aprovechamiento en conformidad a las disposiciones que establece el actual ordenamiento

Actualmente en Chile sus jurisdicciones y atribuciones regulatorias se entregan a diferentes organismos públicos, como se observa en la Figura 5. Producto de esta gran cantidad de organismos con competencias en materias hídricas, la gobernanza efectiva sobre el recurso hídrico se ve diluida, lo que a su vez impacta negativamente sobre la gestión eficiente del recurso. La gran cantidad de organismos con competencia en temas hídricos es uno de los principales desafíos que deben ser abordados en materia de gobernanza hídrica.

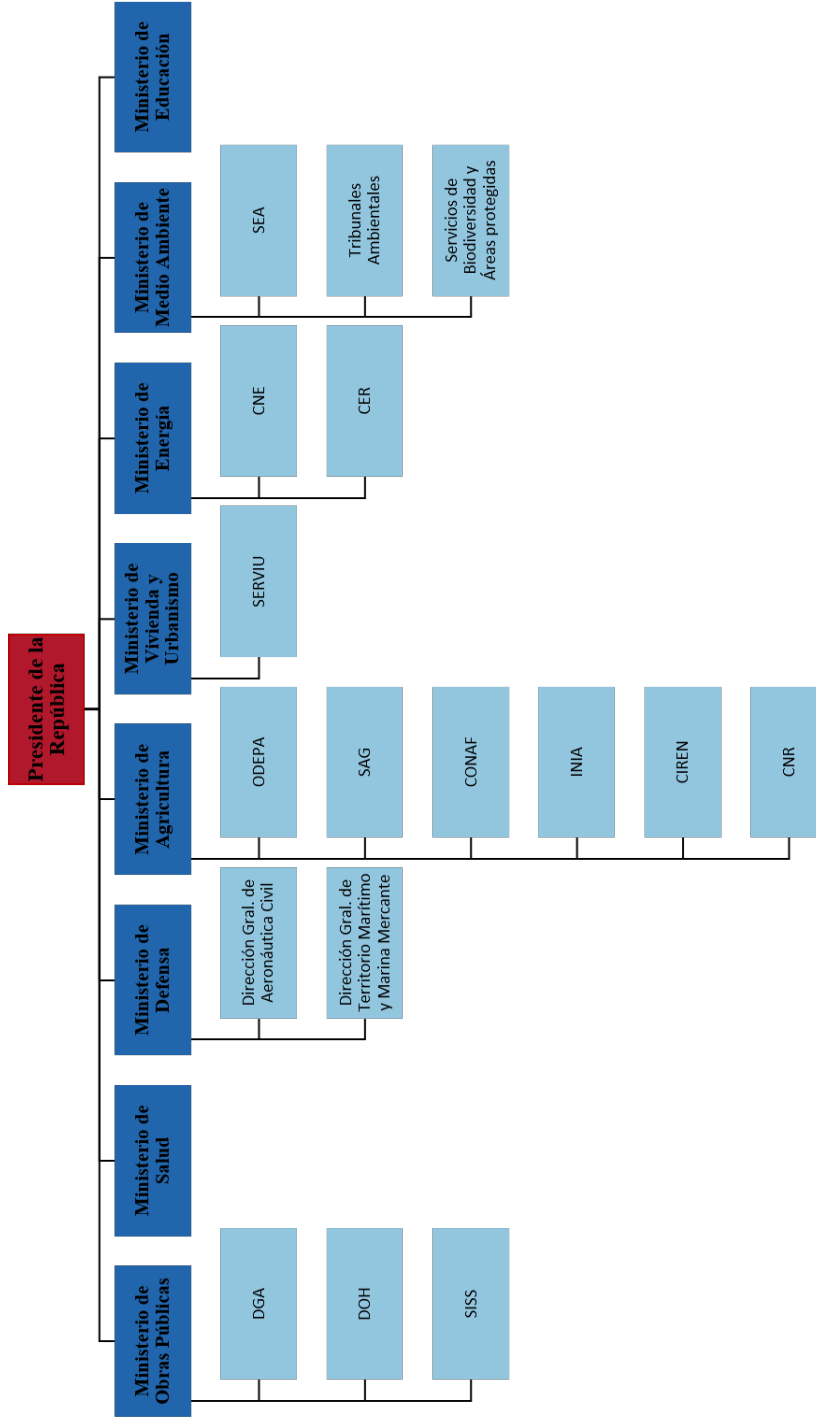


Figura 5: Institucionalidad Pública del Recurso Hídrico en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir de la ENRH (MOP, 2012).

En Chile, la gestión de los recursos hídricos opera en base a un modelo de mercado regulado por el Código de Aguas. Este marco regulatorio se basa en la idea de que el acceso al agua es un bien económico y su asignación se gestiona más eficiente a través de los derechos de la propiedad privada, precios y mercados. Tales derechos privados sobre el agua pueden ser adquiridos a través de una acción administrativa de la Dirección General de Aguas (DGA) o ser comprados mediante el mercado del agua.

El mercado del agua se conforma con las interacciones entre los compradores y vendedores de los derechos de aprovechamiento de agua (DAA). Cuando existe un mercado de DAA, los usuarios del recursos cuentan con los incentivos para realizar compras y/o ventas, las cuales posibilitan la reasignación de los DAA a un precio de equilibrio. La reasignación puede ser mediante el intercambio del derecho de propiedad, ya sea por un período limitado de tiempo (arriendo) o a perpetuidad (venta). Las variaciones en el precio de los derechos son consecuencia de fluctuaciones, por diversos factores, de la oferta y/o demanda de agua (ODEPA,2010).

Con anterioridad al primer Código de Aguas existe la Confederación de Canalistas de Chile, la cual representa a 4.000 organizaciones de usuarios de agua (OUA) del país, juntas de vigilancias, asociaciones de canalistas y comunidades de agua. Estas organizaciones privadas sin fines de lucro cumplen una función pública de distribución del agua a cada usuario según sus derechos, labor que se realiza sin costo para el erario nacional.

Las funciones de la Confederación de Canalistas de Chile se listan a continuación:

- Nexos entre usuarios del agua
- Intercambio de experiencias entre organizaciones de usuarios
- Referente frente a organismos públicos
- Portavoz de inquietudes y propuestas
- Apoyo a sistemas de regulación, derivación, conducción y aplicación del agua

- Apoyo a la Constitución y Funcionamiento de Organizaciones de Usuarios
- Dar a conocer la importante labor de las organizaciones en la distribución del agua y manejo de cuencas
- Representar y apoyar a las organizaciones de usuarios frente a organismos públicos
- Apoyo en la construcción de embalses, abovedamientos y en general, en todas aquellas obras que permitan aumentar los terrenos regados en nuestro país

2.2.1. Conflictos de recursos hídricos

A pesar de esta gran disponibilidad hídrica del país, la demanda de consumo, la sequía, el cambio climático, y la diversidad de organismos con competencias en temas hídricos han instalado con mayor frecuencia problemas asociados a la distribución del recurso. Esta condición ha tenido un profundo impacto sobre los sistemas de vida y sustento de la población, aquejando el desarrollo de las actividades económicas y sociales del país, trayendo consigo conflictos entorno al recurso hídrico.

Los conflictos por el agua (CpA) han aumentado hasta alcanzar altos niveles de complejidad e impactos en la economía, política, sociedad, población y medio ambiente, afectando en las condiciones de vida de la población y el medio ambiente. Dentro de las disputas de los conflictos por el agua encontramos **alta polarización, ausencia de espacios de diálogos, asimetría informativa, poca transparencia, insuficiencia o dificultad de manejo, intereses ocultos y conflictos de valores e ideologías**, las cuales dificultan su solución (Martín et. al., 2015).

En general, los CpA derivan en muchos casos de las debilidades en la gobernabilidad del agua y el aumento de la capacidad de movilización de la sociedad civil, pero también de una distribución social injusta y de diferentes ideologías (Martín et. al., 2015). Históricamente, las sociedades al hacer frente a grandes desafíos de la gestión del agua han estructurado sistemas de manejo efectivos, derivados de la necesidad de controlar los recursos hídricos, tanto para la defensa de efectos

daños como para su aprovechamiento a escala nacional y global (Wittfogel, 1966).

La Comisión para América Latina y el Caribe, destaca que los problemas entorno al agua no son solo por el agua sino que derivan de diversos factores tales como:

- Mal manejo del recurso.
- Contaminación de aguas.
- Monopolización de externalidades negativas.
- Amenazas a la sustentabilidad.
- Incapacidad de gestión.
- Insuficiencia de regulación.
- Falta de inversión en infraestructuras de aprovechamiento.

En el caso de que los CpA son exclusivamente ocasionados por la dimensión hídrica de la escasez, no se pueden encasillar únicamente como un problema hídrico, debido a que involucra problemas políticos, sociales, medio ambientales, culturales y/o económicos. Por tanto, continua siendo un conflicto difícil de solucionar debido a que implica múltiples intereses. El centro de la mayoría de los CpA desencadenan del aprovechamiento, manejo y protección de los recursos hídricos, y se presentan como un problema de carácter excepcional que es urgente de evitar, manejar, prevenir o desactivar.

Reconociendo que los actuales sistemas de gestión de los recursos hídricos son ineficientes para prevenir o solucionar los CpA, algunos autores han propuesto un enfoque basado en los derechos humanos (Martín et. al., 2015), como:

- Derecho humano al agua y saneamiento
- Cooperación, integración y armonización del derecho internacional
- El rol de la comunidad
- Acceso a información
- Equidad intergeneracional.
- Gestión integrada de los recursos hídrica (GIRH)
- Consentimiento previo, libre e informado
- Mecanismos judiciales y administrativos

Una GIRH es reconocida por algunos autores como un modelo apropiado para restablecer la gestión del agua, ya que tiene por objetivo encontrar un equilibrio entre consideraciones ambientales, sociales y económicas. Además, una GIRH requiere contar un amplio conocimiento de la disponibilidad y calidad del agua, de las condiciones en que se aprovecha y de la finalidad de cada cuenca. Una vez instituido lo anterior, se pueden identificar las acciones y medidas deseables y viables para cada cuenca en particular, por medio de instancias de coordinación y participación entre los actores involucrados (Cazalac, 2009).

En vista de los CpA, Chile se ha planteado el desafío de disminuir el impacto que genera o puede generar la sequía, con la finalidad de conseguir la sostenibilidad del recurso en el tiempo. La importancia de absorber los efectos generados por el cambio climático hace necesario tomar decisiones a corto, mediano y largo plazo. Es por esto que el Ministerio de Obras Públicas en conjunto con la Dirección General de Aguas han elaborado la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos

(ENRH), con la finalidad de generar una hoja de ruta clara en materia de gestión de los recursos hídricos de Chile con miras al 2025.

Para abordar estos acontecimientos, la ENRH identificó 5 desafíos para armonizar los distintos intereses y usos de los recursos hídricos:

1. Gestión Eficiente y Sustentable

Una gestión eficiente y sustentable debe inclinarse a evitar externalidades negativas que se puedan presentar por el uso inadecuado del agua. Además, la gestión sustentable debe considerar el aprovechamiento de los recursos existentes para satisfacer la demanda, asegurando el acceso al recurso hídrico por parte de la población y la satisfacción de todos los otros usos.

Para lograr una gestión eficiente y sustentable la ENRH propone:

- Establecer políticas que incentiven la gestión integrada de los recursos hídricos
- Brindar protección de la calidad de los recursos hídricos
- Brindar protección de la cantidad de los recursos hídricos

2. Mejorar la Institucionalidad

Definir una nueva Institucionalidad para la administración de los recursos hídricos es uno de los desafíos de mayor importancia, debido a que, los recursos hídricos deben contar con una institucionalidad que permita racionalizar y coordinar múltiples competencia de organismos del Estado. Actualmente, la Institucionalidad vigente en términos de recursos hídricos requiere de perfeccionamientos enfocados en las siguientes materias:

- Potenciar la institucionalidad pública y privada
- Aumentar las facultades de fiscalización y las sanciones
- Mejorar los sistemas de información
- Simplificar los procedimientos para la regularización de derechos de aprovechamiento
- Integrar la gestión de las aguas de las cuencas y asegurar una participación de todos los usuarios en el manejo de estas áreas

- Mejorar el marco normativo para evitar la existencia de especuladores
- Considerar los usos no extractivos

3. **Enfrentar la escasez**

Como consecuencia de los problemas de sequía que han debido enfrentar distintas zonas del país se requiere adoptar e implementar medidas no sólo para solucionar esta situación a corto plazo, sino también para abordarla de forma permanente. Este desafío propone diferentes tipos de infraestructuras de aprovechamiento para enfrentar de forma permanente la escasez hídrica, dentro de estas encontramos:

- Construcción de embalses
- Infiltración artificial de acuíferos
- Construcción de plantas desaladoras
- Otras fuentes no convencionales, como por ejemplo, ductos submarinos o terrestres, bombardeo de nubes, entre otros

4. **Equidad Social**

El verdadero reto del Estado en este desafío se encuadra en la necesidad de abastecer de agua potable a comunidades rurales semiconcentradas, en donde el porcentaje de cobertura asciende a un 2% aproximadamente, mejorando la calidad de vida de 540 comunidades, correspondiente a cerca de 195.000 habitantes.

5. **Ciudadanía informada**

Este desafío propuesto por la ENRH tiene como objetivo promover una cultura de conservación del agua, mediante diversos medios. Es por esto que ha concentrado los esfuerzos en el ámbito público y privado, para que así la población tome conciencia que cuidar el agua es tarea de todos.

Para poder conseguirlo la ENRH tiene como desafío promover una cultura de conservación del agua, a través de diversos medios, tales como, el desarrollo de campañas comunicacionales, programas escolares, eventos comunitarios, entre otros.

Enfocándonos en el desafío N°3 de la ENRH “Enfrentar la escasez”, podemos ver que la implementación de plantas desaladoras se vuelve una fuente de agua segura de agua que garantiza estabilidad en el suministro frente a la variabilidad que presentan las fuentes naturales y a la escasez de agua en las cuencas del norte del país.

Al respecto, Chile cuenta con una costa de 6.435 km de longitud y ejerce derechos exclusivos, reclamaciones de diversos grados y soberanía sobre su espacio marítimo, llamado Mar chileno, el cual comprende una superficie total de 4.095.823 km² distribuidos en cuatro zonas:

- Mar territorial: 120.827 km²
- Zona contigua: 131.669 km²
- Zona económica exclusiva: 2.681.989 km²
- Plataforma continental: 161.338 km²

Lo anterior convierte al mar chileno en un potencial aporte para el desarrollo del país a través de tecnologías como la **desalación**.

2.3. DESALACIÓN PARA ABORDAR LA ESCASEZ HÍDRICA

La desalación de agua de mar se ha convertido en una alternativa vital para la producción de agua dulce en diversos lugares del mundo, a medida que fuentes de agua dulce como ríos, lagos, pozos y manantiales se han agotado debido a la extracción excesiva y los problemas de escasez. A continuación se describen las principales características asociadas a la desalación a nivel mundial.

2.3.1. Desalación de agua de mar

La desalación consiste en el tratamiento de agua de mar a través de un proceso industrial, el cual permite extraer sal y los demás elementos contaminantes de esta, obteniendo agua dulce, la cual posteriormente debe ser tratada para garantizar su uso como agua potable. Esta tecnología garantiza estabilidad del suministro frente a la variabilidad que presentan actualmente las fuentes naturales y al grave problema de escasez hídrica.

A nivel mundial existen más de 17.000 plantas desaladoras, distribuidas en 174 países, las cuales al 2019 producían alrededor de 107 millones/m³/día, abasteciendo a más de 300 millones de personas en todo el mundo (World Bank Group, 2019).

En la actualidad muchos de estos países no podrían funcionar sin la producción de agua a través de la desalación. El Medio Oriente representa más de la mitad de la capacidad de desalación total a nivel mundial, mientras que Asia, Estados Unidos y América del Sur están aumentando considerablemente su capacidad de desalación. La figura 6 muestra la distribución de las plantas desaladoras por regiones a nivel mundial.

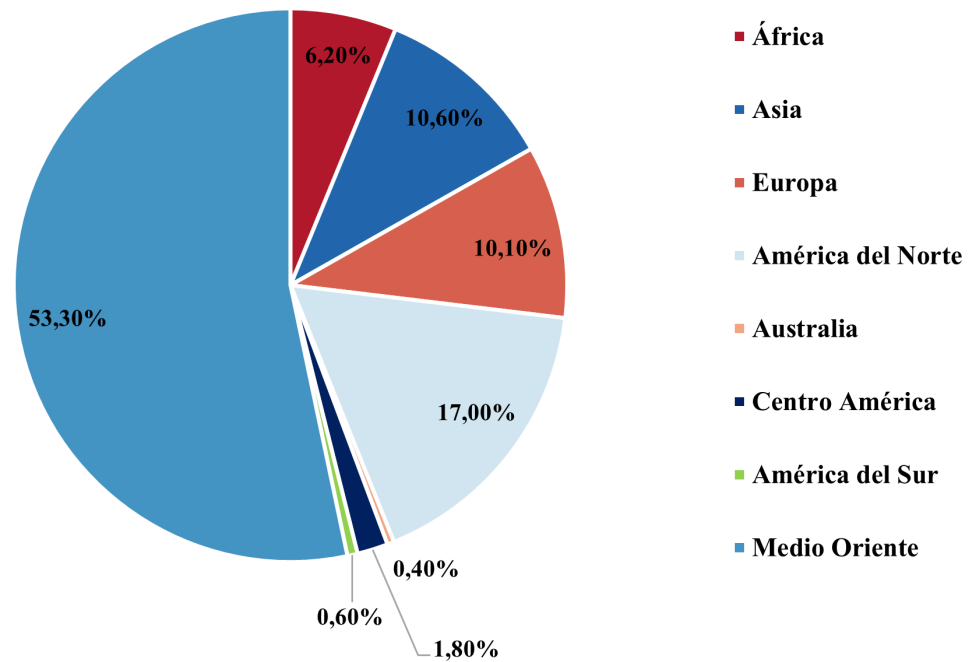


Figura 6: Distribución de Plantas Desaladoras por regiones a nivel mundial.

