

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN - REY BALDUINO DE BÉLGICA

**ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE
SALMUERAS RESIDUALES PROVENIENTES DE PLANTAS DESALINIZADORAS**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero (E) en Gestión
y Control Ambiental.

Alumna:

Aranza Carol Valentina Cerro Bello



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Análisis de alternativas de valorización y reutilización de salmueras residuales provenientes de plantas desalinizadoras.

Nombre del candidato(a): Aranza Carol Valentina Cerro Bello

Carrera / Grado: Ingeniería de Ejecución en Gestión y Control Ambiental

Campus: Casa Central Valparaíso; Departamento: Química y Medio Ambiente.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, ^{Cristian Pereira}, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente DEJO CONSTANCIA que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

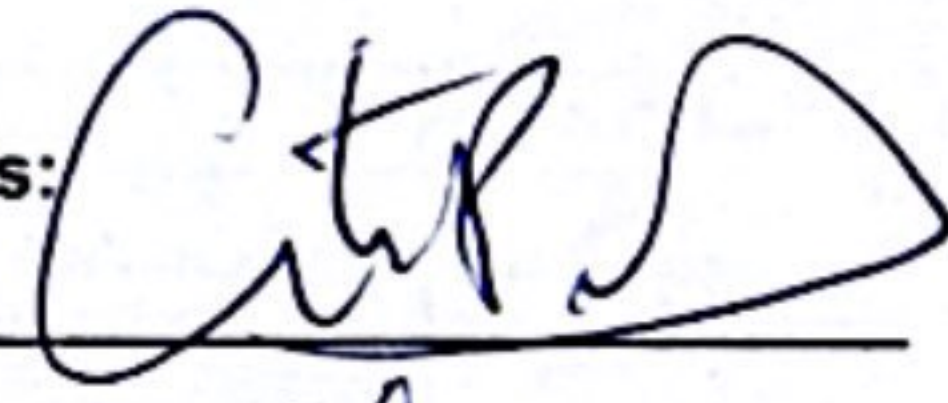
El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

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

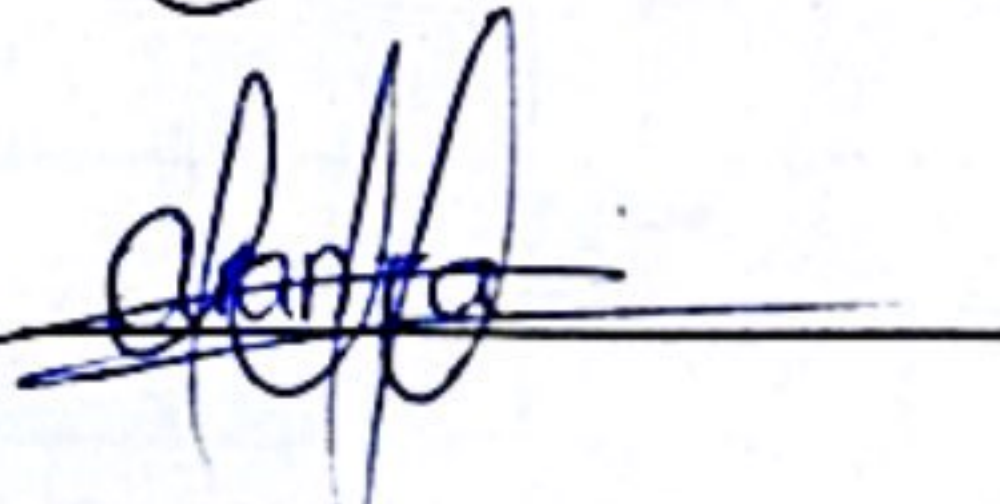
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 21/01/26 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/01/26 Firma: 

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

DEDICATORIA

A mis papás, por ser mi mayor apoyo en este camino. Gracias por creer en mí, por alentarme en los momentos difíciles y por esas llamadas que hicieron que mis regresos de la universidad nunca se sintieran solitarios.

A mi Mamita, que ya no está físicamente, pero me acompañó siempre con sus comidas calentitas y sus dulces regaños cuando no estudiaba lo suficiente. A mi papito, por recordarme mi capacidad y empujarme a seguir adelante hasta alcanzar este sueño.

A mis hermanitas, por cada risa, chiste y anécdota que me devolvió la energía en días de cansancio.

Y a mi hermoso bebé, Milán. Mi abrazo más cálido, mi fuente de amor y mi compañero en estos nuevos sueños. A ti, que duermes a mi lado mientras trabajo y llenas mis pausas de alegría, te dedico este logro con todo mi corazón.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudiarán los desafíos ambientales relacionados con la producción de salmueras residuales en procesos de desalinización y se evaluarán distintas opciones para su reaprovechamiento en un marco de economía circular. En este mismo contexto mundial, caracterizado por la falta de agua, el cambio climático y la alta demanda de este recurso, las plantas de desalinización se han transformado en una solución esencial para garantizar el abastecimiento de agua potable. No obstante, su funcionamiento produce grandes cantidades de salmueras con elevadas concentraciones de sales, altas temperaturas y sustancias químicas, capaces de ocasionar efectos importantes en ecosistemas marinos y suelos agrícolas si no se manejan de forma adecuada.

El trabajo detalla las tecnologías más importantes de desalinización, abarcando tanto las térmicas como las de membrana, y subraya la ósmosis inversa como la más empleada en la actualidad, a pesar de producir considerables volúmenes de salmuera. Se describe la composición química habitual de estas descargas, que incluye altos niveles de sodio, magnesio, calcio, potasio, litio, boro y otros elementos, varios de los cuales tienen potencial de recuperación y valor en la industria. Además, se examinan los impactos ambientales más relevantes relacionados con el vertido de salmueras, como la modificación de la salinidad, variaciones en la microbiota marina y el impacto en la biodiversidad costera.

Se presentan varias opciones para la reutilización de salmueras, centrándose en su viabilidad técnica, económica y ambiental. Entre las más relevantes se encuentran: la producción de energía a partir de diferencias de salinidad; el aprovechamiento de salmueras en acuicultura y el cultivo de micro y macroalgas, beneficiándose de su elevado contenido mineral; y su aplicación en agricultura bajo condiciones controladas, mediante métodos de dilución, selección de cultivos resistentes y seguimiento de parámetros como conductividad eléctrica y pH. Asimismo, se analizan tecnologías innovadoras para la obtención de sales y minerales a través de cristalización fraccionada, precipitación selectiva o electrodiálisis.

ÍNDICE

RESUMEN	3
SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS	6
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS DEL TRABAJO.	9
GENERAL:	9
ESPECÍFICOS:	9
METODOLOGÍA	10
CAPÍTULO 1: SALMUERAS RESIDUALES.	11
1.1 Proceso de desalinización y generación de salmueras.	11
1.2 Composición química de las salmueras.	12
1.3 Impactos ambientales de las descargas de salmueras.	12
1.4 Alternativas de manejo y reutilización de las salmueras.	13
1.5 Marco normativo y regulatorio.	14
CAPÍTULO 2: VIABILIDAD PARA LA REUTILIZACIÓN DE SALMUERAS RESIDUALES Y EXTRACCIÓN DE MINERALES.	16
2.1 Principios y beneficios de la reutilización de salmueras residuales.	16
2.2 Tecnologías para la reutilización de salmueras	16
2.3.1 Tecnologías físico-químicas tradicionales.	17
2.3.2 Tecnologías emergentes.	17
2.3.3 Tecnologías biológicas y procesos híbridos.	17
2.4 Posibles aplicaciones de salmueras reutilizadas.	17
2.5 Desafíos económicos, técnicos y ambientales.	18
2.5.1 Viabilidad y costos:	18
2.5.2 Barreras técnicas.	18
2.5.3 Barreras sociales y medioambientales.	18
2.5.4 Oportunidades.	18
CAPÍTULO 3: GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE SALMUERAS.	19
3.1 Principios y tecnologías para la generación de energía con salmueras.	19
3.1.1 Principio Base: Gradiente de salinidad.....	19
3.1.2 Tecnologías Principales.	20
3.1.3 Potencial de aplicación en plantas desalinizadoras.	20
3.2 Estudio de Casos y Aplicaciones Prácticas.	21
3.3 Potencial Energético en Chile.	21
3.4 Retos Técnicos y Ambientales.	22