Fuente: Elaboración propia a partir de Abdil Latif Jameel (2020).

Principalmente son cinco los sistemas para lograr desalinizar agua a gran escala: **ósmosis inversa, destilación, congelación, evaporación relámpago y electro-diálisis** (Acosta, 2020). De estos sistemas, la desalación mediante **ósmosis inversa** es uno de los métodos más utilizados, con alrededor de un 70% de las plantas desaladoras existentes a nivel mundial utilizando esta tecnología (Martins, 2017). A continuación se describen las principales características de la ósmosis inversa.

2.3.2. Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa corresponde a una tecnología de tratamiento que permite remover iones y moléculas del agua. Consiste en la aplicación de una presión a una solución de manera de superar su presión osmótica², permitiendo el flujo de agua a través de una membrana semipermeable desde el lado con mayor concentración de sales hacia la zona de menor concentración. Si se aplica una presión mayor a la osmótica se incrementa el potencial químico de la solución más concentrada, ocasionando que el flujo del agua de esa zona vaya a la de menor concentración. La presión aplicada permite el paso de la solución de agua a través de membranas semipermeables, filtrando más del 99,5 % de las sales disueltas en el agua (Martins, 2017). Finalmente la concentración de las sales retenidas se descartan, mientras que el agua purificada permanece en el otro lado del sistema de ósmosis inversa.

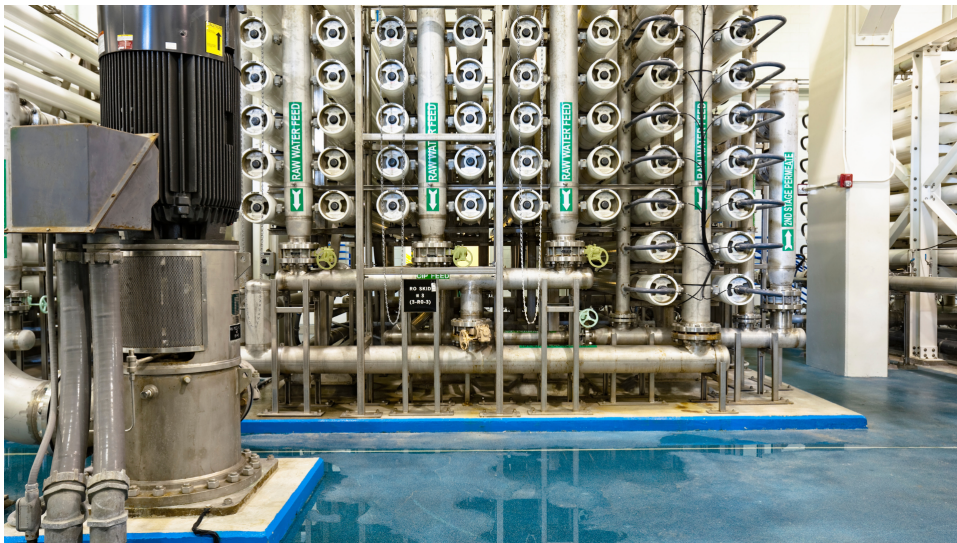


Figura 7: Planta desaladora de ósmosis inversa

Fuente: Canva (2021).

²Presión que se debe aplicar a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de una membrana semipermeable

Para entender con mayor claridad el proceso de ósmosis inversa, es importante reconocer el proceso de ósmosis natural. Consideremos dos soluciones con diferentes concentraciones de sales, separadas por una membrana semipermeable que sólo permite el paso del agua (ver Figura 8). El equilibrio termodinámico se alcanza cuando la concentración de sales sea la misma a ambos lados (migración del agua desde el lado de menor concentración al de mayor concentración de sales, u ósmosis), o hasta que la presión hidrostática³ a la que se somete el lado con mayor concentración de sales lo permita. Si la presión es aumentada en el lado de mayor concentración de sales, incluso puede revertir el flujo del agua hacia el lado de menor concentración, produciendo el fenómeno de ósmosis inversa.

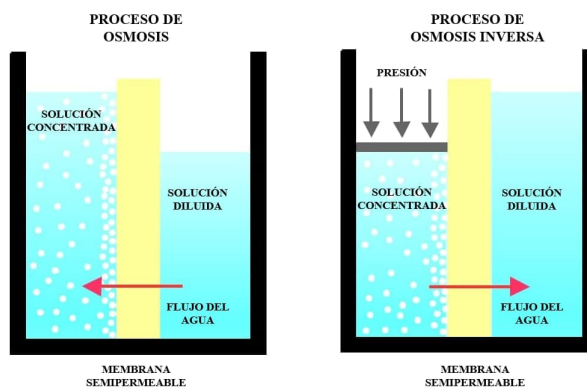


Figura 8: Demanda de agua por sectores productivos.

Fuente: Elaboración propia.

En la actualidad la **ósmosis inversa** se considera como el grado más avanzado de filtración que existe para purificar el agua sin la necesidad de añadir ninguna sustancia química. Las membranas semipermeables son las protagonistas en el proceso de ósmosis inversa, reteniendo sales y otras impurezas no deseadas en el agua filtrada (Anchudía et al., 2016). Además, se requiere de un equipo que suministre la energía necesaria para superar la presión osmótica, junto con elementos de regulación y de control que permita realizar la separación con el menor consumo energético y la mayor eficiencia en el proceso de remoción (Torres et al., 2018).

³Presión a la que se somete un cuerpo sumergido en un fluido, debido a la columna de líquido que tiene sobre él

De los elementos mencionados anteriormente, el fundamental en el proceso de ósmosis inversa es la membrana semipermeable, que debe reunir al menos 2 características técnicas importantes:

- Contar con una gran selectividad, que rechace el mayor porcentaje de sales.
- Poseer una alta productividad de agua filtrada.

Asimismo las membranas semipermeables deben ser capaces de resistir la presión a la que deben someterse (~ 70 bares para el agua de mar), y a su vez deben ser resistentes a los elementos químicos y/o contaminantes que se pueden encontrar en el agua.

Dentro de una planta desaladora que opera con tecnología de ósmosis inversa las unidades de proceso son las siguientes:

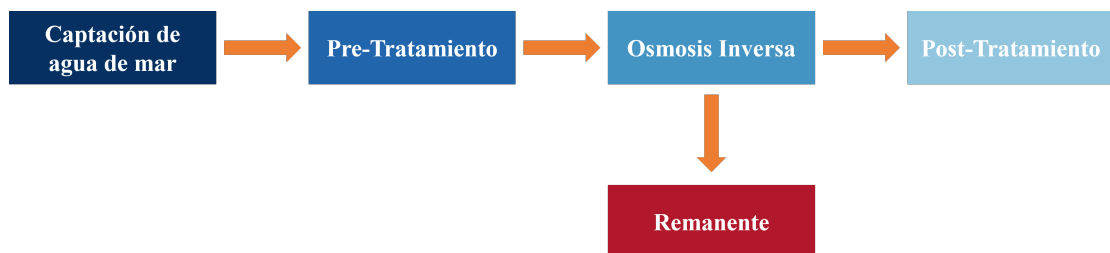


Figura 9: Procesos de una planta desaladora de ósmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

1. **Captación de agua de mar:** La captación se realiza desde el mar a través de una tubería que extrae el agua gran distancia y profundidad de la costa, la cual es utilizada para producir agua dulce. Dado que el agua de captación se obtiene de una fuente de agua superficial esta suele contener sólidos disueltos, sólidos en suspensión y coloides, materia orgánica natural y organismos acuáticos.
2. **Pre-Tratamiento:** La función de esta etapa es proteger las membranas de la ósmosis inversa del ensuciamiento, incrustaciones o daños, producidos por sólidos suspendidos y coloides,

precipitados de minerales, materia orgánica y organismos acuáticos contenidos en la fuente de agua.

El pre-tratamiento varía según la calidad y cantidad agua, y de la presencia o ausencia de varios constituyentes. Esta etapa puede ser tan simple como un conjunto de filtros de cartucho o bolsa para capturar la ocurrencia ocasional de sólidos finos, también se puede incorporar sistemas de coagulación, clarificación y filtración de múltiples etapas, ya sea por medios granulares y/o ultra-filtración de membrana.

3. **Ósmosis Inversa:** Proceso central que separa las sales del agua, produciendo tanto agua purificada como salmuera de descarte.
4. **Gestión de Descarga (Remanente):** Se proporciona una eliminación ambientalmente segura del agua de alta salinidad descartada en la ósmosis inversa, y otras corrientes secundarias generadas en la planta desaladora.
5. **Post-Tratamiento:** Esta etapa está diseñada para acondicionar el agua desalada con suplementos, minerales y desinfectantes, que tienen como objetivo prevenir la corrosión del sistema de suministro y distribución de agua dulce, y proteger la salud humana. En el caso de condicionar el agua desalada para agua potable, esta se debe ser remineralizada con aquellos elementos que el cuerpo humano necesita. Posteriormente, se agrega cloro y flúor, de acuerdo a lo establecido por las normativas vigentes.

Sin embargo el sistema de ósmosis inversa tiene ciertas restricciones. En particular, ciertas especies químicas no son removidas de forma efectiva por esta tecnología, incluyendo el arsenito AsO_3 , sílice neutra SiO_2 y el **ácido bórico** B(OH)_3 .

2.3.3. Plantas de ósmosis inversa a nivel internacional

Las siguientes imágenes comparan el estrés hídrico de los países (Figura 10), con la cantidad de plantas de desalación por ósmosis inversa a nivel mundial (Figura 11). La correlación espacial entre ambas imágenes refleja la importancia que tiene la transformación de agua de mar en agua potable para hacer frente a las demandas de comunidades isleñas y costeras, junto con los problemas de escasez hídrica presentes en zonas áridas.

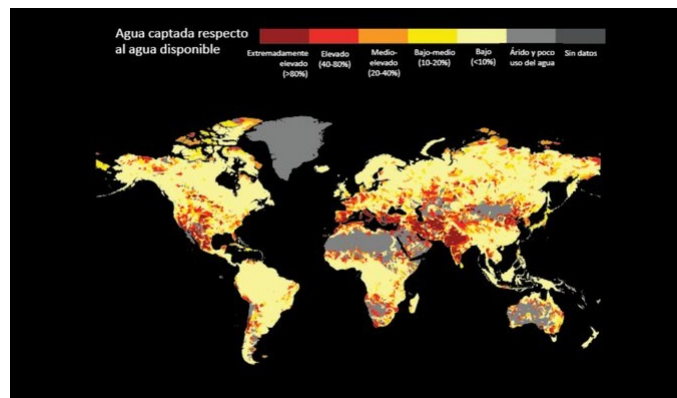


Figura 10: Estrés Hídrico a nivel Mundial.

Fuente: World Resources Institute (2019).

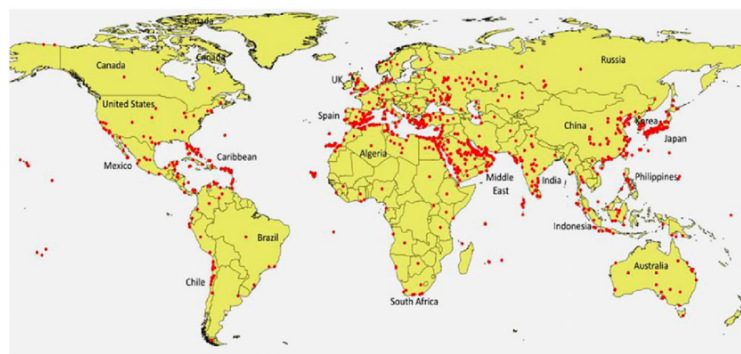


Figura 11: Distribución Mundial de principales Plantas de Ósmosis Inversa.

Fuente: Villacorte, 2015.

A continuación se describen las principales plantas de ósmosis inversa presentes en Medio Oriente y Europa, las cuales concentran más del 60 % de las plantas desaladoras presentes a nivel mundial (ver Figura 6).

■ **Medio Oriente:**

En la actualidad **Arabia Saudita** es un de los países pioneros en desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa en Medio Oriente. En este país cuatro de cada cinco litros que se consumen se obtiene mediante el uso de plantas desaladoras.

Emiratos Árabes Unidos es otro país precursor de la producción de agua potable en el continente a través de la tecnología de desalación de agua de mar, con un total de nueve plantas desaladoras al 2020, con una producción de 4,13 millones de metros cúbicos al día. El agua desalada en los Emiratos Árabes conforma el 30% del total de los recursos hídricos del Emirato. Sin embargo solo un 16 % de su producción se realiza por medio de la tecnología de ósmosis inversa, siendo protagonista la desalación térmica.

La planta desaladora Sorek es actualmente la más grande del mundo, se encuentra ubicada en Tel Aviv, **Isarel** y tiene una capacidad de tratamiento de agua de 624.000 m³/día. De los cuales 540.000 m³/día son utilizados para dar servicio al sistema de distribución de agua de Israel (Fundación Aquae, 2020). Israel cuenta también con la segunda planta desaladora mas grande del mundo, llamada IDAM ubicada en Ashod, con una capacidad de producción de 384.000 m³/día mediante sistema de ósmosis inversa (Fundación Aquae, 2020).

■ **Europa**

España por su parte en la actualidad produce cerca 3 millones de m³ al día de agua desalinizada, producidos en alrededor de 50 plantas. Además más del 80 % de dicha capacidad se produce en solo 50 plantas (Iagua, 2020).

En territorio europeo, la planta desaladora más grande se encuentra en Torrevieja, Alicante. Dada su reciente apertura, se está trabajando para mejorar su funcionamiento. Se espera conseguir una producción diaria de 240.000 m³ de agua (Fundación Aquae, 2020), la mitad de los cuales serán destinados al riego y la otra mitad para el abastecimiento de agua potable



Figura 12: Planta Desaladora Shuaqaiq3, Arabia Saudita.

Fuente: Almar Water Solutions.

en municipios de Murcia y de Alicante. También utiliza el proceso de ósmosis inversa.



Figura 13: Planta Desaladora IDAM Torrevieja, España.

Fuente: Acciona.

2.4. QUÍMICA DEL BORO EN EL AGUA

El boro es un elemento químico que pertenece al grupo IIIa del sistema periódico, simbolizado con la letra B. Generalmente se encuentra contenido en minerales de boro, boratos, asociados a fuentes termales vinculadas a la actividad volcánica.

Este elemento es común en el medio ambiente y se puede encontrar en cualquier agua natural, principalmente en forma de ácido bórico $B(OH)_3$. En el contexto del agua de mar el boro presenta concentraciones entre 4 y 5 mg/L, sin embargo, reducir la concentración mediante ósmosis inversa aún es un desafío, posicionando al boro como un contaminante de gran preocupación en el suministro de agua.

Por lo anterior, comprender el comportamiento químico del boro en agua, particularmente en presencia de otros compuestos, es fundamental para desarrollar estrategias que permitan su remoción de forma efectiva, particularmente en el contexto de desalinización de agua de mar.

2.4.1. Boro en la hidrosfera

El boro llega a la hidrosfera mediante el ciclo del agua y por procesos de erosión de rocas, desde la corteza oceánica por circulación hidrotermal y también procede de la precipitación atmosférica. Sin embargo su presencia en aguas salobres y subterráneas es variable debido a vertidos y fugas de tratamiento de aguas residuales o filtraciones.

En el medio acuático marino se encuentra como componente de dos moléculas hidratadas, en forma de ácido bórico $B(OH)_3$ como se observa en la Figura 14, y en forma tetrahidroxiborato $B(OH)_4^-$ como muestra la Figura 15.

La proporción de ambas formas, $B(OH)_3$ y $B(OH)_4^-$ depende del pH y la temperatura del agua de mar, y el equilibrio entre ambas concentraciones se encuentra en un rango de pH de 8,7-8,8: En medios más básicos predomina la forma tetraédrica, y en medios más ácidos su forma trigonal.

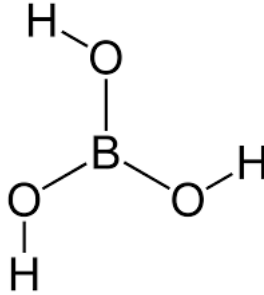


Figura 14: Diagrama de ácido bórico $B(OH)_3$.

Fuente: Wikipedia.

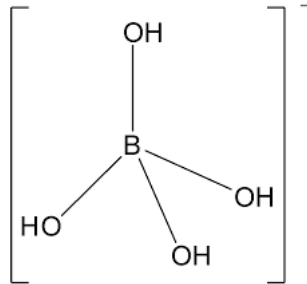


Figura 15: Diagrama del tetrahidroxiborato $B(OH)_4^-$.

Fuente: Wikipedia.

Es importante mencionar que debido al gran tiempo de residencia del boro en el agua de mar, las concentraciones de ambas formas no varían significativamente en los océanos.

2.4.2. Distribución del boro en Chile

A nivel nacional el boro se manifiesta en abundancia en ríos y agua subterráneas del norte, desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Coquimbo. También se encuentra presente en el agua de mar, esencialmente en zonas cercanas a las desembocaduras de ríos.

Según el Departamento de Salud Ambiental las concentraciones del boro en aguas naturales en Chile se presentan de la siguiente manera:

- **Zona Norte** entre 1 y 78 mg/L.
- Resto del país mayor a 1 mg/L.
- Agua de mar entre 4 y 5 mg/L.

En la figura 16 se puede observar las concentraciones de boro en algunos ríos principales de la zona norte del país.



Figura 16: Distribución del boro en la zona Norte.

Fuente: Elaboración propia a partir de Fundación para la Innovación Agraria (Ministerio de Agricultura, 2009).

2.4.3. Toxicidad del boro

Existe una tendencia del boro a acumularse en los tejidos animales y vegetales, que constituye un riesgo potencial para la salud de aquellos que consuman alimentos o aguas con elevados contenidos de boro.

La toxicología general del boro es poco perceptible: algunos derivados pueden ser irritantes especialmente para los ojos y mucosas gástricas, sin embargo, los boratos no son ni mutagénicos ni carcinógenos. Existen dos razones fundamental para controlar y limitar la concentración del boro en el agua, las cuales se describen a continuación:

1. Según el Instituto Nacional de de Salud de Estados Unidos, la toxicidad del boro puede causar erupciones en la piel, náuseas, vómito, diarrea, dolores abdominales y de cabeza. En casos graves la intoxicación por boro puede causar la muerte, habitualmente sobreviene en cinco días por colapso cardiovascular.
2. Una presencia excesiva de boro en el agua de riego puede causar daños en cosechas y plantas. A pesar de que el boro es un elemento vital para el crecimiento de las plantas y se suministra por medio de los fertilizantes, puede resultar perjudicial en concentraciones mayores.

La Tabla 2 muestra las distintas clasificaciones, en cuanto a la tolerancia de las plantas respecto al boro, distinguen los cultivos en tres clases según la clasificación de boro permisible

| Clasificación | Sensible | Semi-tolerante | Tolerante |
|------------------------------|---|---|--|
| Concentración de boro | 0,30-1,00 mg/L | 1,00-2,05 mg/L | 2,05-4,00 mg/L |
| Especies | Manzano Cerezo Limón Naranja Peral Melocotonero Pomelo Palto Albaricoquero Higuera Vid Ciruelo Judías | Cebada Alfalfa Repollo Zanahoria Lechuga Cebolla Papa Calabaza Espinaca Tabaco Olivo Rosa Tomate Trigo | Espárrago Algodón Pepino Gladiolo Sésamo Tulipán Remolacha Habrá Pasto Menta Centeno |

Tabla 2: Clasificación de cultivos según su tolerancia al boro.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Muñoz et al., 2020).

En Chile no se encuentra regulada la concentración límite de boro en la normativa aplicable a agua de consumo humano. Sin embargo, el boro se encuentra regulado para aguas de riego y otros usos a través de la Norma Chilena NCh 1333, con una concentración límite de 0,75 mg/L.

Es importante mencionar que la Organización Mundial de la Salud (OMS) regula la concentración boro para consumo humano con un límite de 0,5 mg/L, la Comunidad Económica Europea establece un límite de 1 mg/L, mientras que Canadá regula la concentración de boro con un valor ampliamente superior, con un límite de 5 mg/L. La OMS también ha establecido la ingesta tolerable (IT) de boro, planteando las siguientes recomendaciones respecto a la normativa referente a la ingesta son:

- Los valores guía del agua y de los alimentos deben basarse en la IT de 0,4 mg/Kg de peso corporal al día.
- La IT se debe aplicar considerando que el boro presenta algunos efectos beneficiosos para la salud humana.
- Se debe considerar los efectos beneficiosos del boro como micro-nutriente para las plantas.
- Se deben evitar suplementos alimenticios que superen la IT.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El diseño de investigación de esta memoria comprende la revisión de literatura y análisis crítico de antecedentes recopilados. Las actividades que permitieron desarrollar esta memoria corresponden a estudio de literatura, el cual permite realizar el cruce de información de tecnologías de remoción de boro, con la finalidad de realizar propuestas de mejora sobre las tecnologías actuales de desalación. Además, se realizaron entrevistas a actores relevantes de la industria, permitiendo clasificar y levantar las plantas desaladoras que existen actualmente en Chile.

3.1. ETAPAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación se lleva a cabo en cuatro etapas, como se muestra en la Figura 17. La primera etapa consiste en la recopilación de antecedentes, desarrollada mediante dos actividades centrales, estudio de literatura y realización de entrevistas a actores relevantes en el área de desalación a nivel nacional con la finalidad de obtener información acerca las distintas tecnologías de remoción de ácido bórico que se utilizan actualmente, además de empresas que actualmente cuentan con plantas desaladoras en Chile.

La segunda etapa consiste en la clasificación de las tecnologías, la cual se llevará a cabo realizando un diagnóstico de los antecedentes obtenidos en la etapa anterior referente a las tecnologías de remoción de ácido bórico, que nos permitirá a realizar distintas propuestas de mejoras a las tecnologías existentes.

Por otra parte, la tercera etapa de investigación consiste en un levantamiento de antecedentes mediante un sistema de información geográfica el cual nos permitirá clasificar por macrozonas territoriales y oceanográficas las plantas desaladoras que operan en nuestro país.

Una vez realizadas las etapas anteriores se procederá al diagnóstico de propuestas de mejoras en las diferentes tecnologías de remoción de ácido bórico existentes.

| Etapas | | Actividades | | Objetivos Específicos | |
|-----------|-----------------------------------|---|--|---|--|
| Etapa I | Recopilación de antecedentes | Estudio de literatura | Entrevistas a actores relevantes en la industria | Tecnologías de remoción de ácido bórico | Procesos de operación y gestión de las plantas desaladoras |
| Etapa II | Clasificación de tecnologías | Estudio de literatura | | Clasificación de las tecnologías según caract. hidráulicas y químicas | |
| Etapa III | Levantamiento plantas desaladoras | Clasificación de las plantas desaladoras | Levantamiento en QGIS | Clasificación por macrozonas de las plantas desaladoras existentes en Chile | |
| Etapa IV | Análisis de la información | Cruce de información de las tecnologías disponibles | | Proponer mejoras a las tecnologías de remoción presentes a nivel nacional | |

Figura 17: Etapas de investigación de esta memoria.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Etapa I: Recopilación de antecedentes

La primera etapa definida en esta metodología consiste en la recopilación de antecedentes sobre las tecnologías actuales para remover el ácido bórico del agua de mar y de empresas que cuenten con plantas desaladoras en Chile, en el contexto de plantas de ósmosis inversa, mediante entrevistas.

1. Entrevista a empresas de plantas desaladoras:

En una segunda instancia se realizan entrevistas con la finalidad de obtener información acerca del funcionamiento de las plantas desaladoras que existen actualmente en Chile. Esta técnica nos permite conocer de forma más amplia una gran cantidad de aspectos y detalles que se desconocen en la literatura, lo cual permite cerrar las brechas de información.

Las entrevistas van dirigidas a actores relevantes de la industria, quienes nos podrán entregar aquella información que no es posible obtener de la literatura, las principales empresas que serán contactadas son:

- Atacama Sur S.P.A, empresa que opera en el sector de la minería y metales.
- Compañía Contractual Minera Candelaria, empresa canadiense de minería de metales básicos.
- Minera Escondida Ltda, empresa del sector de la minería dedicada a la extracción de cobre.
- Minera Pampa Camarones S.P.A, empresa del sector de la minería dedicada a la extracción de cobre.
- Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A.
- Aguas del Antiplano S.A, empresa sanitaria.
- Aguas Antofagasta S.A, empresa sanitaria.
- Ministerio de Obras Públicas
- Subpesca, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.

Las entrevistas se realizarán a través de videoconferencias o llamados telefónicos, corresponden al tipo semi-estructurada, es decir, existe una guía de preguntas previamente diseñadas, sin embargo, el entrevistador puede realizar otras que no se encuentren complementadas inicialmente, dado a que una respuesta puede dar origen a una adicional. A continuación en la tabla 3 se muestran las preguntas tipos que se aplicarán a las distintas empresas.

| Pregunta | Aspecto |
|--|-----------------------|
| ¿Cómo adquieren la energía eléctrica para el funcionamiento de las plantas | Energético |
| ¿Cuentan con sus propios sistemas de generación de energía | Energético |
| ¿Cuánta agua producen y en cuánto esta evaluada la producción de 1m ³ de agua desalada? | Producción |
| ¿Cuál es el proceso más relevante en cuanto a costos? | Producción |
| ¿Qué monitoreo se realiza al emisario de la salmuera? | Ambiental |
| ¿Dónde se realiza la descarga de salmuera, a qué profundidad y distancia? | Ambiental |
| ¿Cuáles son los planes de seguimiento en contexto de la Resolución de Calificación Ambiental? | Ambiental |
| ¿Los estanques de agua dulce son abiertos o cerrados? | Operación |
| ¿Qué desafíos buscan como empresa en términos químicos, operacionales y tecnológicos? | Operación/Tecnológico |
| Enfocándonos en la triple línea de fondo de sustentabilidad, ¿cuáles son sus desafíos? | Sustentabilidad |

Tabla 3: Preguntas y aspectos de las entrevistas.

Fuente: Elaboración propia.

2. Estudio de literatura:

En primer lugar se realizó un levantamiento de información acerca de las tecnologías actuales para la remoción del ácido bórico del agua de mar. Es importante mencionar que las fuentes estudiadas en esta etapa incluyen:

- Documentos oficiales del Gobierno de Chile.
- Documentos oficiales del Servicio de Impacto Ambiental.
- Documentos oficiales de Organizaciones Gubernamentales.
- Publicaciones científicas.
- Documentos técnicos de empresas de la industria.

3.1.2. Etapa II: Levantamiento mediante sistema de información geográfica

El tercer objetivo específico corresponde a la caracterización de las plantas desaladoras existentes en nuestro país por macrozonas territoriales y oceanográficas. Para poder desarrollarlo se proponen las siguientes actividades:

1. Levantamiento de distintos antecedentes de cada planta desaladora presente en Chile:

- Macrozona
- Región
- Coordenadas geográficas
- Compañía
- Inversión
- Tipo de desalación
- Litros de aguas producidos por segundo
- Uso del agua producida

- Consumo energético
 - Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA)
2. Con la finalidad de poder analizar las plantas desaladoras presentes en Chile, se realizarán las siguientes comparaciones, mediante el uso de gráficos:
- Número de plantas desaladoras por macrozonas territoriales
 - Uso de agua desalada a nivel Nacional
 - Número de plantas por macrozona y uso
 - Uso de agua desalada por regiones
 - Tipología de ingreso según el Servicio de Evaluación Ambiental
3. Luego para realizar el levantamiento geográfico se procede a la utilización del software QGIS, programa que corresponde a un sistema de información geográfico de software libre y código abierto y compatible con distintos sistemas operativos.

3.1.3. Etapa III: Clasificación de las tecnologías

Con el objetivo de clasificar las tecnologías de remoción de ácido bórico, basándonos en sus características hidráulicas y químicas, se realiza estudio de literatura científica el cual nos permitirá identificar las tecnologías más eficientes para remover ácido bórico del agua de mar.

3.1.4. Etapa IV: Análisis de información

Una vez clasificadas las plantas desaladoras, conocidos los problemas referentes a las tecnologías de remoción de ácido bórico y el funcionamiento de las plantas entrevistadas se procederá a realizar un cruce de información con todos los antecedentes recopilados en las etapas anteriores, con el objetivo de proponer mejoras a las tecnologías disponibles para la remoción de ácido bórico en el agua.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de esta memoria y su respectivo análisis. Se detalla el levantamiento de las plantas desaladoras existentes en Chile, con su respectiva macrozonificación territorial, los resultados obtenidos de las entrevistas realizadas a cuatro empresas que actualmente cuentan con plantas desaladoras mediante ósmosis inversa en nuestro país y finalmente se presentan y analizan diversas tecnologías que actualmente permiten la remoción del ácido bórico en el agua de mar.

4.1. PLANTAS DESALADORAS A NIVEL NACIONAL

Chile posee características únicas que lo convierten en el país con mayor capacidad de desalación de agua de mar a nivel latinoamericano. Esta tecnología puede ser una solución a los problemas de escasez que atraviesan algunas zonas del país, sin embargo, debe ser de la mano de una buena gestión del recurso hídrico.

El Anexo 4 muestra el levantamiento de las plantas desaladoras existentes y proyectadas en nuestro país. Este catastro se llevó a cabo basado en información obtenida del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), documentación oficial del Gobierno de Chile, publicaciones oficiales de empresas mineras, entre otros.

El estudio realizado mediante el registro SEA permitió conocer la resolución de calificación ambiental (RCA) de cada proyecto que ingresó el Servicio de Evaluación Ambiental, la cual establece si el proyecto ha sido aprobado, rechazado o bien aprobado con condiciones. La RCA contiene aquellas resoluciones que califiquen favorablemente un Estudio o Declaración de Impacto Ambiental, así como también las modificaciones y aclaraciones de que sean objeto, identificando el proyecto, su localización geográfica, fecha de ingreso, fecha de resolución, el titular, el objetivo del proyecto y su estado; de acuerdo a lo estipulado en el artículo 25 de la Ley 19.300, Sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

Asimismo el catastro permite clasificar el uso de agua desalada a nivel nacional, por macrozona y regiones, la cantidad de plantas que se encuentran operativas actualmente en nuestro país y también aquellas que se encuentran en construcción. Además, nos permite contrastar la cantidad de agua producida por macrozona, nivel regional, y sector productivo.

El análisis de los resultados obtenidos (ver Anexo 5) permite obtener las siguientes comparaciones en términos de macrozonas, uso del agua desalada a nivel nacional y desglosado por regiones, y las principales tipologías utilizadas en el SEA:

1. Plantas desaladoras por macrozonas territoriales

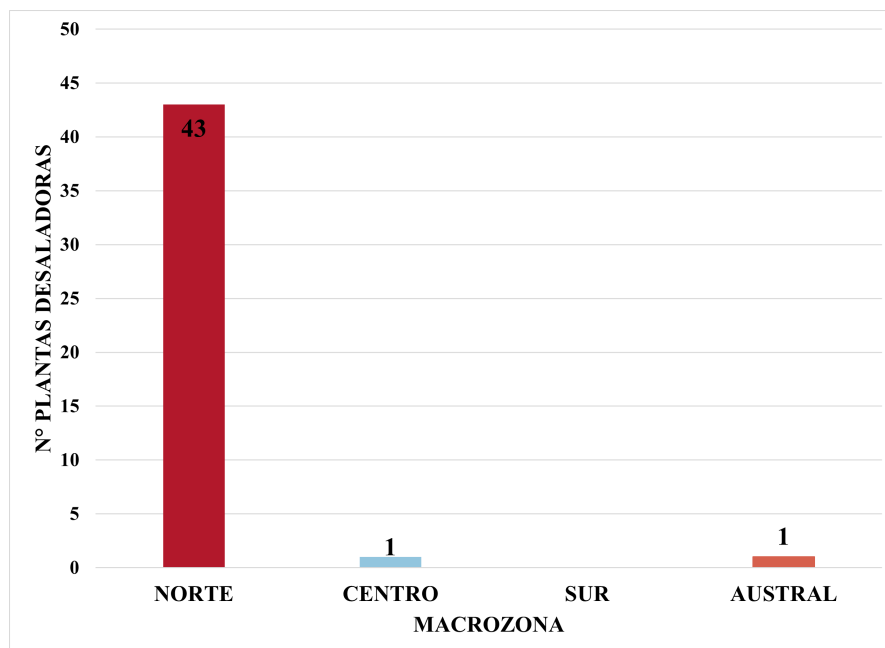


Figura 18: Cantidad de plantas desaladoras por macrozona.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 18 muestra el número de plantas desaladoras existentes por macrozona, con la finalidad de poder comparar la producción de agua desalada con la cantidad de recursos hídricos disponibles. El catastro realizado permite cifrar el número actual de plantas desala-

doras en 45, las cuales se concentran en las macrozonas Norte y Centro.

Es en la macrozona Norte donde existen la mayor cantidad de plantas desaladoras, representando un 95,6% del total de plantas de Chile, ligado principalmente a la minería y a la producción de agua destinada a procesos productivos pesqueros. En esta macrozona prevalecen los problemas de escasez, lo cual se puede reflejar directamente en su escorrentía per cápita, de tan solo 510 m³/persona/año (DGA, 2016), valor por debajo de la escorrentía total media a nivel nacional (51.218 m³/persona/año).