CAPÍTULO 4: USO DE SALMUERAS EN ACUICULTURA Y CULTIVO DE ALGAS.....	23
4.1 Potencial de salmueras como medio para acuicultura.....	23
4.2 Cultivo de macroalgas y microalgas con salmueras.....	23
4.3 Beneficios económicos y ambientales.....	24
4.4 Riesgos y manejo para evitar impactos negativos.....	25
4.5 Proyectos pilotos.....	26
CAPÍTULO 5: USO DE SALMUERAS EN CULTIVOS AGRÍCOLAS.....	27
5.1 Aplicación directa y dilución para riego con salmueras.....	27
5.2 Impactos sobre el suelo y cultivos.....	27
5.3 Técnicas de mitigación y manejo sostenible.....	28
5.4 Experiencias pilotos y proyección a largo plazo.....	29
CAPÍTULO 6: USO DE SALMUERAS COMO FERTILIZANTE MINERAL EN AGRICULTURA CONTROLADA.....	31
6.1 Concepto y ventajas de la agricultura controla con salmueras.....	31
6.2 Composición nutritiva de las salmueras u potencial fertilizante.....	31
6.3 Aplicaciones prácticas en cultivos hidropónicos y acuapónicos.....	31
6.4 Desafíos y consideraciones para su implementación.....	32
6.5 Casos y estudios relevantes.....	33
CAPÍTULO 7: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN DE SALMUERAS.....	34
7.1 Criterios para la evaluación.....	34
7.2 Evaluación de alternativas de reutilización de salmueras.....	35
7.3 Estrategias de implementación de alternativas combinadas de reutilización de salmueras.....	35
CAPÍTULO 8: PROYECCIONES FUTURAS Y RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REUTILIZACIÓN DE SALMUERAS EN CHILE.....	37
8.1 Proyecciones tecnológicas a corto y mediano plazo.....	37
8.2 Visión a largo plazo: tecnologías híbridas y biotecnologías.....	37
8.3 Marco normativo y regulatorio.....	37
8.4 Estrategias para la innovación y colaboración intersectorial.....	38
8.5 Educación y sensibilización.....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

SIGLAS

MSF	:	Multi-Stage Flash (Destilación multietapa)
MED	:	Multiple Effect Distillation (Evaporación multiefecto)
PRO	:	Pressure Retarded Osmosis (Ósmosis de presión retardada)
RED	:	Reverse Electrodialysis (Electrodiálisis inversa)
FO	:	Forward Osmosis (Ósmosis directa)
NF	:	Nanofiltration (Nanofiltración)
OARO	:	Multi-Stage Flash (Destilación multietapa)
CAPEX	:	Operational Expenditure (Costos operacionales)
OPEX	:	Operational Expenditure (Costos operacionales)
STD	:	Sólidos Totales Disueltos
CE	:	Conductividad Eléctrica
IDA	:	International Desalination Association
PNUD	:	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
CNR	:	Comisión Nacional de Riego
UNEP	:	United Nations Environment Programme
FAO	:	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INIA	:	Instituto de Investigaciones Agropecuarias
IEA	:	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
WWAP UNESCO	:	World Water Assessment Programme de UNESCO
RCA	:	Resolución de Calificación Ambiental
SMA	:	Superintendencia del Medio Ambiente

SIMBOLOGÍAS

g/L	:	Gramos por litro
mg/L	:	Miligramos por litro

‰ : por mil (salinidad)

% : Porcentaje

TW : teravatios

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua dulce cada vez se vuelve más crítica a nivel mundial debido a factores como el aumento de la densidad poblacional, cambio climático, sobreexplotación de acuíferos y la contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas. Según el Programa Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), considera muy probable que para el año 2050, más de la mitad de la población global se encuentre viviendo en zonas que posean una grave escasez de agua. Bajo este mismo escenario, es que se han buscado alternativas para garantizar la seguridad hídrica, especialmente en regiones áridas y semiáridas, como una prioridad estratégica.

En la actualidad, la ósmosis inversa es la tecnología más común en las nuevas plantas desaladoras. No obstante, esta tecnología también ha dejado un desafío ambiental importante: la generación de salmueras residuales.

El mecanismo actual más utilizado para la disposición final de las salmueras residuales, es la descarga directa al mar u otro tipo de cuerpos de agua, utilizando sistemas de dispersión para minimizar el impacto localizado. La estrategia utilizada se encuentra bajo escrutinio constante por parte de organismos ambientales, comunidades costeras y científicas, ya que se está buscando impulsar soluciones sostenibles que permitan mitigar los impactos ambientales generados por la desalinización.

Bajo este mismo concepto, podemos decir que la reutilización de salmueras ha comenzado a posicionarse como un campo emergente de innovación tecnológica y de economía circular. El presente trabajo tiene como objetivo analizar, evaluar y proponer alternativas para la reutilización de salmueras, considerando su viabilidad técnica, económica y ambiental.

OBJETIVOS DEL TRABAJO.

GENERAL:

Promover un enfoque de gestión circular y mitigar impactos ambientales asociados a la disposición de las salmueras generadas en plantas de desalinización de agua, donde se analizarán y evaluarán alternativas tecnológicas y potenciales aplicaciones para la reutilización de las salmueras residuales producidas en plantas desalinizadoras, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental, con especial énfasis en el contexto nacional.

ESPECÍFICOS:

1. Caracterizar las salmueras residuales producidas por plantas desaladoras en Chile.
2. Identificar y analizar tecnologías disponibles y emergentes para su reutilización.
3. Evaluar el potencial de las salmueras en minería, energía, acuicultura y agricultura, considerando criterios ambientales y socioeconómicos.
4. Proponer recomendaciones y proyecciones para la implementación sostenible de estas estrategias en Chile.

METODOLOGÍA

El presente trabajo analiza el problema ambiental relacionado con la producción de salmueras residuales en los procedimientos de desalinización y ofrece un análisis exhaustivo de opciones para su reaprovechamiento en un marco de economía circular. Las plantas desalinizadoras se han vuelto una herramienta esencial para garantizar el abastecimiento de agua dulce en un entorno mundial caracterizado por la falta de agua, el cambio climático y la demanda creciente del líquido. No obstante, si no se manejan de manera apropiada, su funcionamiento produce cantidades enormes de salmueras con concentraciones elevadas de sales, temperatura alta y compuestos químicos, lo cual tiene el potencial de causar efectos importantes en los ecosistemas marinos y en los terrenos agrícolas.

Se mencionan tecnologías de desalinización importantes, que incluyen tanto las térmicas como las de membrana. Se destaca la ósmosis inversa como la tecnología con mayor uso en nuestros días, a pesar de que produce flujos significativos de salmuera. Se describe la constitución química típica de estas descargas, que contienen cantidades altas de calcio, potasio, litio, sodio, magnesio, boro y otros componentes. Muchos de ellos tienen un valor industrial y potencial de recuperación. También se examinan los efectos ambientales más importantes del vertido de salmueras, como la modificación de la salinidad, el impacto en la biodiversidad costera y las alteraciones en la microbiota marina.

Se ofrecen diferentes opciones para reciclar salmueras, destacando su factibilidad en términos técnicos, económicos y medioambientales. Además, se analizan tecnologías emergentes para recuperar sales y minerales a través de métodos como la electrodiálisis, la cristalización fraccionada o la precipitación selectiva.

La investigación abarca una comparación de estas opciones, tomando en cuenta criterios como la viabilidad técnica, el impacto ambiental, los beneficios económicos y sociales, la capacidad de escalar y los plazos para la implementación. Se deduce que, pese a que múltiples tecnologías necesitan una inversión inicial, investigación aplicada y mejoras en la regulación, su potencial es importante para avanzar hacia un modelo hídrico sostenible en Chile.

Por último, el texto expone sugerencias y perspectivas, resaltando la importancia de robustecer el marco regulatorio nacional, impulsar la investigación a nivel regional, implementar pilotos en áreas costeras y promover colaboraciones entre lo público y lo privado. Se propone una perspectiva a largo plazo en la que las salmueras dejan de ser un desecho problemático y se transforman en un recurso estratégico para nuevas industrias, el desarrollo sostenible del país y la resiliencia hídrica.

CAPÍTULO 1: SALMUERAS RESIDUALES.