La macrozona Centro cuenta con 1 planta desaladora, correspondiente al 2,2% de las plantas presentes en el territorio chileno, cuyo uso es destinado a la producción de agua para agricultura.

La macrozona Austral presenta la mayor escorrentía per cápita del país, alcanzando los 2.340.277 m³/persona/año. Si bien este valor es ampliamente superior al umbral que define el Banco Mundial para alcanzar el desarrollo sostenible (2.000 m³/persona), algunos lugares de la región de Aysén presentan importantes déficits hídricos durante el verano. Por lo tanto, la implementación de esta planta permite asegurar el suministro de agua potable en la zona.

El levantamiento que se realizó permitió identificar 5 regiones del país que cuentan con plantas desaladoras, aportando al país con agua producida para llevar a cabo diferentes procesos. La región de Tarapaca produce una cantidad de 1504,96 (L/s), la región de Antofagasta 2865 (L/s), la región de Coquimbo aporta una producción de agua desalada de 401,18 (L/s), mientras que la región de Aysén produce solo 2,7 (L/s). Si bien la región de Valparaíso cuenta con una planta desaladora, se desconoce su capacidad de producción.

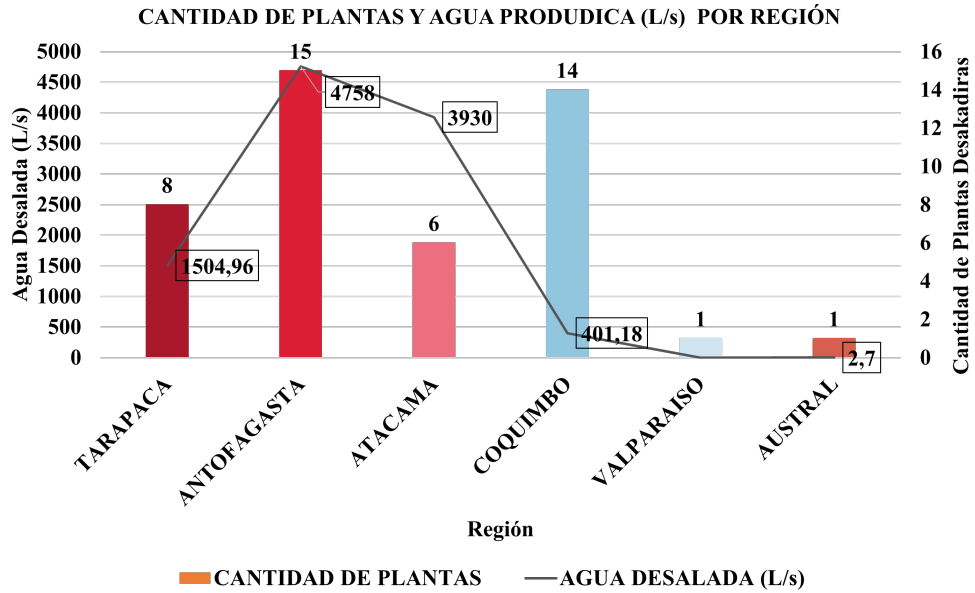


Figura 19: Cantidad plantas y agua producida por regiones.

Fuente: Elaboración propia.

2. Uso de agua desalada a nivel nacional

La Figura 20 muestra de forma gráfica la cantidad de plantas desaladoras existentes en Chile, según el uso del agua producida por cada una de estas plantas.

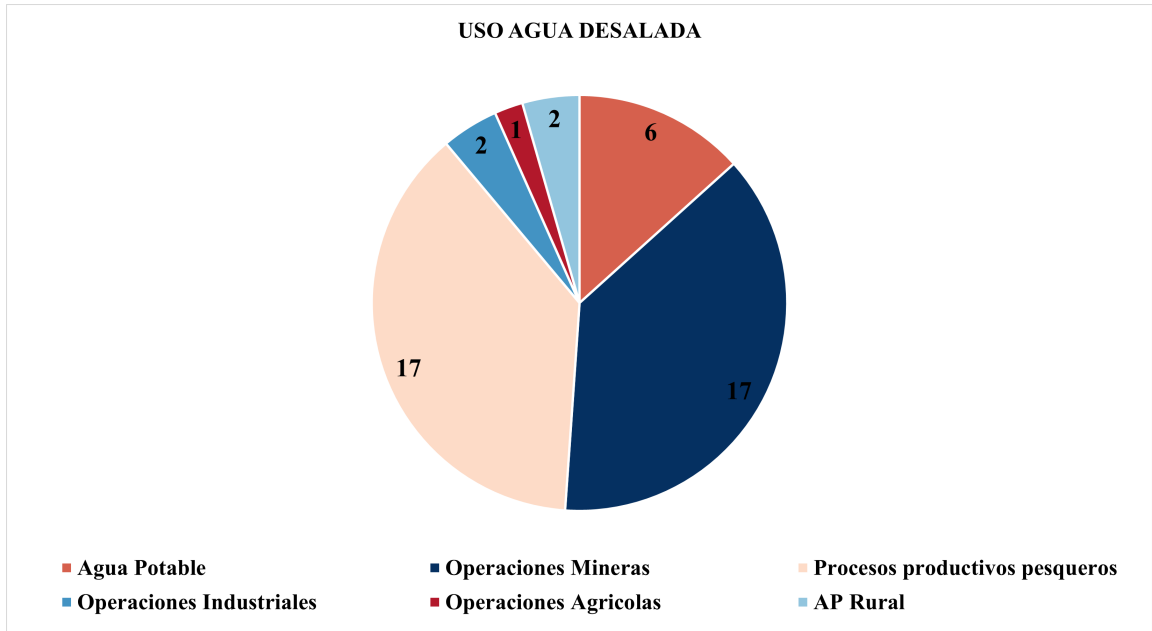


Figura 20: Uso agua desalada a nivel Nacional.

Fuente: Elaboración propia.

El sector de la minería junto con el sector pesquero representan el mayor uso de agua desalada en nuestro país, con un 38 % en cada sector, equivalente a 17 plantas. Es importante mencionar que si bien ambos sectores productivos cuentan con la misma cantidad de plantas desaladoras, el sector de la minería tiene una capacidad de desalación 45 veces mayor que el sector pesquero. La implementación de la desalación en la minería se debe al gran desarrollo del sector en los últimos años, sumado a los graves problemas de escasez que enfrenta la macrozona Norte.

En tanto, la producción de agua potable por medio de la desalación de agua de mar corresponde a un 13 % del total de agua desalada producida en Chile. La mayor parte de esta desalación se produce por empresas Sanitarias de la macrozona Norte, específicamente en la región de Tarapacá, Antofagasta y Atacama.

Por otra parte, los sectores productivos de la industria y agricultura cuentan únicamente con dos y una planta desaladora respectivamente. La empresa Guacolda Energía S.A y Capstone Mining Chile S.A son quienes producen agua de calidad industrial en la región de Atacama. En la macrozona Centro, región de Valparaíso, específicamente en la Isla de Pascua existe la única planta desaladora cuya agua producida es destinada a riego.

La Figura 21 muestra el número de plantas existentes según macrozona y uso del recurso.

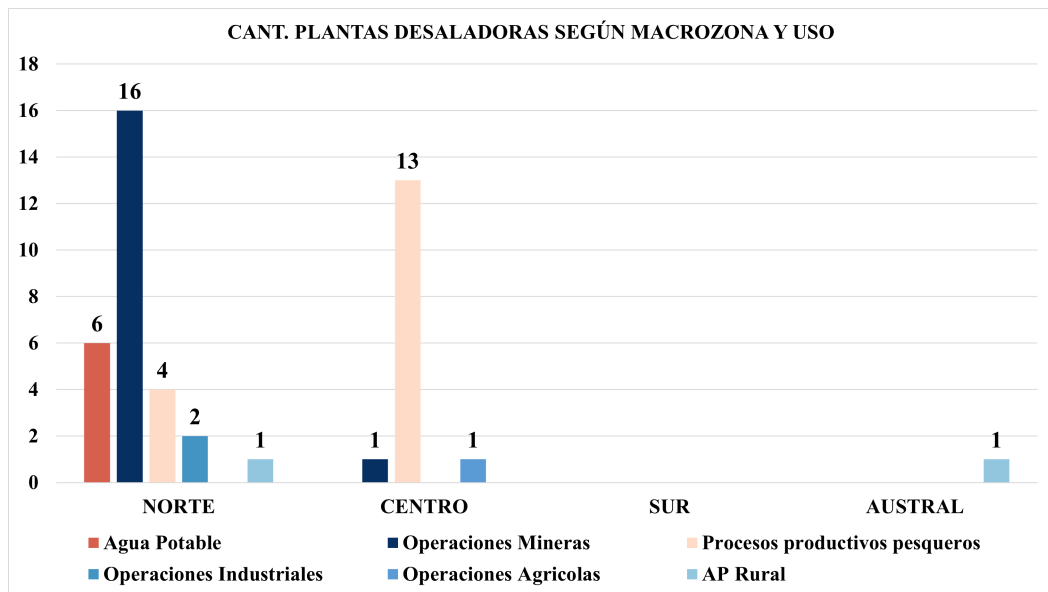


Figura 21: Cantidad de Plantas Desaladoras según macrozona y uso del agua desalada.

Fuente: Elaboración propia.

3. Uso de agua desalada por regiones

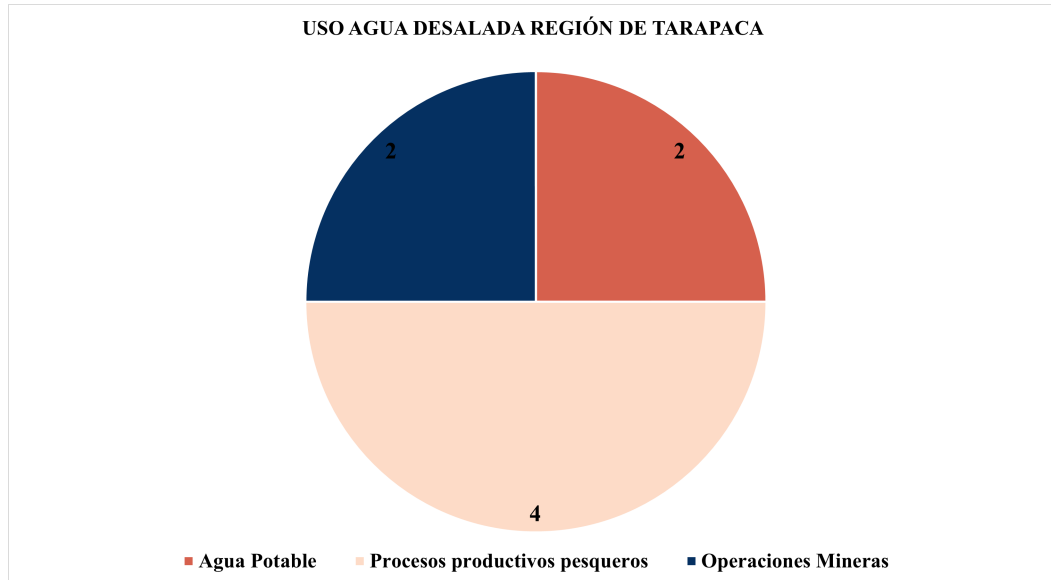


Figura 22: Uso del agua desalada en la Región de Tarapacá.

Fuente: Elaboración propia a partir de Anexo 2.

Actualmente existen 8 plantas desaladoras en la región de Tarapacá de estas seis se encuentran operativas (Bahía Caldera, Chanavaya, Chipana, Pisagua, San Marcos y SCM Bullmine), mientras que las dos restantes se encuentran en etapa de construcción (Quebrada Blanca Fase 2 y Río Seco). Del total, 2 plantas destinan su uso para proveer de agua potable al sector de Calera y Pisagua, plantas que en conjunto producen cerca de 500 L/s.

Además el Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala (INDESPA) abastece de agua desalada para la realización de procesos productivos pesqueros en distintas caletas, como lo son: Caleta Chanavaya, Chipana, Pisagua y Río Seco, permitiendo así un suministro seguro del elemento en zonas con escasez hídrica. El Anexo 3 muestra la ubicación de las plantas ubicadas en la región de Tarapacá, representadas por círculos naranja las planta que se encuentran operando y por cuadrados azules aquellas que se encuentran en proceso de construcción.

A nivel regional, 2 de las 8 plantas desaladoras producen agua con calidad de agua potable, y se encuentran a cargo de las empresas Seven Seas Water y Aguas Antiplano, las cuales en conjunto proveen cerca de 500 litros desalada por segundo.

El 25% de las plantas que cuenta la región de Tarapacá destinan su uso a un agua para el desarrollo de operaciones mineras, produciendo alrededor de 1000 l/s, permitiendo así disminuir la explotación de los recursos hídricos subterráneos.

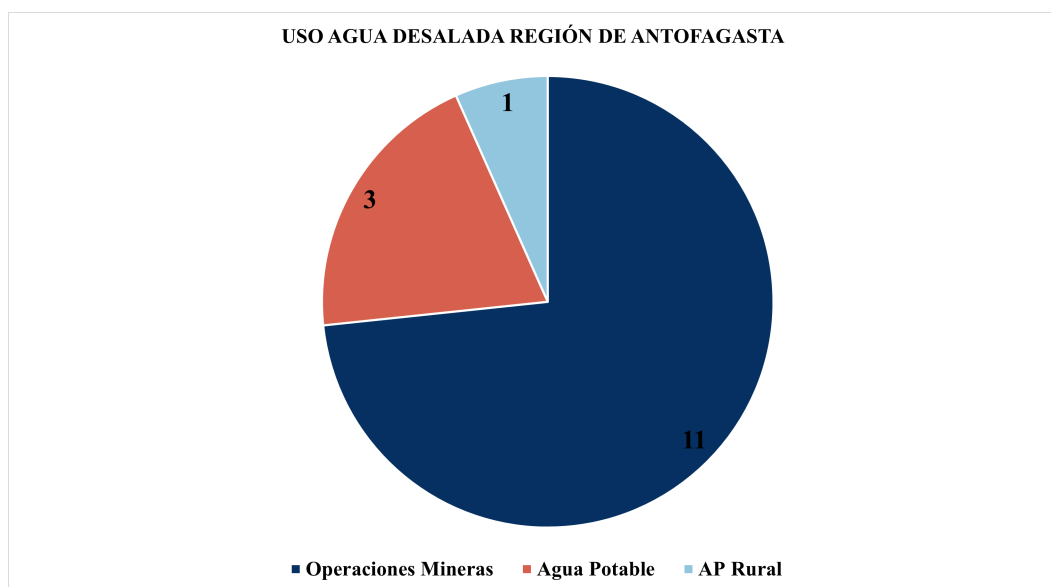


Figura 23: Uso del agua desalada en la Región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de Anexo 2.

En la región de Antofagasta la producción de agua desalada se encuentra fuertemente destinada al uso en operaciones mineras, representado por un 73% del total regional, equivalente a 11 plantas desaladoras. Por otra parte, 4 plantas producen agua potable, de las cuales 2 corresponden a las plantas desaladoras de la empresa Aguas Antofagasta, quienes abastecen a más del 80% de las poblaciones de Antofagasta y al 100% de Mejillones y Tocopilla, asegurando la estabilidad de un recurso que en el último tiempo ha sido escaso en la macrozona Norte. Para visualizar en mapa las plantas que se encuentran operativas en la región, ver Anexo 4.

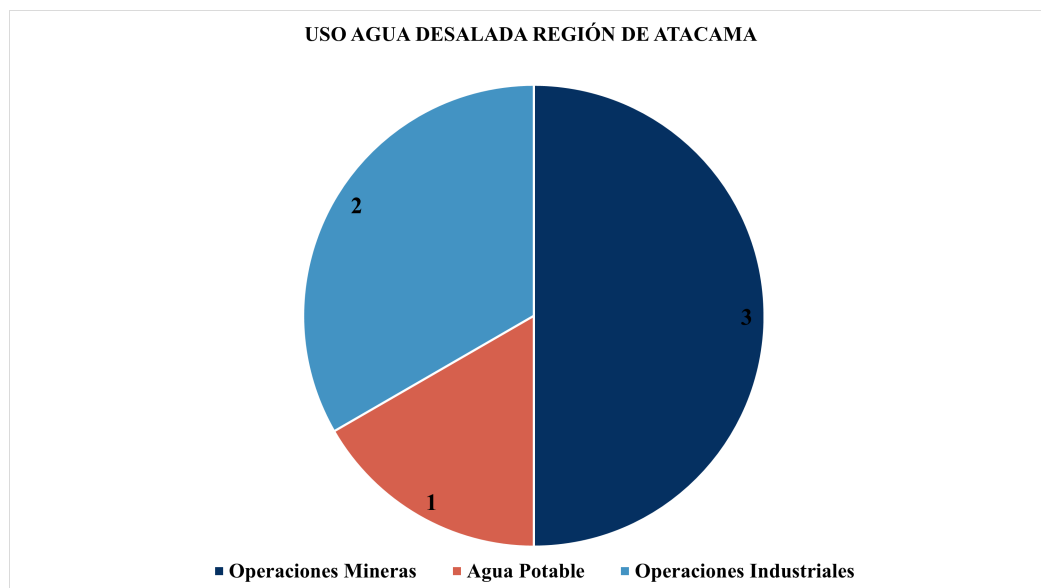


Figura 24: Uso del agua desalada en la Región de Atacama.