Las salmueras residuales corresponden a líquidos de descarte cuya característica distintiva es su elevada concentración de sales disueltas. Se originan como subproducto en múltiples procesos, tanto industriales como naturales, en los cuales se busca remover las sales y otros contaminantes presentes en el agua. Estas corrientes hipersalinas pueden generarse en contextos tan diversos como la minería, la producción de alimentos o la industria química. No obstante, una de las fuentes más significativas, y que ha despertado mayor preocupación a nivel global, es la que proviene de los procesos de desalinización del agua.

1.1 Proceso de desalinización y generación de salmueras.

Para la eliminación de la sal y otras impurezas del agua salobre o marina, se realiza un proceso de desalación que la hace apta para el consumo humano, el uso agrícola o industria. Para esto, existen diferentes tecnologías que pueden utilizarse y se clasifican en dos grandes grupos.

- Procesos térmicos: separan las sales por medio de la evaporación del agua para su posterior condensación.
- Procesos de membrana: utilizan presión para forzar el paso de agua a través de membranas semipermeables en donde quedan retenidas las sales y otras impurezas.

<i>Tecnología</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<i>Ósmosis inversa</i>	Filtrado de agua a alta presión a través de membranas semipermeables.	Alta eficiencia energética. Modular.	Genera grandes volúmenes de salmueras. Membranas costosas.
<i>Destilación multi etapa (MSF)</i>	Evaporación secuencial del agua y condensación en varias etapas.	Durabilidad. Confiabilidad.	Alto consumo energético. Efluentes
<i>Evaporación relámpago multi efecto (MED)</i>	Múltiples efectos de evaporación y condensación.	Eficiencia térmica superior a MSF.	Menos modularidad. Inversión inicial alta.
<i>Electrodialisis inversa</i>	Separación de sales mediante membranas cargadas eléctricamente.	Útil para aguas salobres.	Menor eficiencia en agua de mar. Alto costo.

Tabla 1: Principales procesos de desalinización y sus características operativas. La tabla resume las tecnologías más utilizadas a nivel mundial, incluyendo su principio de funcionamiento, eficiencia, consumo energético y volumen estimado de salmuera generada. La información se basa en datos de organismos internacionales como la International Desalination Association (IDA) y estudios técnicos recientes, permitiendo comparar de forma sintética el impacto y viabilidad de cada proceso en diferentes contextos.

1.2 Composición química de las salmueras.

Las salmueras que son producidas por los procesos de desalación, están principalmente compuestas por sales concentradas y otros compuestos disueltos que son el resultado de la separación de agua dulce a partir de fuentes de agua de mar o salobre.

La composición química de las salmueras depende de múltiples factores, como:

- Procedencia de las aguas de alimentación (salobres, mar o mezcla).
- Ubicación geográfica y características oceanográficas.
- Tecnología y condiciones de las tecnologías de desalinización empleada.
- Uso de productos químicos en el pre y post tratamiento.

En términos generales, las salmueras presentan una salinidad que suele oscilar entre los 55 y 80 g/L, lo cual representa aproximadamente el doble de la salinidad típica del agua de mar. Asimismo, los sólidos disueltos totales (STD) en el agua de mar suelen encontrarse entre los 35.000 y 38.000 mg/L, mientras que en las salmueras estas concentraciones pueden superar los 70.000 mg/L, dependiendo de la tecnología empleada y las condiciones del proceso.

Entre los componentes más relevantes podemos encontrar:

Elemento/Compuesto	Concentración típica en salmuera (mg/L)	Potencial de aprovechamiento
<i>Cloruro de sodio (NaCl)</i>	50.000 – 70.000	Producción de sal industrial y alimentaria
<i>Magnesio (Mg²⁺)</i>	2.000 – 4.000	Producción de MgO, industria química y refractaria
<i>Potasio (K⁺)</i>	500 – 1.000	Fertilizantes
<i>Calcio (Ca²⁺)</i>	1.000 – 2.500	Industria de la construcción y química
<i>Bromuros (Br⁻)</i>	60 – 100	Industria farmacéutica y química
<i>Litio (Li⁺)</i>	0,2 – 1,0	Baterías de ion-litio
<i>Boro (B)</i>	4 – 10	Vidrio y cerámica

Tabla 2: Tabla con las concentraciones de compuestos y elementos en salmueras provenientes de plantas desalinizadoras.

Saber la composición de las salmueras nos permite determinar su impacto ambiental y su potencial de aprovechamiento en la obtención de productos de valor agregado, como minerales, sales industriales, materia prima para la generación de energía, entre otros.

1.3 Impactos ambientales de las descargas de salmueras.

El vertido de las salmueras producidas en procesos de desalinización, representan uno de los principales desafíos asociados al uso de estas tecnologías para la obtención de agua dulce, debido a su alta salinidad, posible incremento de temperatura y presencia de compuestos químicos. Las descargas, son capaces de generar alteraciones físico-químicas significativas en los ecosistemas marinos y costeros, principalmente en zonas donde la

profundidad es baja o la circulación de corrientes es escasa y, por ende, la dispersión es limitada.

Uno de los impactos más notorios es el aumento de la salinidad. Mientras que el mar posee un promedio de 35 g/L de sales disueltas, las salmueras pueden llegar a contener entre 65 y 80 g/L, alcanzado el doble o triple de su concentración. Esta diferencia produce una alteración del equilibrio osmótico de los organismos marinos más sensibles, pudiendo provocar su mortalidad y afectar la base de la cadena trófica.

En casos donde el proceso de desalinización es térmico, la descarga de las salmueras puede realizarse con temperaturas superiores a las del entorno, intensificando el estrés fisiológico de la fauna y flora marina. A esto, debemos sumarle que también hay presencia de residuos biocidas, coagulantes, anti-escalantes y agentes de limpieza, que podrían impedir o limitar el crecimiento de micro-algas, reducir la biodiversidad y, además, favorecer la bioacumulación de contaminantes en especies de mayor tamaño, con riesgos para la pesca y el consumo humano.

Áreas donde la energía marina es baja, la microbiota bentónica se puede ver modificada, reduciendo así la productividad biológica del fondo marino, como consecuencia de la acumulación de sales en los sedimentos. Además, al no haber una dispersión adecuada, se forman las denominadas "plumas" hipersalinas –zonas con mayor salinidad –que se concentran en capas profundas, disminuyendo el oxígeno disuelto y generando zonas hipóxicas que limitan la supervivencia de especies filtradoras y bentónicas.

Estudios realizados en diversas zonas, como el Mediterráneo, Golfo Pérsico y la costa chilena, han evidenciado cambios en la diversidad biológica, desplazamiento de especies y alteraciones en los ciclos marinos, como consecuencia directa de la descarga de salmueras, lo que reafirma la necesidad urgente de hacernos responsables del manejo ambiental en estas operaciones.

1.4 Alternativas de manejo y reutilización de las salmueras.

Generalmente, las salmueras son vistas únicamente como un residuo problemático, cuyo final suele ser su descarga directa al mar u otros cuerpos de agua, con los impactos ambientales ya vistos anteriormente. Sin embargo, un enfoque más sostenible y amigable con el medio ambiente, además de estar alineado con la economía circular, propone tratar a las salmueras como un recurso con valor agregado.

No es imposible abrirle oportunidades en distintos sectores productivos si se aprovechan las características físico-químicas que poseen, tales como su alta salinidad y concentración de ciertos minerales. Esta nueva visión no sólo va a permitir minimizar la presión ambiental sobre los ecosistemas receptores, sino que también genera beneficios económicos, diversifica la producción local y contribuye a la seguridad alimentaria y energética de las comunidades que se encuentran contiguas a las plantas desalinizadoras.

Entre las opciones de mayor interés, destacan las siguientes:

En acuicultura, es posible transformar las salmueras en materia prima para el cultivo de organismos marinos, adaptando su salinidad para, posteriormente, integrarla en sistemas de cría de peces, moluscos o algas. Un ejemplo muy común en donde se utilizan aguas salobres en este sector industrial, es en la granja de camarones.

La agricultura, puede hacer usos controlados de salmueras diluidas como una alternativa de riego de especies vegetales tolerantes a la sal, como las halófitas, que pueden emplearse como alimento humano o forraje para la ganadería en zonas áridas.

Otra alternativa innovadora, es aquella que aprovecha el gradiente salino entre una salmuera y el agua dulce, para la generación de energía.

Finalmente, la extracción de minerales ofrece un campo de gran proyección, ya que las salmueras contienen concentraciones apreciables de cloruro de sodio, magnesio potasio, litio y otros oligoelementos.