Fuente: Elaboración propia a partir de Anexo 2.

La región de Atacama produce actualmente más de 1200 l/s de agua desalada destinada a agua potable, que corresponde a dos plantas, una de esta destina el 100 % de su producción a agua potable, mientras que la planta Cerro Negro comparte su producción entre operaciones de la Minera Caserones y suministro de agua potable a las comunas de Caldera y Mal Paso. Además esta región es la única a nivel nacional que produce agua de calidad industrial, una de estas para generación de energía y otra para las operaciones del Proyecto Dominga.

Debido a la importancia de la minería en la macrozona Norte, Atacama también cuenta con plantas desaladoras que producen agua desalada destinada a operaciones mineras, las cuales producen más de 1400 l/s.

El Anexo 5 muestra la ubicación de las plantas que actualmente operan en la región de Atacama.

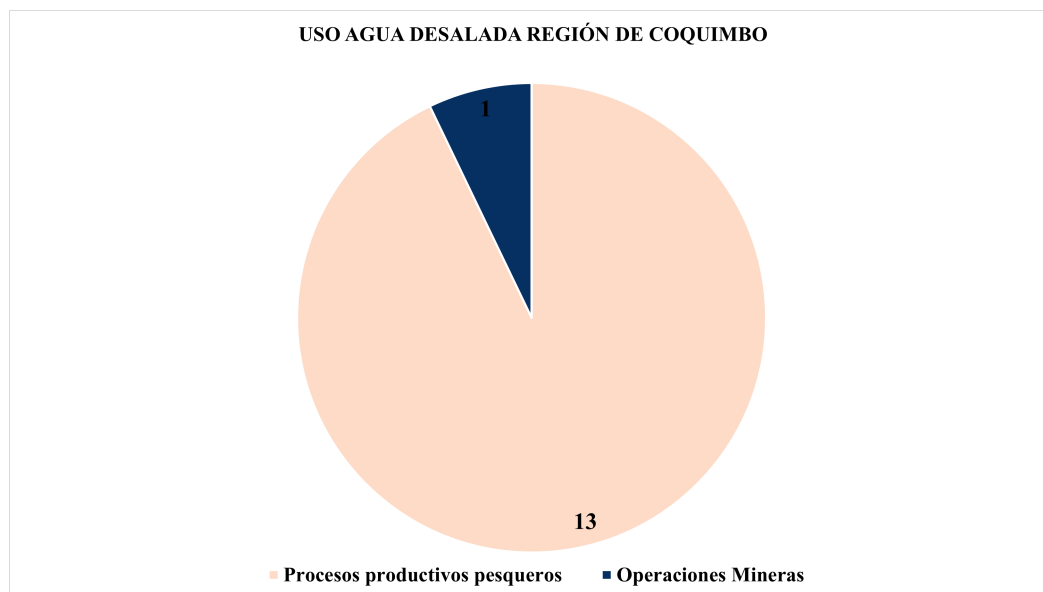


Figura 25: Uso del agua desalada en la Región de Coquimbo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Anexo 2.

En Coquimbo la implementación de la tecnología de desalación se encuentra ligada principalmente a la producción de agua dulce para diversos procesos productivos (93 %), dado a que esta región esta agotando cada vez más los recursos de agua desalada disponibles, enfrentándose en un futuro cercano a graves problemas de escasez hídrica.. Es por esto que INDESPA ha desarrollado cerca de 13 plantas que permiten abastecer de agua potable a zonas rurales como, Chigualoco, Maitencillo, Totoralillo, entre otras. El anexo 6 muestra la ubicación de las plantas desaladoras, concentradas principalmente en distintas caletas de la región.

Por otra parte, la región de Valparaíso, correspondiente a la macrozona Centro, cuenta con la primera planta desaladora de la región, ubicada en la Isla de Pascua. Esta planta funciona con energía solar y su objetivo principal es la Agricultura en la Isla. Esta planta fue desarrollada por Fundación Chile junto al apoyo de Corporación Nacional Forestal (CONAF). En el Anexo 7 se puede ver la ubicación de la primera planta desaladora de la región de Valparaíso.

Además, según lo mencionado anteriormente la macrozona Austral cuenta con una planta desaladora, ubicada en la región de Aysen en Islas Huichas, su ubicación puede apreciarse en el Anexo 10.

4. Servicio de Evaluación Ambiental

De las 45 plantas levantadas en esta investigación, 19 fueron registradas en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Este corresponde a un organismo público funcionalmente descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio, el cual fue creado por la Ley N°20.417 del 2010, que modificó la Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

La función principal del SEA es uniformar los criterios, requisitos, condiciones, antecedentes, certificados, trámites, exigencias técnicas y procedimientos de carácter ambiental que establezcan los ministerios y demás organismos del Estado.

Los proyectos que se sometan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) debe ser presentando mediante una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), a excepción que dicho proyecto genere o presente alguno de los siguientes efectos, características o circunstancias contemplados en el artículo 11 de la Ley, caso en el cual deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

En este proceso participan diversos sectores productivos, los cuales deben ingresar según la tipología a la que pertenezca el proyecto. La Figura 26 muestra las distintas tipologías con la cual ingresaron las diversas empresas al SEIA.

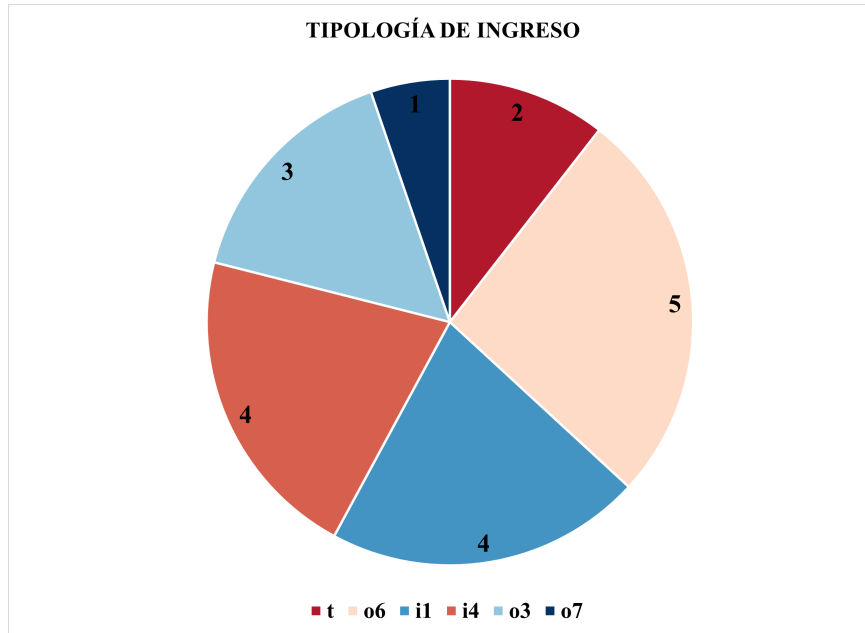


Figura 26: Tipología de ingreso SEA.

Fuente: Elaboración propia a partir de Anexo 2.

De las 19 plantas que ingresaron al SEA, un 21 % ingresó mediante la tipología **i**, la cual corresponde a **Proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbón, petróleo y gas, comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos estériles**, específicamente clasificado en la tipología **i1 (Extracción de pozos o canteras)**. Otro 21 % ingreso a través de la tipología **i4 (Proyecto de desarrollo minero sobre 5000 tons/mensuales)**.

Por otra parte, nueve plantas ingresaron al sistema por medio de la tipología **o**, correspondiente a **Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de agua o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos**, tres de estas (16 %) entraron mediante la tipología **o3 (Sistemas de agua potable que comprendan obras que capten y conduzcan agua desde el lugar de captación hasta su entrega en el inmueble del usuario).**

Otros cinco proyectos (26 %) ingresaron como tipología **o6 (Emisarios submarinos)**, mientras que la restante, correspondiente a un 5 % del total entro por medio de la tipología **o7 (Sistemas de tratamiento y/o disposición de residuos industriales líquidos, que contemplen dentro de sus instalaciones lagunas de estabilización u otros depósitos de los efluentes sin tratar y tratados).**

Finalmente, dos proyectos (11 %) ingresaron al SEA de manera voluntaria por medio de la tipología **t (ingreso voluntario).**

4.2. ENTREVISTA A EMPRESAS DE PLANTAS DESALADORAS

Las entrevistas realizadas tienen como finalidad obtener información acerca del función de las plantas desaladoras que operan actualmente en nuestro país. Algunas de estas fueron realizadas mediante encuestas y otras a través de vídeo-conferencias. En la Tabla 4 podemos observar un resumen de los resultados obtenidos de las entrevistas:

| Empresa | Planta Desaladora | Fuente de energía | Capacidad (L/s) | Costo | Desglose de costos |
|----------------|-------------------------|--------------------|-----------------|-----------|--|
| Enersa | | Solar fotovoltaica | | USD\$0,53 | Insumos, operador, mantenimiento, recambio de membranas y baterías |
| Acciona | Cerro Negro | SEN | 400 | USD\$1 | |
| Candelaria | Minera Candelaria | SEN | 500 | | Energía, mantenimiento, RRHH e insumos |
| A. Antofagasta | Antofagasta y Tocopilla | SEN | 75-850 | USD\$0,56 | Captación, pretratamiento, ósmosis inversa y postratamiento |

Tabla 4: Preguntas y aspectos de las entrevistas.

Fuente: Elaboración propia.

| Proceso relevante | Descarte | Monitoreos | Desafíos tecnológicos y operacionales | Desafíos sustentabilidad |
|------------------------|--|------------|--|---|
| Reposición de baterías | Devolución mediante retorno ecológico | NO APLICA | Operación de plantas con mecanismos autónomos para la generación de energía | Reducir los daños a los recursos bentónicos y pelágicos, y lograr comunidades autónomas en términos de agua y energía |
| | Descarte mediante emisarios submarinos con difusores | RCA | Implementación de gemelos digitales y transformación digital de la industria 5.0 | Lograr el desarrollo de pautas de evaluación socioambiental, ligado al avance legislativo de Chile |
| 60 % Energía | Descarte mediante emisarios submarinos con difusores | DS90 | Mejorar los consumos energéticos | Fortalecer la educación de la ciudadanía respecto a la importancia de la desalación |
| 65 % Ósmosis Inversa | Descarte mediante emisarios submarinos con difusores | RCA y SISS | Reducir costos de producción y energía y mejorar los pretratamientos | Reducir la generación de residuos, y seguir desarrollando programas de vinculación con la comunidad |

Tabla 5: Preguntas y aspectos de las entrevistas (continuación).

Fuente: Elaboración propia.

1. INDESPA

Las plantas desaladoras financiadas por el Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala (INDESPA), a través del Programa de Fomento y Desarrollo Productivo de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala, que tiene por objetivo efectuar plantas de ósmosis inversa para suplir las necesidades de agua potable para los procesos productivos en caletas pesqueras artesanales.

Los principales beneficiarios de este programa son organizaciones de Pescadores Artesanales, que se encuentren legalmente constituidas e inscritas en el Registro de Organizaciones Artesanales (ROA) del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, que no cuenten con acceso a agua potable para la ejecución de sus procesos productivos.

En la región de Coquimbo a la fecha se han instalado 12 plantas de ósmosis inversa, mientras que la región de Tarapacá cuenta con 4 plantas.

Estas plantas desaladoras son unidades y equipos modulares instalados en containers y con alimentación mediante sistemas de energía fotovoltaica y eólica, haciendo que estos módulos sean completamente autónomos.

Para la instalación de las plantas primero se construyen los drenes de captación de agua y rechazo de salmuera, los que se ubican sobre los 8 metros de la línea de costas de las más alta marea, a través de un pozo de captación de no más de 3 metros de profundidad, lo que permite captar agua de mar previamente filtrada naturalmente, haciendo más eficiente el proceso de desalación, que posteriormente se transformará en agua dulce.

La ejecución de los proyecto se realiza a partir de la compra, traslado, instalación y puesta en marcha de las plantas, conexión de drenes de toma de agua de mar y rechazo e instalación de los sistemas de energía. Cabe considerar que estos sistemas son desmontables y móviles en caso de ser necesario trasladarlos de lugar.

Algunas de las empresas que se han encargado de la instalación de las plantas financiadas por INDESPA son:

- Vigaflow
- Aquavant
- Star Line
- Enersa
- Voens

De estas empresas, se encuestó a **ENERSA S.A** Esta corresponde a una empresa de ingeniería experta en energías renovables no convencionales y agua renovable, motivados por el desarrollo del sector industrial, minero, agroindustrial, pesquero y salmonero sostenible. Sus proyectos son llevados a cabo mediante tecnologías de primer nivel, certificadas, de altos rendimientos, innovadoras, de bajos costos operacionales y servicios que responden a mejores estándares.

En promedio las plantas tienen una producción de 10 m³ diarios de agua potable, con un costo estimado de USD \$0,53 por m³ de agua desalada.

La estructura de producción se desglosa en insumos químicos, operador, mantención (realizando aproximadamente cada tres años el recambio de membrana y cada cinco años el recambio de baterías). Dentro de estos en términos de costos el más relevante corresponde a la reposición de las baterías.

Es importante destacar que estas plantas, al producir menos de 50 m³ no deben ser reguladas por el SEA. Sin embargo, requieren de autorización de la Gobernación Marítima por el uso de mar y de la Seremi de Salud para la producción de agua potable.

Dentro del proceso de operación de una planta desaladora por ósmosis inversa, se encuentra el proceso de descarte de la salmuera. En el caso de las plantas desaladoras mencionadas anteriormente, estas realizan la devolución mediante un retorno ecológico, el cual consiste en devolver el remanente al agua de mar con las mismas características de concentración de sal con la que ingreso a la planta.

Por otra parte, en cuanto a desafíos desarrollados a la operación y tecnología, la empresa tiene como meta generar la operación de las plantas con mecanismos absolutamente autónomos en lo que se refiere a la generación de energía, por lo cual, se encuentran trabajando en sistemas energéticos renovables sin baterías. En cuanto a desafíos en términos de sustentabilidad, trabajan fuertemente en el plan de Retorno Ecológico y en esquemas de captación, buscando que en un futuro las comunidades puedan ser autónomas en agua y energía.

2. ACCIONA

ACCIONA S.A es una empresa española de promoción y gestión de infraestructuras (agua, concesiones, construcciones y servicios) y energías renovables.

ACCIONA opera la primera planta desaladora que provee agua para uso minero a través de la tecnología de ósmosis inversa, ubicada en la región de Atacama, en la ciudad de Copiapó.

Esta planta corresponde a la planta desaladora Cerro Negro, la cual se abastece en un 100 % mediante el sistema eléctrico nacional (SEN). En promedio la planta produce 400 L/s, con un costo de producción por m³ de USD \$ 1.

En el contexto de operación de la planta desaladora se realizan monitoreos ambientales, en el cual el instrumento legal corresponde a la RCA, mediante un Plan de Vigilancia Ambiental (PVA). En la etapa de operación comprende de un monitoreo mensual y otro semestral. Para el caso de los muestreos mensuales se realizan mediciones in situ de salinidad, circundando la descarga de salmuera en un radio de 10 y 50 metros muestreos de los difusores del emisario. Una vez establecido el vector de aproximación de la corriente en el punto de descarga, se realiza un seguimiento de las mayores salinidades de la pluma.

En el caso de los monitoreos semestrales se realizan mediciones de:

- **Calidad del agua:** temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, fluoruros, sólidos fecales, arsénico, clorofila, nitratos, fosfatos, pH, turbiedad, transparencia, cloro libre residual, detergente, índice fenol y hierro disuelto.
- **Calidad de sedimentos:** materia orgánica total, granulometría, potencial óxido reducción, hierro, comunidades biológicas de macroinfauna submareal de fondos sedimen-

tarios, comunidades biológicas de fondos rocosos inter y submareales.

- **Fauna de fondos blandos**
- **Comunidades planctónicas**

En el caso de la salmuera de descarte, esta se descarga por medio de un emisario submarino con 6 difusores dando cumplimiento con holgura a los parámetros regulados por el D.S. N° 90/2000 y sin superar la salinidad declarada a la autoridad ambiental.

3. **DISTRITO MINERA CANDELARIA**

Minera Candelaria es una mina de cobre ubicada en el norte del país, en la región de Atacama. La cual ocupa un 100 % de agua desalada para sus procesos productivos.

La planta desalinizadora de Minera Candelaria es abastecida de energía eléctrica proveniente del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Esta planta por diseño tiene una capacidad de 500 L/s de agua de mar desalinizada, con una producción promedio de 200 L/s aproximadamente.

La estructura de costos para la producción de agua desalada se compone de: 60 % energía, 15 % mantenimiento, 15 % recursos humanos y 10 % insumos. Siendo en términos de costos el más relevante el ítem de energía.

Enfocados en la salmuera de descarte esta se dispone a través de un emisario submarino ubicado en la zona de protección litoral, con difusores en los últimos metros de la estructura. Por otra parte, se realizan monitores con el DS 90 y flujos de admisión y emisión.

Dentro de los desafíos de la Minera Candelaria, el principal desafío es mejorar los consumos energéticos de la planta. Además se busca fortalecer la educación ciudadana respecto de la importancia de la desalación de agua de mar como una opción sustentable para la continuidad de las empresas en un escenario de escasez hídrica.

4. **Aguas Antofagasta**

AGUAS ANTOFAGASTA S.A es una empresa de servicios sanitarios que actualmente cuentan con dos plantas desaladoras, planta desaladora Antofagasta y planta desaladora Tocopilla. Ambas plantas operan con fuente de energía mediante el Sistema Eléctrico Nacional.

La planta Antofagasta cuenta con una capacidad de 850 L/s que abastece al 85 % de la demanda de recurso de Antofagasta y un 100 % de la demanda de Mejillones. Por otra parte, la planta desaladora Tocopilla produce 75 L/s los cuales abastecen de agua potable al 100 % de la población de Tocopilla.

El desglose de sus costos se divide en 4 etapas, captación, pre-tratamiento, ósmosis inversa y post-tratamiento, y el costo total de estas es de aproximadamente USD\$ 0,56. El más relevantes en términos de costos corresponde al proceso de ósmosis inversa, correspondiente a un 65 % del costo total de la producción de agua desalada, equivalente a USD\$ 0,36.

La salmuera de descarte producida del proceso de desalación se realiza mediante difusores a 200 metros de la costa y a 20 metros de profundidad.

4.3. TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE ÁCIDO BÓRICO

En esta sección se presentan diferentes tecnologías que actualmente se utilizan para remover ácido bórico, como ósmosis inversa, doble paso de ósmosis inversa, intercambio iónico, carbón activado y funcionalización de membranas.

La Tabla 6 presenta un resumen de estas tecnologías, incluyendo sus principios de operación y capacidad de remoción de boro, entre otros antecedentes.

| Tecnología | Principio de Operación | Remoción de boro (%) | Comentarios | Referencias |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|--------------------|
| Ósmosis Inversa | Membranas | 50-75 | Bajo porcentaje de rechazo debido al tamaño y mayoritariamente al pH de la solución | [17, 20] |
| OI de Doble Paso | Membranas | 75-95 | Mejor remoción con pH ajustado en 10,5 | [17, 18] |
| Intercambio iónico | Adsorción Superficial | >99 | Es una tecnología específica para la remoción de AB. Eficaz en rangos de pH 4-8 y depende de la densidad y diámetro de la resina | [16, 17, 20] |
| Carbón Activado | Adsorción Superficial | >90 | Son relevantes el pH y la concentración en la remoción. Requiere de grandes cantidades de absorbentes por litro de agua | [15, 43] |
| Intercambio iónico | Adsorción Superficial | 83-90 | Se puede aplicar en membranas de OI. Rechazo bajo para especies sin carga | [16] |

Tabla 6: Tecnologías de remoción de ácido bórico.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Ósmosis Inversa

Los principios la tecnología de ósmosis inversa se presentan en el Capítulo 2 de esta memoria. En términos generales el sistema de ósmosis inversa requiere de una membrana semipermeable que permita la separación de las sales de la solución, mediante la aplicación de una presión que supere la presión osmótica.

La eliminación de boro mediante ósmosis inversa se ve afectada por diversos factores, así como, temperatura, presión, pH, caudal, salinidad del agua, concentración inicial del boro y relación de recuperación. Sin embargo, diversos estudios destacan que cada uno de los parámetros muestran un efecto similar en la remoción del boro independiente de la membrana que sea utilizada.

Dentro de los parámetros mencionados anteriormente, el impacto del pH en la remoción del boro es predominante, mientras que la concentración inicial del boro es insignificante. En rangos de pH 7-8 el rechazo del 50-75 % y en pH 10,5 aumenta a más del 95 %, lo que se debe a la mayor proporción de iones de borato a medida que aumenta el pH. Sin embargo, un ajuste de pH alto puede causar problemas que resulten en consumo excesivo de soda cáustica y la precipitación de capas de incrustaciones que deterioran la productividad de las membranas.

4.3.2. Ósmosis Inversa de Doble Paso

Un sistema de ósmosis inversa de doble paso es cuando el agua de permeado del sistema de ósmosis inversa se alimenta a una segunda unidad de ósmosis inversa. A su vez también a forma de recuperar el agua se alimenta un segundo paso de ósmosis inversa con el agua de descarte.

El sistema de ósmosis inversa de doble paso está compuesto de dos sistemas de ósmosis inversa, denominados primer paso y segundo Paso. Entre ambos pasos existe un tanque de almacenamiento donde el permeado o remanente se almacena para alimentar el segundo paso de ósmosis inversa.

En un sistema de desalación de agua de mar mediante tecnología de ósmosis inversa se pueden realizar dos o más pasadas. El número de estas depende de varios factores, en los que las características del agua de alimentación y los estándares del agua de producto ocupan un rol fundamental.

El rechazo de boro mejora a medida que aumenta la presión de operación del sistema, y a través del ajuste del pH del agua permeada del primer paso a pH 9,5, para aumentar la proporción del ión borato $B(OH)_4^-$ en solución. Considerando que el pH del agua permeada se ubica entre entre 4-6, el ajuste de pH es importante.

4.3.3. Resinas de Intercambio Iónico

La utilización de resinas selectivas de intercambio iónico son consideradas las de mayor importancia en la eliminación de boro. Distintos estudios indican que las resinas selectivas basadas en matrices de poliestireno macroporoso con ligando N-metil-glucamina (NMG) son las que tienen mayor capacidad sorbente (Kabay, N et al., 2010).

Las resinas de intercambio iónico corresponden a materiales sintéticos, es decir, son obtenidas mediante síntesis química y están específicamente destinadas al tratamiento de agua. Son resinas quelantes⁴, entrecruzadas macroporosas, siendo el grupo activo el NMG. Es este grupo de la resina quien captura el boro mediante la formación de un enlace covalente, el cual forma un complejo superficial que permite la eliminación del boro.

Las resinas no se ven afectadas por las variaciones de temperatura, valor de pH ni por la salinidad de la solución a desalar. Sin embargo, éstas se ven afectadas tanto por la densidad y diámetro de las resinas. Dentro de las resinas selectivas de boro disponibles comercialmente que contienen como grupo activo NMG tenemos **Diaion CRB 02** y **Dowex-Xus 43694.00**, las cuales luego de

⁴Las resinas quelantes corresponden a una clase de materiales poliméricos funcionales reticulados capaces de formar complejos con iones metálicos

la clorometilación y animación con el grupo NMG se convierten en resinas selectivas de boro, permitiendo que se pueda formar un complejo que permita descartar el boro de la solución.

La Figura 27 nos permite observar que la eliminación de boro mejora cuando se aumenta la densidad de ambas resinas de 0,36-0,5 mm de diámetro de perla a 0,1 mg/50ml, alcanzando la mayor remoción en una densidad de rango 0,125 a 0,15 g/50 ml para las resinas de diámetro 0,36-0,5 mm

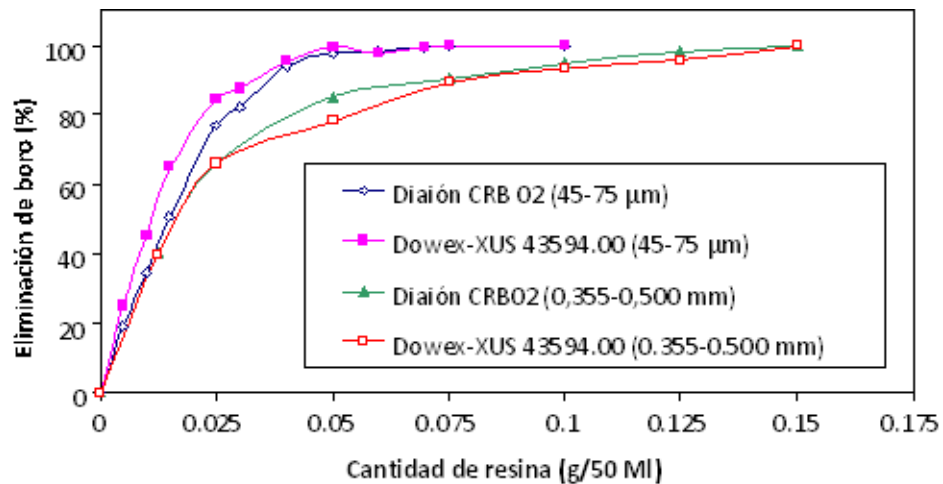


Figura 27: Efecto del tamaño de partículas de las resinas para la eliminación de boro.

Fuente: Boron in seawater and methods for its separation (Kabay, N et al., 2007)

4.3.4. Carbón activado

La tecnología de carbón activado cuenta con una gran capacidad de adsorción, debido a su alta área de superficie específica, actualmente es el adsorbente más utilizado en aplicaciones industriales y ambientales (Guan, Z et al., 2016). Sin embargo, existen pocos estudios que utilizan el carbón activado para la remoción de ácido bórico.

Este método de adsorción es moderadamente eficaz al momento de eliminar niveles bajo de boro de una solución. Con una concentración inicial de boro no superior a 5 mg/L el carbón activado es capaz de remover mas disminuir su concentración en aproximadamente un 90%. Existen dos factores críticos para establecer la eficiencia de eliminación; el pH de la solución y la concentración inicial de boro. Esta tecnología permite eliminar el boro mediante adsorción como ácido bórico o ión borato (Won-Wook Choi, K. Y. Chen, 1979).

En la actualidad diversos autores realizan investigaciones de remoción de carbón activado impregnado con diversos compuestos para mejorar la eficacia en la remoción del ácido bórico, como por ejemplo, se utiliza ácido salicílico, curcumina, ácido tartárico, entre otros (Guan, Z et al., 2016)

4.3.5. Funcionalización de membranas

La funcionalización es un proceso químico que inserta grupos funcionales sobre una superficie con el fin de catalizar reacciones específicas. A continuación, se listan diversos ligandos⁵, capaces de reaccionar con el ácido bórico, formando compuestos de coordinación que permitan la remoción del boro en la medida que el ligando se encuentre adherido a una superficie. Para esta memoria se estudian los siguientes ligandos:

- **4-Methylcatecol**
- **Catechol**
- **4-Nitrocatecol**
- **Ácido Tartárico**

En la Figura 28 se pueden observar las estructuras químicas de cada uno de los ligandos.

Es importante definir para cada ligando los siguientes antecedentes, fórmula molecular, grupo funcional, valores de pK y la constante de equilibrio (K) del ligando con el ácido bórico. La Tabla 7 detalla los antecedentes para cada uno de los ligando mencionados anteriormente.

⁵Sustancias capaces de formar un complejo con una biomolécula

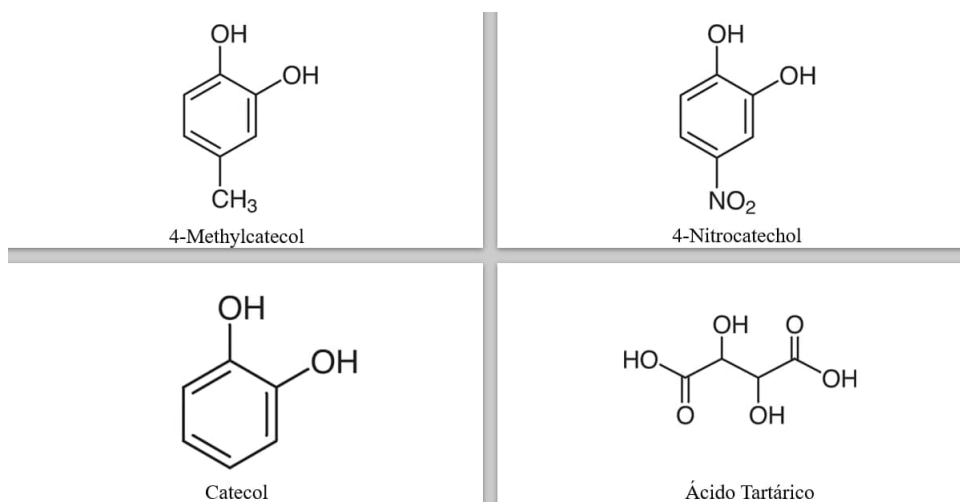


Figura 28: Estructura química de ligandos.

Fuente: Elaboración propia a partir de Tci Chemicals.

| Ligando | Grupo Funcional | Fórmula Molecular | pka_1 | pka_2 | $K(B(OH)_3)$ |
|-----------------|-----------------|-------------------|---------|---------|-----------------------|
| 4-Metilcatecol | Hidroxilo | $C_7H_8O_2$ | 9,39 | 11,59 | $6,3 \times 10^{-6}$ |
| Catecol | Hidroxilo | $C_6H_4(OH)_2$ | 9,27 | 11,49 | $1,1 \times 10^{-5}$ |
| 4-Nitrocatecol | Hidroxilo | $C_6H_5NO_4$ | 6,69 | 10,57 | $1,5 \times 10^{-4}$ |
| Ácido Tartárico | Carboxilo | $C_4H_6O_6$ | 2,89 | 4,52 | $1,85 \times 10^{-2}$ |

Tabla 7: Resumen de parámetros de ligandos estudiados.

Fuente: Elaboración propia a partir de Pfizer & Babcock, 1977.

Para estudiar la complejación del ácido bórico con cada uno de los ligandos se realiza una modelación geoquímica a través del programa PHREEQC [REF] considerando agua desionizada. Esta modelación permitió obtener gráficas que permiten representar la relación del pH en función coeficiente fraccionario α , el cual establece el porcentaje de cada especie de boro en el agua. Es importante mencionar que estas gráficas representan una razón molar 1:1, es decir, cada 1 mmol/L de boro en el agua hay 1 mmol/L de ligando.

La Figura 29 contiene 4 gráficas, correspondientes a la modelación geoquímica de cada uno de los ligandos estudiados en complejación con el boro en el agua, que se encuentra como componente de dos moléculas hidratadas, en forma de ácido bórico $B(OH)_3$ y en forma tetrahidroxiborato $B(OH)_4^-$.

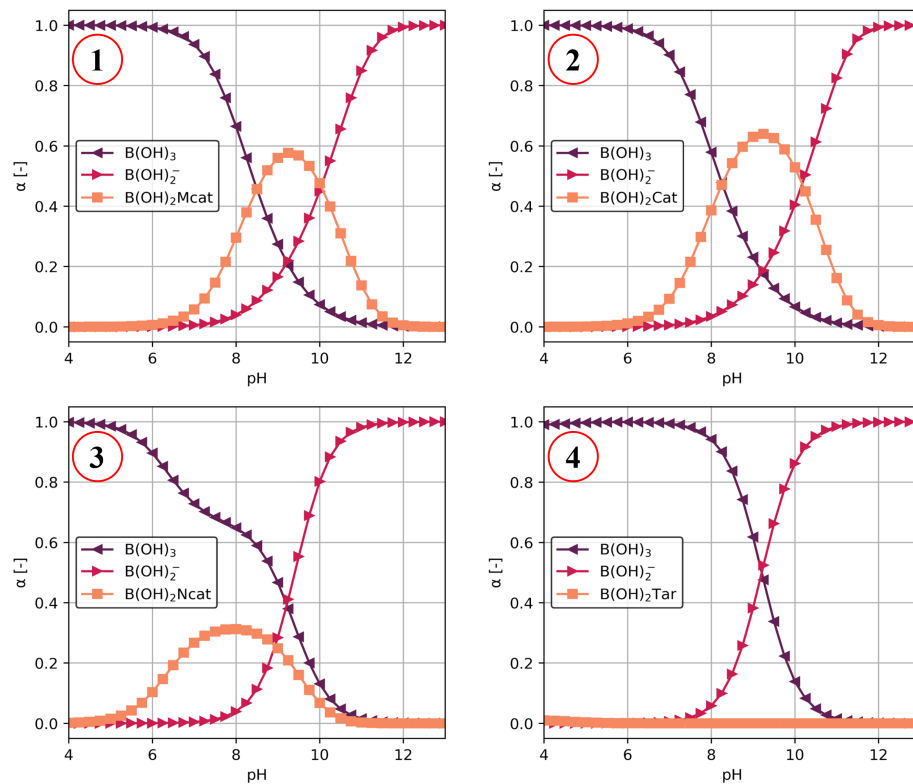


Figura 29: Distribución de especies con razón molar 1:1 entre ácido bórico y ligando.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 29 podemos observar que el boro se presenta como ácido bórico en aguas más ácidas, es decir, donde predominan los iones H^+ , mientras que el tetrahidroxidoborato se presenta en aguas más alcalinas, es decir, donde predominan los iones OH^- .

La Figura 29.1 contiene la distribución de especies entre el ácido bórico y el ligando 4-metilcatecol. Logramos identificar que en un pH 9 el ácido bórico se compleja de forma efectiva con el 4-metilcatecol con un 60 % del ácido bórico complexado.

Por otra parte, la Figura 29.2 simula la complejación entre el boro y ligando catecol. En términos de afinidad del ligando con el ácido bórico podemos concluir que la especie complejada predomina en un 60 % a pH 9.