1.5 Marco normativo y regulatorio.

La gestión de las salmueras está ligada directamente al marco normativo vigente, que varía dentro de cada país. Sin embargo, desde que la desalinización se ha vuelto una alternativa clave para los problemas de escasez hídrica, la ausencia de regulaciones específicas para su manejo representa una brecha crítica para la sostenibilidad del proceso.

En Chile, aunque no existen normativas exclusivas para salmueras, sí hay instrumentos regulatorios aplicables desde la perspectiva de calidad de efluentes líquidos, uso del borde costero y evaluación ambiental de proyectos.

- Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente: exige que toda planta desalinizadora se someta al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).
- D.S. N.º 90/2000 (MMA): fija normas de emisión para descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales.
- Código de Aguas: regula el uso del agua de mar y las concesiones marítimas para instalaciones costeras.

Desafíos normativos actuales:

- Falta de límites específicos para salinidad en descargas marinas.
- Necesidad de estándares claros para el reúso de salmueras en agricultura y acuicultura.

- Incorporación de exigencias para planes de valorización en lugar de su simple vertido.

CAPÍTULO 2: VIABILIDAD PARA LA REUTILIZACIÓN DE SALMUERAS RESIDUALES Y EXTRACCIÓN DE MINERALES.

Las plantas desaladoras, tanto de osmosis inversa como de destilación multi-etapa, son grandes generadores de salmueras residuales que se caracterizan por su alta concentración de sales y minerales. Este subproducto que suele ser considerado problemático debido a los impactos ambientales que se le atribuyen al ser descargados en cuerpos marinos o terrestres. Sin embargo, dado al enfoque actual de la economía circular y el creciente interés por la valorización de residuos industriales, se ha impulsado la búsqueda de alternativas para reutilizar las salmueras como fuentes de recursos y energía.

Al reutilizar las salmueras no sólo se lograría disminuir los impactos ambientales de la desalinización, sino que también es capaz de ofrecer beneficios económicos a través de la recuperación de minerales de valor comercial y la implementación de procesos sostenibles con menor huella hídrica y energética.

2.1 Principios y beneficios de la reutilización de salmueras residuales.

El principio fundamental radica en la capacidad de transformar un residuo concentrado en una fuente secundaria de recursos. Este enfoque permite promover la sostenibilidad al ser capaz de reducir la presión sobre las fuentes naturales de minerales, mitigar la contaminación por vertidos y fomentar la autosuficiencia de las plantas desaladoras mediante la recuperación de energía y materiales.

Beneficios principales:

1. Ambientales
 - Reducción del impacto ecológico relacionado con el vertido directo de salmueras en el mar o en suelos costeros.
 - Disminución de la demanda de extracción minera tradicional y, en consecuencia, del deterioro del territorio.
 - Oportunidad de cerrar los ciclos de materiales, colaborando con la administración integrada del recurso hídrico.
2. Económicos:
 - Producción de subproductos que tienen valor comercial (K, NaCl, B, Ca, Li y Mg).
 - Ahorro en gastos de tratamiento y disposición de desechos.
 - Desarrollo de nuevas posibilidades comerciales y variedad en la producción.
3. Sociales y tecnológicos:
 - Fomento de la innovación tecnológica y generación de trabajos ecológicos.
 - Fomento de prácticas industriales que sean sostenibles y de economía circular.
 - Capacidad de integración con las industrias acuícolas, energéticas y agrícolas.

2.2 Tecnologías para la reutilización de salmueras.

Existen diversas tecnologías que permiten la valorización de las salmueras, cuya clasificación depende del tipo de compuestos que se desee recuperar y el grado de concentración deseado y la escala de aplicación.

2.3.1 Tecnologías físico-químicas tradicionales.

- **Cristalización y evaporación:** Procesos térmicos que eliminan el agua y posibilitan la creación de cristales de sales concretas. Son efectivos, pero consumen mucha energía.
- **Precipitación química selectiva:** Empleo de reactivos para provocar que ciertos minerales precipiten, lo cual hace más fácil su extracción.
- **Adsorción e intercambio iónico:** Son métodos de captura selectiva de iones valiosos, que son particularmente útiles para los elementos traza.

Estas técnicas son eficaces, pero tienen restricciones en términos de medio ambiente y economía debido a su alto coste energético y a su necesidad de reactivos.

2.3.2 Tecnologías emergentes.

Aunque las tecnologías todavía están en fase piloto, han demostrado tener un gran potencial para su uso en la industria y la minería, a pesar de que los avances tecnológicos han permitido nuevos procesos con más eficacia y menos impacto medioambiental.

- **Cristalización fraccionaria:** Separación de sales por orden, basándose en su solubilidad, para conseguir productos más puros.
- **Electrodiálisis:** Empleo de campos eléctricos y membranas para separar iones, lo que posibilita la concentración o purificación de sales particulares.
- **Membranas de alta tecnología (nanofiltración, ultrafiltración):** Disminuyen el consumo de energía en comparación con los procesos térmicos y brindan mayor selectividad.

2.3.3 Tecnologías biológicas y procesos híbridos.

Si bien estas soluciones tienen un impacto ambiental reducido, todavía necesitan ser investigadas para que puedan hacerse a escala industrial.

- **Organismos que soportan la salinidad:** Algas y microorganismos que tienen la capacidad de vivir en entornos salinos y acumular metales traza (como níquel, litio o cobre), lo que posibilita su recuperación más tarde.
- **Biorremediación:** Empleo de microorganismos para disminuir contaminantes o optimizar la calidad del agua residual.
- **Procesos de concentración a nivel biológico:** Fusionan métodos físicos con actividad microbiana, lo que incrementa la eficacia de la recuperación mineral.

2.4 Posibles aplicaciones de salmueras reutilizadas.

Gracias a las variadas combinaciones químicas de las salmueras, estas pueden ser utilizadas en una diversidad de áreas productivas:

1. **Agricultura:** uso en cultivos halófitos o que toleran una alta salinidad; fabricación de fertilizantes minerales que provienen del Ca, Mg o K.
2. **Acuicultura:** utilización de salmueras diluidas en la crianza de especies marinas o en sistemas de cultivo combinados (IMTA).
3. **Fertilizantes minerales:** Producción de compuestos como el sulfato potásico (K_2SO_4) o el cloruro magnésico ($MgCl_2$).
4. **Producción de energía:** utilización del gradiente salino para generar energía electroquímica u osmótica a través de membranas selectivas.
5. **Recuperación de sales y minerales:** adquisición de magnesio, sodio, litio, boro y potasio, entre otros componentes, para ser utilizados como materias primas en la industria.

2.5 Desafíos económicos, técnicos y ambientales.

El reciclaje de salmueras se enfrenta a grandes retos, pese a su potencial para valorizarse:

2.5.1 Viabilidad y costos:

- Gastos iniciales elevados (CAPEX): infraestructura, membranas de última generación y sistemas de control.
- Costos operativos (OPEX): reactivos químicos y energía.
- Viabilidad técnica: está fuertemente influenciada por la composición de la salmuera y el alcance del proyecto.
- Viabilidad económica: la competitividad frente a la minería tradicional continúa siendo restringida, pero el valor agregado y las ventajas medioambientales aumentan su rentabilidad en general.

2.5.2 Barreras técnicas.

- La composición química varía dependiendo de la procedencia del agua.
- Problemas para extraer metales en concentraciones bajas.
- Ausencia de tecnologías de separación que sean muy selectivas y cuesten poco energéticamente.

2.5.3 Barreras sociales y medioambientales.

- Peligro de producir residuos secundarios o concentrados que sean peligrosos.
- Se requiere la creación de normas claras en torno a la reutilización de salmueras.
- En áreas costeras, la desalinización tiene una aceptación social restringida.

2.5.4 Oportunidades.

- La integración de sistemas híbridos (que combinan lo biológico con lo fisicoquímico).
- Promoción de asociaciones entre el sector público y privado para proyectos experimentales.
- Desarrollo de regulaciones específicas que promuevan la reutilización como componente de una administración del agua sustentable.

CAPÍTULO 3: GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE SALMUERAS.

Como ya hemos visto antes, las salmueras provenientes de plantas desalinizadoras poseen una concentración que puede llegar a contener hasta el doble de las concentraciones salinas que tiene el agua marina de entrada, lo que no solo plantea un riesgo ambiental por su disposición, sino también la oportunidad de obtener energía renovable.

La generación de energía a partir de gradientes de salinidad, también se denomina "Energía azul" o "Blue Energy" en inglés, aprovecha la diferencia de concentraciones iónicas entre soluciones salinas y agua dulce, transformando este potencial en energía eléctrica o mecánica utilizable. Si bien es cierto estas tecnologías aún se encuentran en desarrollo, sus aplicaciones podrían tener el potencial de mejorar la eficiencia de las plantas desalinizadoras, reduciendo costos operativos y contribuir a la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles.

3.1 Principios y tecnologías para la generación de energía con salmueras.

El principio fundamental de esta tecnología radica en el gradiente de salinidad. Al haber dos soluciones con distinta concentración que se ponen en contacto por medio de membranas semipermeables o de intercambio iónico, se produce una permuta espontánea de agua y de iones. Este fenómeno se denomina energía osmótica y permite que se transforme el desequilibrio químico en energía aprovechable.

Se han desarrollado diversos estudios a nivel global para obtener resultados estimativos del potencial energético mundial aprovechable a partir del gradiente de salinidad, situándolo en el rango de 1 a 2 TW, el equivalente al 10-15% de la demanda eléctrica global actual. Estos estudios se han realizado principalmente en Países Bajos, liderados por la Wetsus Centre of Excellence for Sustainable Water Technology y la Universidad de Wageningen que calcularon la capacidad energética global de los estuarios y del encuentro entre ríos y océanos. Así mismo, proyectos japoneses como el Mega-ton Water System en Fukuoka, confirmaron la viabilidad de integrar estas tecnologías en plantas desalinizadoras, donde podrían llegar a cubrir hasta un 10-25% de la demanda de energía interna. A escala mundial, entidades como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y el Programa de Evaluación del Agua Mundial (WWAP-UNESCO) han corroborado estos cálculos, identificando a la llamada energía azul como una fuente en auge dentro del conjunto de energías marinas renovables.

Este principio puede ser logado con diversos mecanismos y tecnologías.

3.1.1 Principio Base: Gradiente de salinidad.

- Diferencia osmótica entre agua dulce y salmuera concentrada.
- Generación de flujo de agua o iones a través de membranas.
- Conservación de dicho flujo en energía mecánica o eléctrica.

Los mecanismos más relevantes son:

1. Ósmosis de Presión Retardada (PRO): donde el agua dulce atraviesa una membrana hasta llegar a la salmuera, donde genera presión hidráulica que luego es convertida en electricidad.
2. Electrodialisis Inversa (RED): por medio de membranas de intercambio iónico, los iones migran generando corriente eléctrica directa.

3.1.2 Tecnologías Principales.

A continuación, se presenta una tabla que muestra un resumen comparativo de diversas tecnologías analizadas para el tratamiento y aprovechamiento de salmueras generadas en plantas de desalinización. Se evalúan parámetros de eficacia, gastos, nivel de avance tecnológico, capacidad de uso y obstáculos reconocidos.

TECNOLOGÍA	PRINCIPIO	VENTAJAS	LIMITACIONES	ESTADO ACTUAL
PRO	Presión osmótica + turbina	Alta eficiencia teórica, integración en desalinizadoras	Biofouling, membranas costosas	Pilotos en Noruega y Japón
RED	Flujo iónico en membranas	Produce electricidad directa, modular	Incrustaciones, costo de membranas	Pilotos en Países Bajos, Israel
TERMOELÉCTRICA	Evaporación y ciclos térmicos	Aprovecha calor residual, adaptable a climas cálidos	Requiere gran superficie	Escala piloto
SALT GRADIENT PONDS	Estratificación salina + calor solar	Almacenamiento de energía, simple	Requiere gran terreno, evaporación	Aplicado en India, Israel
HÍBRIDAS (PRO+RED)	Combinación	Mayor eficiencia	Costos de integración	Investigación

Tabla 3: Comparación de tecnologías para el aprovechamiento de salmueras.

3.1.3 Potencial de aplicación en plantas desalinizadoras.

En plantas de desalinización donde la tecnología empleada es la ósmosis inversa, es posible presenciar un consumo energético que oscila entre un 30 y 50% del total de sus costos operativos totales. Es por este factor hace que la expansión de la desalinización se ve frenada como una solución sostenible frente a la escasez hídrica. Sin embargo, es el mismo proceso quien le otorga la oportunidad de recuperar parte de la energía invertida.

Una planta desaladora, puede convertir, en promedio un 40 a 60% del agua de entrada en agua dulce, mientras que la otra parte, es expulsada como salmuera con una concentración salina aproximadamente del doble de la inicial. Este flujo, que lejos de ser un residuo simple, constituye un recurso energético de alto potencial cuando se combina con un agua de menor salinidad, ya sea de mar, río, efluentes tratados o incluso agua dulce.

Existen proyectos pilotos en distintas partes del mundo que han demostrado resultados prometedores al aplicar tecnologías como la ósmosis de Presión Retardada y la Electrodiálisis Inversa para transformar parte del gradiente salino en energía aprovechable.

La integración de estos sistemas sería capaz de reducir costos operativos y la huella ambiental asociada al vertido de las salmueras, además de funcionar como un motor hacia el camino de la sostenibilidad.

3.2 Estudio de Casos y Aplicaciones Prácticas.

A nivel internacional, hay proyectos que aún se encuentran en etapa piloto o experimental.

1. Sistema de Agua Mega-ton - Proyecto Híbrido en Fukuoka, Japón
 - Aplicada tecnología: Sistema híbrido RO-PRO (ósmosis inversa + ósmosis ralentizada por presión).
 - Información y éxitos: En Fukuoka, este proyecto utiliza salmuera proveniente de las plantas de tratamiento en combinación con agua residual de baja densidad. En los ensayos, logró una densidad de potencia de 13 W/m² al usar módulos de fibra hueca.
 - Valor técnico: El Mega-ton System fusiona procesos complementarios, lo que le facilita no solo la recuperación de energía, sino también la gestión de flujos de agua residual, mejorando así su eficiencia y funcionalidad en el ámbito aplicable.

2. Sistema de Agua Mega-ton - Proyecto Híbrido en Fukuoka, Japón
 - Tecnología Aplicada: Sistema híbrido RO-PRO (ósmosis inversa + ósmosis ralentizada por presión).
 - Información y éxitos: En Fukuoka, este proyecto utiliza salmuera proveniente de las plantas de tratamiento en combinación con agua residual de baja densidad. En los ensayos, logró una densidad de potencia de 13 W/m² al usar módulos de fibra hueca.
 - Valor técnico: El Mega-ton System fusiona procesos complementarios, lo que le facilita no solo la recuperación de energía, sino también la gestión de flujos de agua residual, mejorando así su eficiencia y funcionalidad en el ámbito aplicable.

3.3 Potencial Energético en Chile.

Chile posee una ventaja estratégica:

- Amplia costa y acceso al agua de mar como recurso principal.
- Crecimiento rápido de plantas desalinizadoras, sobre todo en el norte del país, donde la minería y la falta de agua requieren respuestas sostenibles.

Aplicaciones potenciales:

- Unir PRO y RED en instalaciones actuales para disminuir el consumo de energía.
- Asignar la energía producida a procesos secundarios (bombas, pretratamientos).
- Fomentar la investigación práctica en universidades y centros tecnológicos del país.

El potencial de Chile se basará en el examen de:

- Cantidad y calidad de salmueras producidas.
- Accesibilidad de agua dulce para crear gradientes.
- Análisis de costos en comparación con otras energías renovables como la solar o la eólica.

3.4 Retos Técnicos y Ambientales.

La ejecución enfrenta obstáculos significativos:

- Avance tecnológico: optimizar la resistencia y efectividad de membranas.
- Gastos de implementación: alta inversión inicial en insumos y funcionamiento.
- Manejo de desechos: acumulación de sales y metales que puede provocar contaminación secundaria.
- Efecto ambiental: urgencia de reducir la influencia en ecosistemas acuáticos.

Vencer estas dificultades será fundamental para que la energía de salmueras se transforme en una opción viable y complementaria en el marco de la crisis del agua y la transición energética en Chile.

CAPÍTULO 4: USO DE SALMUERAS EN ACUICULTURA Y CULTIVO DE ALGAS.