La Figura 29.3 presenta la complejación entre el boro y el 4-nitrocatecol. Si bien el mayor porcentaje de complejación no es superior al 30 %, esta especie logra ligar el ácido bórico en un rango más amplio de pH y en condiciones de pH ácido semejantes al agua permeada del proceso de ósmosis inversa.

Finalmente, la Figura 29.4 presenta la distribución de especies entre el ácido bórico y el ligando ácido tartárico. De la figura es posible apreciar que la complejación del ácido bórico no ocurre de forma apreciable en ningún rango de pH.

En base a lo analizado anteriormente, consideramos como ligandos prometedores para la remoción de ácido bórico el catecol y 4-nitrocatecol. Para poder analizarlas con mayor profundidad y ver su comportamiento con el boro en el agua, se realiza nuevamente una modelación geoquímica, pero esta vez se utiliza una razón molar 1:2, es decir, por 1 mmol/L de boro que se agregue al agua desionizada se agregan 2 mmol/L de ligando. Los resultados de esta modelación se presentan en la Figura 30, la cual se describe a continuación.

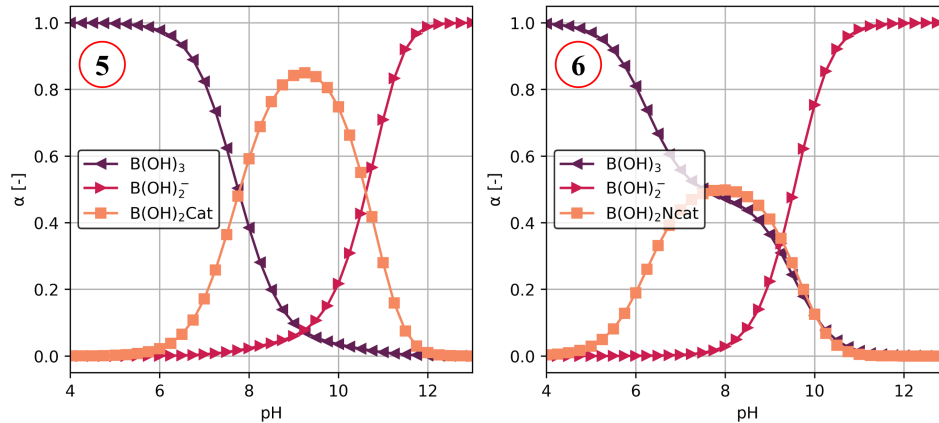


Figura 30: Distribución de especies con razón molar 1:2 entre ácido bórico y ligando.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 30.5 muestra la relación entre el pH y el coeficiente fraccionario de las especies de ácido bórico con el ligando catecol considerando una relación molar 1:2, respectivamente. De la Figura podemos ver que la complejación de boro en un pH cercano a 9 es superior al 80%.

Asimismo la Figura 30.6 muestra la distribución tanto del ácido bórico como del ligando 4-nitrocatecol en el agua. Si lo comparamos con la Figura 29.3 podemos apreciar que el porcentaje de complejación del boro aumenta aproximadamente un 20% en un pH cercano 9. Por lo tanto, queda en claro que al aumentar la cantidad de moles de ligando este nos permite complexar una mayor cantidad de ácido bórico.

4.4. PROPUESTA TECNOLÓGICA

La Tabla 7 se presenta la matriz de priorización de las tecnologías estudiadas en esta memoria, la cual tiene por objetivo identificar la mejor tecnología de remoción de ácido bórico que existen actualmente, la cual pueda ser complementada con el proceso de ósmosis inversa en la desalación de agua de mar a nivel nacional.

En esta matriz se evalúan cuatro tecnologías que permiten la remoción del ácido bórico del agua, estas son: doble paso de ósmosis inversa, intercambio iónico, carbón activado y funcionalización de membranas. Para poder determinar cual es la mejor tecnología de remoción se evalúan cinco criterios, en una escala de 1 a 5, donde 1 corresponde a deficiente y 5 corresponde a óptimo. Dentro de los criterios tenemos:

- Antecedentes técnicos disponibles, con una ponderación de 5 % para la puntuación
- Porcentaje de rechazo de ácido bórico, con una ponderación de 50 %
- Complejidad del proceso, ponderando un 15 % a la puntuación final
- Espacio requerido para la implementación de la tecnología, con una ponderación de 20 %
- Madurez tecnológica, con una ponderación de 10 %

En el primer criterio de evaluación, la tecnología de doble paso de ósmosis inversa y de intercambio iónico obtienen la mayor puntuación, dado a que ambas tecnologías cuentan con una gran cantidad de antecedentes disponibles en revistas científicas. En cuanto a los antecedentes de remoción mediante carbón activado presenta escasa información y en su mayoría no es específica para la remoción de ácido bórico, y por último, la utilización de funcionalización de membranas para remover ácido bórico del agua de mar es una tecnología poco estudiada y que aún no cuenta con mayor investigación, obteniendo el siguiente ranking:

1. Intercambio iónico (5)
2. Doble Paso de OI (5)
3. Carbón activado (3)
4. Funcionalización de membranas (2)

Los puntajes obtenidos en el segundo criterio (**porcentaje de rechazo de ácido bórico**) se obtienen a partir de cuanto se logra disminuir la concentración del compuesto de una solución correspondiente a agua de mar, obteniendo el siguiente ranking:

1. Intercambio iónico: remoción superior al 99 % (5)
2. Carbón activado: remoción superior al 90 % (4)
3. Funcionalización de membranas: remoción entre 83-90 % (valores teóricos) (4)
4. Doble Paso de OI: remoción entre 75-95 % (3)

En cuanto al tercer criterio, **complejidad del proceso**, se consideran las etapas que se deberían incorporar en un sistema de ósmosis inversa tradicional, resultando como la más efectiva la funcionalización de membranas, ya que esta tecnología es eficaz en pH de agua de mar, evitando así los tratamientos de ajustes de pH. Por otra parte, obtiene el segundo lugar la implementación de intercambio iónico, ya que esta tecnología resulta eficiente en rangos de pH entre 4 y 8, correspondiente al pH de un agua osmotizada, permitiendo utilizarla posterior al tratamiento de ósmosis inversa. En cuanto a la utilización de doble paso de ósmosis inversa se requiere ajuste de pH elevado, y por otra parte, la implementación de carbón activado requiere de grandes cantidades de adsorbentes. Todo lo anterior nos permite calificar las tecnologías de la siguiente forma:

1. Funcionalización de membranas (5)
2. Intercambio iónico (3)
3. Doble Paso de OI (2)
4. Carbón activado (1)

Para el cuarto criterio de evaluación, **espacio requerido para la implementación de la tecnologías**, la puntuación se obtiene a partir de cuanto espacio se debe modificar o añadir en la planta desaladora de ósmosis inversa, calificándolos de la siguiente manera:

1. Funcionalización de membranas: no requiere de la implementación de espacio, ya que se considera solo la modificación de las membranas semipermeables existentes (5)
2. Intercambio iónico: requiere de un espacio para la etapa de IX, posterior a la OI (2)
3. Carbón activado: se debe añadir los filtros de carbón activado (2)
4. Doble Paso de OI: requiere de un espacio apto para la instalación de una segunda unidad de OI (1)

Finalmente, la tabla 8 obtiene los resultados obtenidos mediante una matriz de priorización.

| Objetivo | Identificar la mejor tecnología de remoción de ácido bórico que se pueda complementar con el proceso de OI en la desalación de agua de mar a nivel nacional | | | | |
|---|---|--------------------|-----------------|-------------------------------|-------------|
| Escala de evaluación | Escala de 1 a 5, donde 1 corresponde a deficiente y 5 corresponde a óptimo | | | | |
| Tecnología/Criterios | Doble Paso OI | Intercambio Iónico | Carbón Activado | Funcionalización de membranas | |
| Antecedentes técnicos disponibles (5 %) | 5 | 5 | 3 | 2 | |
| Porcentaje de rechazo de AB (50 %) | 3 | 5 | 4 | 4 | |
| Complejidad del proceso (15 %) | 2 | 3 | 1 | 5 | |
| Espacio requerido para la implementación de la tecnología (20 %) | 1 | 2 | 2 | 5 | |
| Madurez tecnológica (10 %) | 5 | 5 | 3 | 2 | |
| Puntuación Final | 2,75 | 4,10 | 3,00 | 4,05 | 4,05 |

Tabla 8: Matriz de priorización de tecnologías de remoción de ácido bórico.

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos de la tabla 7, correspondiente a la matriz de priorización, la tecnología más factible para el mejoramiento de remoción de ácido bórico en el proceso de desalación de agua de mar mediante tecnología de ósmosis inversa es el **intercambio iónico**. Esta tecnología corresponde a una segunda etapa en el proceso de ósmosis inversa, cuenta con un gran porcentaje de rechazo de ácido bórico, superior al 99%, permitiendo reducir la concentración de boro de 5 mg/L presente en el agua de mar a 0,05 mg/L, obteniendo la concentración límite que establece la OMS para el consumo de agua potable de 0,5 mg/L. La implementación de esta tecnología en un sistema de ósmosis inversa requiere de un espacio físico, por lo tanto, en plantas con poco espacio disponible dificulta su ejecución.

Por otra parte, la **funcionalización de membranas** es una tecnología prometedora; su implementación en las membranas semi-permeables permite obtener la concentración requerida para agua potable, se convierte en una buena opción cuando no se cuenta con gran espacio para implementación, permitiendo simplificar el tratamiento. Sin embargo, se requiere de mayor investigación que permita conocer validar el desempeño de los grupos funcionales que se puedan insertar de forma efectiva en las membranas, dando paso a una implementaciones comerciales factibles en términos técnicos y económicos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los antecedentes presentados anteriormente demuestran que el boro es un problema en el proceso de desalación de agua de mar mediante tecnología de ósmosis inversa, en términos de costo y efectividad. Este micronutriente se presenta de forma natural en agua de mar, y en abundancia en ríos y aguas subterráneas en la zona norte del país. En elevadas concentraciones el boro constituye un riesgo potencial para la salud de aquellos que consuman alimentos y/o agua.

El objetivo principal de esta investigación consistió en analizar las tecnologías que existente en la actualidad tanto para desalar agua a nivel nacional como para remover ácido bórico del agua de mar en el proceso de desalación, mediante recopilación de antecedentes. En la actualidad las plantas desaladoras cuyo uso del agua corresponde a agua potable deben utilizar doble paso de ósmosis inversa para poder remover el boro, proceso que en términos de costos es aproximadamente el doble que la utilización de ósmosis reversa y utilización de membranas de intercambio iónico.

Esta memoria presenta información específica de cada planta desaladora que opera actualmente en nuestro país, lo cual permitió cerrar brechas de información con respecto a la teoría del funcionamiento de una planta desaladora de agua de mar. Sin embargo, de las 45 plantas que fueron documentadas, solo se obtuvo información mediante las encuestas de 4 empresas; Enersa, Acciona, Distrito Candelaria y Aguas Antofagasta. Con los antecedentes obtenidos se pudo conocer de primera fuente cuales son los monitoreos ambientales asociados a la operación de las plantas, junto con las autoridades competentes controlan diversos parámetros. No obstante, en términos legislativos Chile aún no cuenta con un marco normativo en términos de desalación.

En términos generales la desalación mediante ósmosis inversa corresponde a una tecnología madura para enfrentar los problemas de escasez hídrica que se presentan actualmente, aunque su afinidad para remover boro es moderada a baja. Es por esto que es sumamente importante lograr mejorar esta tecnología de desalación, mediante la utilización de resinas que permitan mejorar la eficacia de la remoción de ácido bórico del agua de mar y lograr disminuir los costos asociados.

La funcionalización de membranas es una tecnología prometedora para la remoción de boro del agua de mar dada su gran selectividad. La modelación geoquímica de los ligandos permitió comparar el comportamiento de complejación del 4-metilcatecol, catecol, 4-nitrocatecol y ácido tartárico con el ácido bórico en agua. A través del análisis de cada una de las gráficas obtenidos se logró definir cuales los ligandos más prometedores, concluyendo que los ligandos capaces de ofrecer una mayor complejación superficial, y por tanto, una mayor capacidad teórica de remover el ácido bórico del agua son aquellas que incluyen grupos funcionales del ligando catecol y 4-nitrocatecol, con un porcentaje de remoción de aproximadamente 60 y 40 % respectivamente.

Para poder conseguir resultados más concretos se analizaron los dos ligandos seleccionados (catecol y 4-Nitrocatecol), pero con una concentración molar 1:2, obteniendo para ambos casos una mayor complejación de boro, alrededor de un 80 % para el caso del ligando catecol y cercano al 60 % para el 4-nitrocatecol.

Se espera que adelante se pueda avanzar en modelación de detalle que nos permita optimizar cual será la razón molar más eficiente para la remoción de ácido bórico mediante funcionalización de membranas, tanto en términos de costo y efectividad de remoción.

BIBLIOGRAFÍA

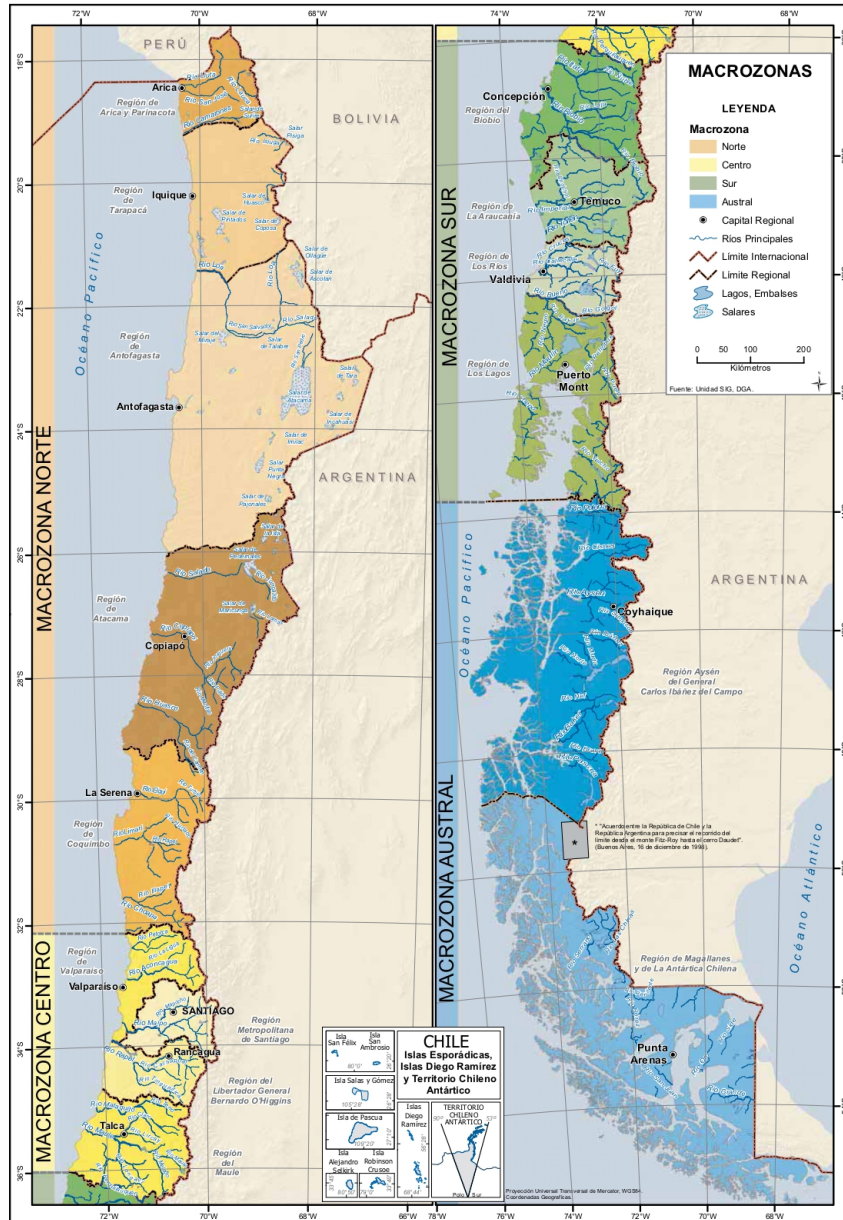
- [1] Acciona (2020). *La construcción de la desalinizadora Shuqaiq 3 alcanza los dos millones de horas-hombre sin lesiones.*
https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/la-construccion-de-la-desalinizadora-shuqaiq-3-alcanza-los-dos-millones-de-horas-hombre-sin-lesiones/?_adin=11551547647
- [2] Acosta, M.B. (2020). *¿Qué es la desalinización del agua?.* Ecología verde.
<https://www.ecologiaverde.com/desalinizacion-que-es-y-tipos-2689.html>
- [3] Aguas Antofagasta (2021). *Visita nuestras plantas desaladoras.*
<https://www.desalar.cl/>
- [4] Anchudia, E & Delgado, P (2016). *Estudio y diseño de un sistema scada para el control de un proceso de purificación de agua por ósmosis inversa*
- [5] Aque Fundación (s.f). *Las plantas desalinizadoras más grandes del mundo.*
<https://www.fundacionaque.org/desalinizacion-en-el-mundo/>
- [6] Argust, P. (1998). *Distribution of boron un the evironment.* Biological trace element research.
- [7] Avaria, P. (2014). *Mina Cerro Negro. Gigante de Hierro.*
- [8] Banco Mundial (2011). *Chile: Diagnóstico de la Gestión de los Recursos Hídricos.* Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Banco Mundial.
- [9] Banco Mundial (2004). *World Developmente Indicators.* Washintong, US: World Bank