4.1 Potencial de salmueras como medio para acuicultura.

La presencia de sales y minerales en las salmueras residuales es posible aprovecharla en sistemas de acuicultura marina, para contribuir a la disminución de la extracción de agua de más o agua dulce con el fin de reducir la presión sobre los ecosistemas costeros y favoreciendo la transición hacia una economía circular del agua.

Una gran variedad de estudios han sido capaces de demostrar que especies como el *Litopenaeus vannamei* (camarón blanco del Pacífico), *Oreochromis niloticus* (tilapia del Nilo, en su variante marina) y moluscos bivalvos son capaces de tolerar e, incluso, prosperar en aguas con alta salinidad, siempre y cuando se tenga un control estricto de la concentración de salina y los metales pesados. Por ejemplo, una investigación realizada en Brasil evidenció que los juveniles de *L. vannamei*, cultivados en un sistema súper intensivo sin intercambio de agua, a salinidades que oscilan entre 4 ‰ y 32 ‰, alcanzaron tasas superiores de supervivencia y retención de proteínas al nivel más elevado (32 ‰). Otros estudios han registrado que esta especie es capaz de soportar salinidades de 0,5 ‰ a 50 ‰.

En Medio Oriente y Asia se han desarrollado experiencias piloto donde las salmueras han sido integradas en granjas acuícolas, reduciendo costos en suministros y fomentando la reutilización de este recurso. Sin embargo, para que esto sea factible, también es necesario que se realice un tratamiento previo de dilución, ajuste de pH y oxigenación, para poder garantizar la salud de los organismos y evitar fenómenos de estrés osmótico.

4.2 Cultivo de macroalgas y microalgas con salmueras.

Tanto el cultivo de microalgas como el de macroalgas halotolerantes, es una de las aplicaciones más prometedoras para la valorización de las salmueras, pues tiene una doble funcionalidad: producción de biomasa de alto valor y remediación biológica. Esta característica lo convierte en un componente clave dentro de las estrategias de economía circular aplicada a la desalinización.

1. Macroalgas: Existen algas como la *Gracilaria* spp., *Sargassum* spp y *Macrocystis pyrifera*, que son capaces de crecer en ambientes donde la salinidad es elevada siempre que se realice un proceso de adaptación gradual. Estas especies son altamente valoradas en el área industrial por sus múltiples aplicaciones.
 - Industria alimentaria: Elaboración de alginatos, agar y carragenanos.
 - Cosmética y farmacéutica: Obtención de componentes bioactivos y antioxidantes.
 - Agricultura: Aplicación como biofertilizantes y fertilizantes orgánicos.

Además del valor económico que tienen, también son altamente importantes desde el punto de vista ambiental. Estudios que se realizaron en el Golfo Pérsico han podido

demostrar que el cultivo de macroalgas en lagunas alimentadas con salmueras diluidas ha reducido de forma considerable la concentración de nitrógeno y fósforo, dándoles el papel de biofiltros naturales y mitigando impactos de eutrofización.

2. Microalgas: Estas poseen un potencial aún más versátil.

- *Dunaliella salina*: soporta salinidades extremas de hasta 200 ‰ y genera β -carotenos en grandes cantidades, un pigmento de gran importancia en la industria de alimentos y suplementos.
- *Nannochloropsis* spp.: se emplea tanto en acuicultura como alimento vivo como en biocombustibles por su alto contenido de lípidos.
- *Spirulina* spp.: pese a su predilección por aguas alcalinas, ha demostrado su habilidad para ajustarse a fluctuaciones de salinidad, expandiendo así su espectro de cultivo.

Las microalgas son capaces de actuar como biorremediadores naturales, absorbiendo nutrientes como el nitrógeno y fósforo, además de metales traza (cobre y zinc) que se encuentran presentes en las salmueras, reduciendo los riesgos de contaminación marina. Ejemplos en el Golfo Pérsico han evidenciado la efectividad de *D. salina* cultivada en lagunas de evaporación de desalinizadoras. En estas lagunas, no solo se genera biomasa con valor añadido, sino que también se disminuye la cantidad de sales en el vertido.

Sistemas integrados.

En esquemas de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) donde las macroalgas y microalgas han formado parte del proceso, ha sido posible aprovechar al máximo el potencial de las salmueras, ya que los desechos de algunas especies se han transformado en insumos para otras, mientras que las algas van depurando el agua y generando biomasa de interés comercial.

4.3 Beneficios económicos y ambientales.

La reutilización de las salmueras en acuicultura y cultivo de algas representa tanto ventajas económicas como beneficios ambientales de gran relevancia. Una de los principales aportes que se conoce, es la reducción significativa en el consumo de agua dulce, un recurso que, en zonas áridas, donde suelen instalarse las plantas desalinizadoras, escasea más. Al utilizar efluentes salinos directos en vez de extraer nuevas fuentes hídricas, se ha podido disminuir la presión sobre los ecosistemas frágiles, favoreciendo en manejo más eficiente de los recursos que se encuentran disponibles.

Bajo del punto de vista económico, la valorización de las salmueras que suelen ser consideradas un problema ambiental, se han transformado en un insumo de valor agregado en actividades productivas. Para la acuicultura, se crean condiciones propicias para especies marinas que se adaptan a entornos hipersalinos, mientras que en el cultivo de algas se produce biomasa que se utiliza en diversas industrias, tales como la alimentaria,

farmacéutica, cosmética, energética y agrícola. No solo diversifica la matriz de producción, sino que también genera oportunidades de exportación en áreas biotecnológicas en desarrollo.

En términos ambientales, al reutilizar las salmueras en sistemas acuícolas se reduce la descarga directa al mar, que, como consecuencia, va mitigando los riesgos de alteración en ecosistemas bentónicos y de generación de zonas muertas por el exceso de salinidad y nutrientes. Además, al ser integradas a procesos de biorremediación, se favorece la absorción de metales y contaminantes que permiten que la calidad del agua mejore. Es muy posible que este modelo logre tener un impacto positivo en las comunidades costeras, ya que fomentaría la creación de empleos verdes y el desarrollo de tecnologías innovadoras orientadas a la sostenibilidad.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha realizado estimaciones sobre la incorporación de salmueras en sistemas de cultivos de algas, donde ha sido posible estimar que entre un 5 y 15% de los costos operativos podrían reducirse en las plantas desalinizadoras, además de ser capaz de generar nuevas vías de ingreso para la comercialización de biomasa y productos derivados de alto valor. Esto logra confirmar que la gestión integrada de las salmueras no solo sería un beneficio ambiental, sino que podría posicionarse como una estrategia económica viable y alineada con los principios de la economía circular y el desarrollo sustentable.

4.4 Riesgos y manejo para evitar impactos negativos.

Aunque los beneficios son extensos, hay retos técnicos y ambientales que necesitan ser administrados:

1. Incremento de sales y metales dañinos como el magnesio, boro o metales pesados, pueden poner en riesgo la viabilidad de los organismos cultivados. Es necesario un tratamiento inicial a través de filtrado, dilución o intercambio de iones.
2. Variabilidad en la composición de salmueras. Es necesario un seguimiento continuo de los parámetros fisicoquímicos, pues la composición de las salmueras se basa en el tipo de agua utilizada y en el método de desalinización.
3. Proliferación de microorganismos perjudiciales: Se debe tener en cuenta la bioseguridad y regulación microbiana, debido a que el almacenamiento de nutrientes podría promover el desarrollo de algas perjudiciales o patógenas.
4. Contaminación cruzada: Establecer procedimientos de purificación y neutralización química, ya que existe la posibilidad de que las salmueras posean sustancias químicas (anticrustantes, biocidas) que perjudiquen la biota.

Lo correcto es desarrollar sistemas integrados y adaptables, con pruebas piloto anteriores, que fusionen tratamientos físico-químicos y biológicos antes de su uso final en acuicultura o cultivo de algas.

4.5 Proyectos pilotos.

Canarias, España –DESAL+Living Lab

El Instituto Tecnológico de Canarias y la Universidad de Las Palmas han llevado a cabo este proyecto experimental. Se ha establecido como un campo de estudio abierto destinado a la valoración de salmueras, incorporando tecnologías como la ósmosis directa (FO), la nanofiltración (NF) y la ósmosis asistida por presión (OARO). Estos sistemas han permitido concentrar salmueras superiores a 200 g/L con un uso de energía inferior al de procedimientos tradicionales, lo que abre la oportunidad de recuperar sales y minerales de relevancia económica. Adicionalmente, el piloto ha facilitado la experimentación de soluciones de economía circular donde la salmuera deja de ser un residuo y se transforma en un recurso para nuevos usos productivos.

España –Proyecto ALGASAL+

Este caso de estudio se enfoca en el cultivo de algas autóctonas utilizando salmueras derivadas de instalaciones desalinizadoras. La meta principal consiste en utilizar la biomasa algal para usos en las industrias de alimentos, cosméticos, farmacéutica y agrícola, mientras se minimiza el efecto ambiental vinculado a la liberación de salmuera al mar. Este proyecto evidencia la factibilidad de incorporar la acuicultura y la desalinización en un esquema de economía circular, en el que un posible efecto perjudicial se convierte en una oportunidad para la innovación biotecnológica y la sostenibilidad.

Chile –Cultivo de Dunaliella salina en salmueras.

En 2023 se llevó a cabo una prueba piloto en Chile para evaluar el cultivo de Dunaliella salina en salmueras de plantas desalinizadoras con el objetivo de generar β -caroteno. La microalga, capaz de soportar elevadas concentraciones de sal, se desarrolló de forma regulada en sistemas cerrados, evidenciando que se puede convertir un desecho ambiental en un recurso de gran valor comercial y crear un modelo de negocio sostenible y circular.

CAPÍTULO 5: USO DE SALMUERAS EN CULTIVOS AGRÍCOLAS.

5.1 Aplicación directa y dilución para riego con salmueras.

Una estrategia innovadora para enfrentar la escasez hídrica, especialmente en regiones áridas y semiáridas, es el uso de las salmueras residuales en la agricultura. Estas aguas pueden ser aprovechadas en cultivos tolerantes a la salinidad si la concentración de sales es manejada adecuadamente.

Es posible que, si las salmueras se aplican sin un tratamiento previo, puedan provocar un estrés osmótico en las plantas, lo que inhibiría su capacidad de absorción de agua y nutrientes y terminaría por afectar la germinación y desarrollo. Es por esto que se recomienda:

<i>Estrategia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Beneficios</i>
<i>Dilución con agua dulce</i>	Ajuste de la salinidad a niveles compatibles con cada cultivo	Reduce estrés osmótico y protege la productividad
<i>Recuperación selectiva de sales</i>	Extracción de Na ⁺ y Cl ⁻ mediante precipitación o electrodiálisis	Mejora la compatibilidad de la salmuera para cultivos sensibles
<i>Aplicación fraccionada</i>	Riego gradual y controlado	Evita picos de salinidad y estrés transitorio en plantas

Tabla 4: Recomendaciones para la aplicación correcta en cultivos agrícolas.

5.2 Impactos sobre el suelo y cultivos.

El uso no controlado de la concentración de sales en las salmueras en la agricultura, puede ocasionar una serie de impactos negativos, tanto en el suelo como en los cultivos. El primer efecto que puede observarse es la salinización del suelo, un proceso en el que las sales solubles se acumulan en el perfil y, por consecuencia, reducen la filtración y movilidad del agua. Esta condición no solo es capaz de afectar la permeabilidad del suelo, sino que también la estructura que este presenta, dificultando el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes.

Paralelo a esto, la concentración de iones como el sodio y cloruro, pueden provocar toxicidad iónica en las plantas. Un fenómeno que interfiere directamente con la absorción de nutrientes esenciales para las plantas, como lo son el calcio, potasio y magnesio, provocando síntomas como la clorosis, necrosis foliar y, en casos críticos, pérdida temprana de hojas. A nivel fisiológico, el desequilibrio osmótico como producto del exceso de sales, limita la capacidad de las plantas para absorber el agua aún cuando el suelo aparenta tener la humedad suficiente.

Otro aspecto importante que puede verse alterado es la microbiota del suelo pues, cuando se está expuesto a ambientes salinos durante un tiempo prolongado, se modifica la diversidad y la actividad de las bacterias y hongos beneficiosos, los que terminan por

provocar un efecto totalmente contrario al afectar procesos fundamentales como la descomposición de materia orgánica y el reciclaje de nutrientes. Esta pérdida de equilibrio biológico reduce indirectamente la fertilidad que posee de forma natural el suelo, que por consecuencia obliga a depender en mayor medida de fertilización externa.

Finalmente, podemos decir que todos los factores mencionados se ven reflejados en la disminución del rendimiento agrícola. Los cultivos sujetos a la salinidad experimentan disminuciones notables en el proceso de germinación, en el desarrollo vegetal y en la generación final de frutas o cereales. Incluso en especies bastante tolerantes, el riego continuo con salmueras sin una gestión apropiada puede provocar una disminución gradual de productividad y calidad.

Así como se han mencionado los posibles daños que podrían causar las salmueras si no son tratadas de forma adecuada antes de ser aplicadas en a agricultura, es imprescindible mencionar que la magnitud de su impacto también depende de otras variables como el tipo de suelo, clima, frecuencia de riego, las especies cultivadas y las practicas aplicadas en el manejo agronómico. En suelo donde el drenaje es bueno y los cultivos están adaptados a las condiciones salinas, los efectos pueden ser mitigados parcialmente, mientras que en suelos arcillosos y con especies sensibles, el riesgo de deterioro es muy mayor.

5.3 Técnicas de mitigación y manejo sostenible.

Para que esta técnica se convierta en una práctica viable es necesario que se implementen estrategias de manejo sostenible que reduzcan los riesgos de salinización y deterioro del suelo. Estas metodologías funcionan de manera integral, combinando el monitoreo con la selección de cultivos, manejo del suelo y uso de tecnologías avanzadas.

El monitoreo constante de la calidad del suelo y del agua es un aspecto clave, para esto, es necesario la medición constante de la conductividad eléctrica (CE), el pH y la composición iónica para poder ajustar la estrategia de riego y prevenir el exceso de acumulación de sales. Al monitorear la conductividad del suelo, es posible detectar cambios tempranos en la fertilidad del suelo, evitado daños irreversibles en el perfil edáfico.

Otra medida esencial es la selección adecuada de cultivos tolerantes a la salinidad, tales como especies como el vid, olivo, cebada y quínoa, que cuentan con mecanismos fisiológicos que les permiten sobrevivir y mantener niveles productivos en ambientes salinos. Esta adaptación puede deberse a la capacidad de excluir sodio en la absorción radicular hasta la acumulación de solutos compatibles que regulan el equilibrio osmótico interno.

Además, al introducir intervalos de riego que alternan agua dulce y salmuera diluida, logra "lavar" el exceso de sales que se acumulan en la zona radicular, lo que ha permitido que esta técnica se consolide como una acción preventiva.

Paralamente a lo ya menciona, las enmiendas que se realicen al suelo, ya sea por aplicación de yeso agrícola que permite el desplazamiento de sodio intercambiable para mejorar la

estructura y la permeabilidad del suelo, o el aporte de materia orgánica (compost o materia orgánica) para contribuir en la capacidad de retención de agua y aumentar la porosidad y favoreciendo el restablecimiento de la microbiota edáfica, representan un recurso importante.

Otro componente importante para la aplicación de esta tecnología es el drenaje adecuado de sales que se encuentren en exceso en el perfil del suelo, ya sea por medio de sistemas de drenaje superficial o subterráneo que permitan evitar que se concentren en la zona radicular. Si este manejo no es realizado, las prácticas de dilución y alternancia pueden ser insuficientes, sobre todo para suelos arcillosos o con baja infiltración.

Finalmente, herramientas que permiten regular de forma exacta la cantidad de agua y nutrientes suministrados a cada cultivo, como la fertirrigación y la agricultura de precisión, tienen la capacidad de optimizar el uso de las salmueras. A través de sensores, sistemas de riego a distancia y modelaciones de requerimientos de agua, se puede disminuir el derroche y minimizar el efecto adverso de la salinización.

En resumen, estas estrategias no solo reducen los peligros vinculados al riego con salmueras, sino que también favorecen la sostenibilidad agrícola, permitiendo que un desecho de las instalaciones desalinizadoras se convierta en un recurso valioso para la producción de alimentos. No obstante, su puesta en marcha depende de elementos económicos, tecnológicos y sociales, dado que demandan una inversión inicial, formación de los agricultores y un seguimiento continuo para asegurar.

5.4 Experiencias pilotos y proyección a largo plazo.

El constante interés por darle un valor adicional a las salmueras generadas en las plantas desalinizadoras ha impulsado proyectos pilotos que buscan evaluar su viabilidad en sectores estratégicos, como en la agricultura.