- [10] Baltarnes, C., & Figuero, F. (2018). *Un impresionante registro de las transformaciones a lo largo del río Claro*. Ladera Sur.
<https://laderasur.com/articulo/un-impresionante-registro-de-las-transformaciones-a-lo-largo-del-rio-claro/>
- [11] Cazalac (2009). *Aplicación de Metodologías para determinar la Eficiencia de Uso del Agua: Estudio de caso en la Región de Coquimbo*. Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe.
- [12] Chillón, M.F. (2009). *Reducción de boro en aguas procedentes de desalación*.
- [13] Comisión Chilena del Cobre (2018). *Comisión de Recursos hídricos Boletín N° 9779-33*
- [14] Dirección General de Aguas (2016). *Atlas del Agua, Chile 2016*. Ministerio de Obras Públicas.
- [15] Guan, Z., Lv, J., Bai, P Guo, X (2016). *Boron removal from aqueous solutions by adsorption - A review*.
- [16] Guler, E., Kaya, C., Kabay, N Arda, M (2014). *Boron removal from seawater: State-of-the-art review*.
- [17] Hilal, N., Kim, G.J Somerfield, C (2011). *Boron removal from saline water: A comprehensive review*.
- [18] Jacob, C (2007). *Seawater desalination: Boron removal by ion exchange technology*.
- [19] Jameel, Fady (2020). *Past the salt? The future of water desalination*. Abdul Latif Jameel.
<https://www.alj.com/en/spotlight-by-fady-jameel/past-the-salt-the-future-of-water-desalination/>
- [20] Kabay, N., Guler, E., & Bryjack, M (2010). *Boron in seawater and methods for its separation*

- [21] Kabay, N., Sarp, S., Yuksel, M., Arar, O., & Bryjack, M (2007). *Removal of boron from sea-water by selective ion exchange resins*
- [22] Martins, A. (2017). *¿Puede la desalinización ser la solución para la crisis mundial del agua?*. BBC NEWS. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>
- [23] Martín, L., & Justo, J. B (2015). *Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe.*
- [24] Mesa Nacional del Agua (2020). *Primer Informe*
- [25] Membrana Semipermeable. (s.f). Química.Es.
https://www.quimica.es/enciclopedia/Membrana_semipermeable.html
- [26] Minería Chilena (2018). *Plantas desaladoras: Una solución con pros y contras.*
<https://www.mch.cl/reportajes/una-solucion-con-pros-y-contras/>
- [27] Ministerio de Obras Públicas (2012). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025.*
- [28] Ósmosis. (s.f). Química.Es. <https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%93smosis.html>
- [29] Ósmosis Inversa. (s.f). Química.Es.
https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%93smosis.html.C3.93smosis_inversa
- [30] Ranking de los países con mayor estrés hídrico (2019). *Sostenibilidad para todos.*
- [31] Ravelo, B. (2012). *Adsorción de boro del agua.*
<https://www.sostenibilidad.com/agua/ranking-paises-mayor-estres-hidrico/>
- [32] Rajakovic, V Ristic, DJ (1996). *Sorption of boric acid boraz by activated carbon impregnated with various compounds.*

- [33] Servicio de Evaluación Ambiental (2021). <https://www.sea.gob.cl/> [34] Subpesca (2020). *Apoyo a pescadores de la Región de Coquimbo: nueva planta desalinizadora entrega 8 mil litros de agua a caleta Maitencillo.*
<https://www.subpesca.cl/portal/617/w3-article-108532.html>
- [35] Subpesca (2019). *Plantas desalinizadoras entregarán 30 mil litros de agua potable a tres caletas de Tarapacá.*
<https://www.subpesca.cl/portal/617/w3-article-104490.html>
- [36] Torres, M., & Medina, J.A. (2018). *La calidad del agua y las membranas semipermeables*
- [37] Villacorte, L., Alizadeh, S., Dhakal, N., Gary, A., Schippers, J., & Kennedy, M (2015). *Algal blooms: an emerging threat to seawater reverse ósmosis desalination*
- [38] Villagrán, Sebastián (2017). *Factibilidad de desalinización de agua de mar para pequeñas comunas del Norte de Chile.*
- [39] Water & Emergy Solutions (2016). *Planta ósmosis Inversa Región de Aysen.*
<https://weschile.com/project/planta-ósmosis-inversa-region-aysen/>
- [40] World Bank Group (2019). *The Role of Desalination in an Increasingly Water - Scarce World.*
- [41] Wittfogel, Karl (1996), *Despotismo oriental: estudio comparativo del poder totalitario.*
- [42] Wolfgang, Griem (2014). *Ferrocarril longitudinal del Norte de Chile, Región de Coquimbo.* Geovirtual 2.
<https://www.geovirtual2.cl/Ferrocarril-Chile-Coquimbo/Ferrocarril-Chile-Puente-Choros.htm>
- [43] Won-Wook Choi Kenneth Y. Chen (1976). *Evaluation of boron removal by adsorption on solids.* [44] Xu, R., Xing, X., Zhou, Q., Jiang, G and Wei, F (2010). *Investigations on boron leveles in drinking water sources in China.* Environmental monitorinf and assessment.

ANEXOS



Anexo 1: Mapa de Chile por Macrozonas.

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA, 2016).

| ID | NOMBRE | MACROZONA | REGIÓN | COORDENADAS | COMPAÑÍA | CAP. (L/S) | USO | ESTADO | RCA |
|----|--|-----------|-------------|---------------------|-------------------------------------|------------|--------------------------------|--------------|-----|
| 1 | Planta Desaladora Bahía Caldera | Norte | Tarapaca | - | Seven Seas Water Chile Spa | 92,6 | Agua Potable | Operación | t |
| 2 | Planta Desaladora Chanavaya | Norte | Tarapaca | -7824857; -2622192 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 3 | Planta Desaladora Chipana | Norte | Tarapaca | -7817154; -2225764 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 4 | Planta Desaladora Pisagua | Norte | Tarapaca | -7817682; -2225780 | Aguas del Antiplano S.A | 412 | Agua Potable | Operación | o6 |
| 5 | Planta Desaladora Quebrada Blanca Fase 2 | Norte | Tarapaca | -7807754; -2378177 | Teck Resources Chile Ltda | 1000 | Operaciones Mineras | Construcción | i1 |
| 6 | Planta Río Seco | Norte | Tarapaca | -7810463; -2391252 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Construcción | - |
| 7 | Planta Desaladora San Marcos | Norte | Tarapaca | -7805863; -2405280 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 8 | Producción de Yodo SCM Bullmine | Norte | Tarapaca | -7816583; -2208669 | SCM Bullmine | - | Operaciones Mineras | Operación | i4 |
| 9 | Agua de mar Lomas Bayas II | Norte | Antofagasta | -7843111; -2690033 | Compañía Minera Xstrata Lomas Bayas | 500 | Operaciones Mineras | Operación | - |
| 10 | Planta Algorta | Norte | Antofagasta | -7856201; -2642909 | Algorta Norte S.A | - | Operaciones Mineras | Operación | i4 |
| 11 | Planta Desaladora Antofagasta | Norte | Antofagasta | -7836797; -2697734 | Agua Antofagasta S.A | 850 | Agua Potable | Operación | o3 |
| 12 | Planta Desaladora Antucoya | Norte | Antofagasta | -7822015; -2584853 | Antogasta Minerals S.A | 50 | Operaciones Mineras | Operación | - |
| 13 | Planta Desaladora Cenizas Taltal - Las Luces | Norte | Antofagasta | -7868236; -2958306 | Grupo Minero Las Cenizas S.A | 9,3 | Operaciones Mineras | Operación | i4 |
| 14 | Planta Desaladora Coloso | Norte | Antofagasta | -7851040; -27827212 | Minera Escondida Ltda (BHP) | 525 | Operaciones Mineras | Operación | t |
| 15 | Planta Desaladora Hornitos | Norte | Antofagasta | -7824857; -2622142 | Caja de Compensación Los Andes | 4,3 | | Operación | o6 |
| 16 | Planta Desaladora Mantos de la Luna | Norte | Antofagasta | -7819720; -2558126 | Compañía Minera Mantos de la Luna | 20 | Operaciones Mineras | Operación | - |
| 17 | Planta Desaladora Minera Centinelas | Norte | Antofagasta | -7829830; -2633182 | Antogasta Minerals S.A | 105 | Operaciones Mineras | Operación | i1 |
| 18 | Planta Desaladora Minera Spence | Norte | Antofagasta | -7827119; -2607490 | Minera Spence S.A (BHP) | 800 | Operaciones Mineras | Operación | o7 |
| 19 | Planta Desaladora Moly-Cop | Norte | Antofagasta | -7837569; -2642117 | Moly-Cop S.A | - | Operaciones Mineras | Operación | o6 |
| 20 | Planta Desaladora Paposo | Norte | Antofagasta | -7844599; -2877319 | Ministeria de Obras Públicas | 1,4 | AP Rural | Operación | - |

| | | | | | | | | | |
|----|--|--------|-------------|---------------------|---|------|------------------------------------|-----------|----|
| 21 | Planta Desaladora RT sulfuros | Norte | Antofagasta | -7818371; -2542748 | Corporación Nacional del Cobre | 1630 | Operaciones Mineras | Operación | i4 |
| 22 | Planta Desaladora Sierra Gorda | Norte | Antofagasta | -7826155; -2612384 | Sierra Gorda SCM | 63 | Operaciones Mineras | Operación | - |
| 23 | Planta Desaladora Tocopilla | Norte | Antofagasta | -7814041; -2519777 | Aguas Antofagasta S.A | 200 | Agua Potable | Operación | o3 |
| 24 | Planta Desaladora Agua de Mar | Norte | Atacama | -7887288; -3132277 | Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A | 1200 | Agua Potable | Operación | o3 |
| 25 | Planta Desaladora Cerro Negro | Norte | Atacama | -7884127; -3107691 | Compañía Minera del Pacífico | 600 | Operaciones Mineras / Agua Potable | Operación | - |
| 26 | Planta Desaladora Guacolda | Norte | Atacama | -78932496; -3307633 | Guacolda Energía S.A | 800 | Operaciones Industriales | Operación | - |
| 27 | Planta Desaladora Manto Verde | Norte | Atacama | -7869986; -3066539 | Mantos Copper | 380 | Operaciones Mineras | Operación | i1 |
| 28 | Planta Desaladora Minera Candelaria | Norte | Atacama | -7886433; -3129953 | Compañía Contractual Minera Candelaria | 500 | Operaciones Mineras | Operación | o6 |
| 29 | Planta Desaladora Proyecto Dominga | Norte | Atacama | -7925268; -3300900 | Capstone Mining Chile S.A | 450 | Operaciones Industriales | Operación | o6 |
| 30 | Planta Desaladora Chigualoco | Centro | Coquimbo | -7961316; -3731038 | Subpesca | 0,06 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 31 | Planta Desaladora Chungungo | Centro | Coquimbo | -7927458; -3432842 | Ministerio de Obras Públicas | 0,06 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 32 | Planta Desaladora El Sauce | Centro | Coquimbo | -7977444; -3651664 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 33 | Planta Desaladora Maitencillo | Centro | Coquimbo | -7973950; -3666905 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 34 | Planta Desaladora Minera los Pelambres | Centro | Coquimbo | -7959444; -3747954 | Antogasta Minerals S.A | 400 | Operaciones Mineras | Operación | i1 |
| 35 | Planta Desaladora Rio Limari | Centro | Coquimbo | -7981605; -3598392 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 36 | Planta Desaladora Sierra | Centro | Coquimbo | -7977444; -3651664 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 37 | Planta Desaladora Talcaruca | Centro | Coquimbo | -7981457; -3574098 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 38 | Planta Desaladora Totoralillo Norte | Centro | Coquimbo | -7940389; -3438150 | Subpesca | 0,09 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |

| | | | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|---------|------------|---------------------|------------------------------|------|--------------------------------|-----------|---|
| 39 | Planta Desaladora Talquilla | Centro | Coquimbo | -7949982; -3504167 | Subpesca | 0,12 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 40 | Planta Desaladora Puerto Oscuro | Centro | Coquimbo | -7946630; -3502533 | Subpesca | 0,12 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 41 | Planta Desaladora Totoralillo Centro | Centro | Coquimbo | -7946235; -3512216 | Subpesca | 0,06 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 42 | Planta Desaladora Apollillado | Centro | Coquimbo | -7958732; -3512216 | Subpesca | 0,10 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 43 | Planta Desaladora Huentelauquen | Centro | Coquimbo | -7965717; -3717091 | Subpesca | 0,12 | Procesos productivos pesqueros | Operación | - |
| 44 | Planta Desaladora Isla de Pascua | Centro | Valparaiso | -12173418; -3137687 | Gobierno Regional Valparaiso | - | Operaciones Agrícolas | Operación | - |
| 45 | Planta Desaladora Islas Huichas | Austral | Aysen | -8184318; -3137687 | Ministerio de Obras Públicas | 2,7 | AP Rural | Operación | - |

Anexo 2: Tabla Antecedentes Plantas Desaladoras a nivel Nacional.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 3: Mapa plantas desaladoras región de Tarapacá.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 4: Mapa plantas desaladoras región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 5: Mapa plantas desaladoras región de Atacama.

Fuente: Elaboración propia.



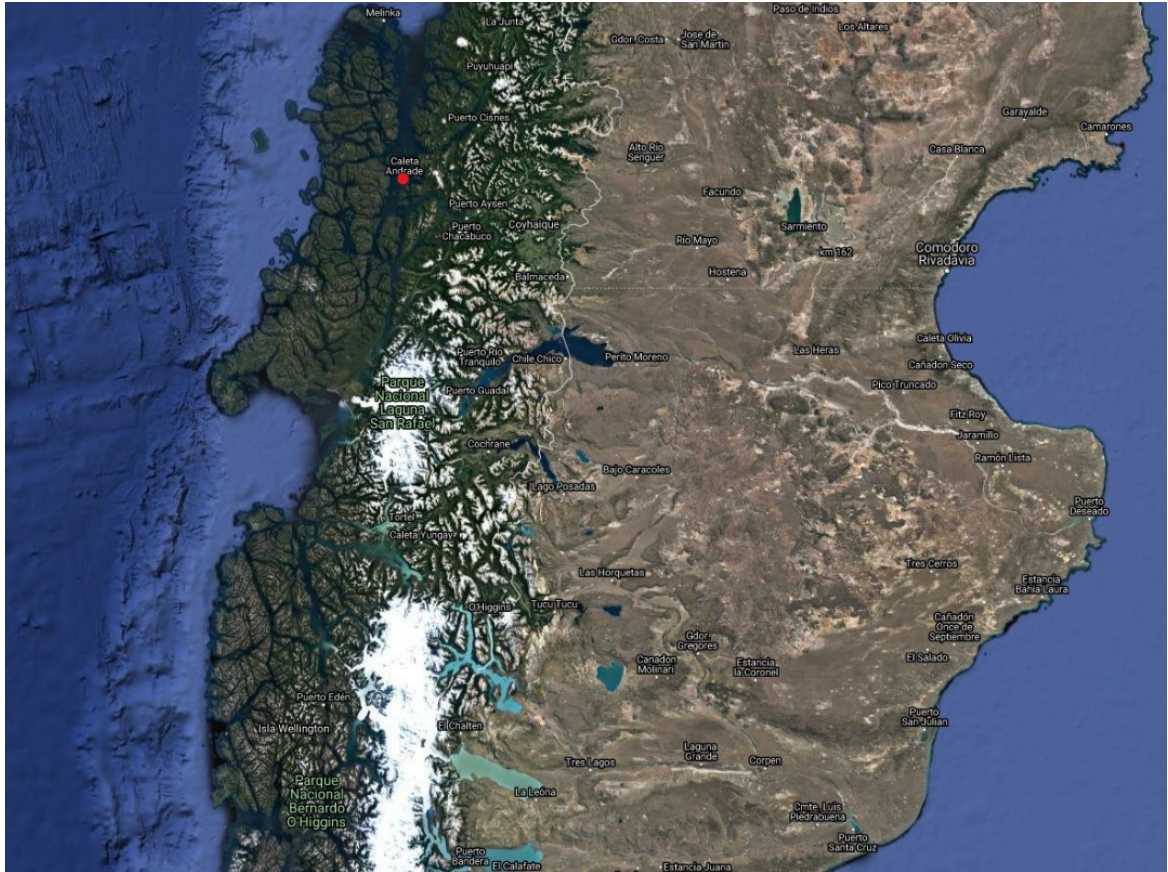
Anexo 6: Mapa plantas desaladoras región de Coquimbo.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 7: Mapa planta desaladora región de Valparaíso.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 8: Mapa planta desaladora región de Aysén.

Fuente: Elaboración propia.