Es por esto, que se van a analizar dos proyectos que se han desarrollado con el fin de poder determinar la viabilidad en este sector productivo.

LIFE-DEMO SALHUT –España.

Uno de los ejemplos más sobresalientes, cuyo propósito es investigar la capacidad de la salmuera para el riego de cultivos bajo condiciones reguladas. Este proyecto investiga métodos de dilución y combinación con aguas regeneradas, analizando tanto la reacción agronómica de diversas especies vegetales como las repercusiones en el suelo.

Los estudios lograron evidenciar que, al implementar tácticas de mezcla con aguas regeneradas, los cultivos no solo consiguieron un desarrollo normal, sino que en ciertas situaciones se notó un incremento en la eficacia en la utilización del agua. Además, se observó una reducción en la acumulación de sales en el terreno en comparación con los

sistemas de riego con salmuera sin tratar, lo que subraya la relevancia de una correcta gestión antes de su implementación. Estos descubrimientos resaltan la oportunidad de transformar la salmuera en un recurso agrícola, disminuyendo su efecto en el medio ambiente y produciendo valor productivo.

MIDES (Microbial Desalination for Low Energy Drinking Water) –Consortio Europeo.

Este es otro caso de proyecto significativo que, si bien es cierto inicialmente estaba centrado en la disminución de energía requerida para la desalación, ha incluido pruebas en las que se emplean las corrientes residuales de salmuera como recurso en procesos de agricultura y en la recuperación de nutrientes. La fusión de tecnologías biológicas y electroquímicas ha facilitado la creación de un marco experimental que avala la factibilidad de la utilización agrícola de salmueras, particularmente en cultivos con mayor resistencia a la salinidad.

Las primeras evaluaciones señalaron que la aplicación de biorreactores no solo permitió reducir la cantidad de sales en la salmuera, sino también utilizarla en procesos agrícolas adicionales. Adicionalmente, se notó una recuperación parcial de nutrientes en las corrientes residuales, lo que supone un beneficio extra para la agricultura al disminuir la necesidad de fertilización externa. De forma experimental, ciertos cultivos tolerantes a la salinidad consiguieron sostener un crecimiento apropiado en estas circunstancias, corroborando así la factibilidad de la aplicación en ambientes controlados.

CAPÍTULO 6: USO DE SALMUERAS COMO FERTILIZANTE MINERAL EN AGRICULTURA CONTROLADA.

6.1 Concepto y ventajas de la agricultura controlada con salmueras.

La agricultura controlada se caracteriza por la gestión precisa de las condiciones ambientales y nutricionales para optimizar el crecimiento de los vegetales que pueden encontrarse tanto en invernaderos como en medios de hidroponía y aeroponía. En este contexto, utilizar salmueras que han sido tratadas de forma adecuada y ajustadas, puede convertirse en una fuente innovadora de fertilizantes minerales.

Como principal beneficio, podemos hablar de la recuperación de valiosos minerales que se encuentran presentes en las salmueras –como potasio (K), magnesio (Mg), Calcio (Ca) y micronutrientes– que pueden ser utilizados para formular soluciones nutritivas personalizadas. Así como representa un beneficio para la recuperación de minerales valiosos, también hace posible la reducción a la dependencia de fertilizantes sintéticos y contribuye a la economía circular, valorizando residuos y minimizando el impacto ambiental.

6.2 Composición nutritiva de las salmueras u potencial fertilizante.

En las salmueras podemos encontrar minerales esenciales para el desarrollo de vegetales, como:

- Potasio (K): Elemento clave para la regulación osmótica y metabolismo de la planta.
- Magnesio (Mg): Activador enzimático y componente central de la clorofila.
- Calcio (Ca): Importante para dar estructura a las células y resistencia a enfermedades.
- Micronutrientes: Pese a que se encuentran en concentraciones menores, el hierro, zinc, manganeso y el cobre, son esenciales para funciones metabólicas.

Procesos de separación y ajuste concentraciones, permiten la obtención de estos nutrientes para posteriormente poder ser utilizados en formulaciones nutritivas para cultivos agrícolas controlados, en donde la productividad y calidad dependen esencialmente de la alimentación.

6.3 Aplicaciones prácticas en cultivos hidropónicos y acuapónicos.

Para poder adentrarnos en las aplicaciones que se le pueden dar a los fertilizantes provenientes de las salmueras en los cultivos hidropónicos y acuapónicos, es imprescindible que primero se conozca cómo funcionan cada uno de estos.

En los sistemas de cultivo hidropónico, podemos encontrarnos con que las plantas no se encuentran en un medio de cultivo común como lo es la tierra, sino que sus raíces están suspendidas o apoyadas en un sustrato inerte –perlita, fibra de coco o lana de roca– que

va recibiendo de manera controlada una solución nutritiva disuelta en agua que contiene los sustentos necesarios para su crecimiento. Con este mecanismo es posible optimizar el uso de agua, reducir el uso de pesticidas y aumentar la eficiencia del cultivo, ya que los nutrientes son absorbidos directamente sin depender del suelo.

Por otro lado, los cultivos acuapónicos, combinan la hidroponía con la acuicultura, es decir, la cría de peces y otros cultivos acuáticos. Es un sistema integrado que busca imitar los procesos naturales y reducir el desperdicio de recursos. Por medio de bacterias beneficiosas, los desechos producidos por los peces que se crían, se transforman en nutrientes para las plantas, las que luego filtran y purifican el agua para que regrese limpia al estanque de peces.

En resumen, la hidroponía es un sistema directo y controlado de nutrición para plantas, mientras que la acuaponía integra un ciclo biológico para promover la sostenibilidad al unir la producción de plantas y peces en un mismo sistema.

Ahora, al utilizar las salmueras tratadas como fuente de nutrientes en sistemas hidropónicos y acuapónicos ofrece ventajas como:

- Reducción de costos en fertilizantes sintéticos.
- Aprovechamiento de recursos naturales que permiten la reducción de residuos.
- Control preciso de la composición nutritiva, adaptándose a las necesidades específicas de cada cultivo.
- Posibilidad de integrar cultivos de especies halófitas –plantas que han desarrollado adaptaciones especiales para vivir en medios con mayores concentraciones salinas–, ampliando la diversidad productiva.

Estos sistemas son capaces de maximizar la producción con un menor impacto ambiental al tener un manejo más eficiente y controlado del uso del agua y nutrientes.

6.4 Desafíos y consideraciones para su implementación.

A pesar del potencial que presentan las salmueras para ser utilizadas como fertilizantes en agricultura controlada, requiere que se determine y realicen tratamientos previos que eliminen agentes contaminantes, ajusten la salinidad y eviten toxicidad, así como el monitoreo constante de la composición química y los parámetros físicos para garantizar la salud de las plantas y la calidad del producto. Además, la selección de cultivos adecuados es esencial, pues las especies deben presentar un cierto nivel de tolerancia a la salinidad, y la prevención de riesgos asociados a la acumulación de sales específicas que pueden afectar a largo plazo el sistema y su productividad.

En tanto, los aspectos regulatorios y de certificación, deben asegurar la inocuidad y aceptación comercial de los productos cultivados con esta tecnología, es por esto que es fundamental que se establezcan protocolos estandarizados y se realicen investigaciones

aplicadas para superar los desafíos que se presenten y poder fomentar la adopción segura y efectiva de esta alternativa.

6.5 Casos y estudios relevantes.

Es distintas partes del mundo se han estado desarrollando estudios que han podido mostrar resultados prometedores en cuanto al uso de las salmueras en cultivos.

En Israel y España hay proyectos pilotos en donde se han utilizado minerales recuperados de salmueras provenientes de plantas desalinizadoras, en cultivos hidropónicos de hortalizas y ornamentales.

Nuestro país también ha ido explorando el uso de estas soluciones salinas en sistemas de cultivos protegidos, con mejoras en la eficiencia de fertilizantes.

Además, existen investigaciones recientes que indican que la integración de las salmueras puede tener beneficios significativos en el ámbito económico y ambiental, pues puede llegar a reducir hasta en un 30% el uso de fertilizantes sintéticos.

CAPÍTULO 7: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN DE SALMUERAS.

7.1 Criterios para la evaluación.

Los criterios establecidos para este análisis son claros y medibles para permitir un análisis integral, ya que tienen por objetivo determinar la viabilidad y pertinencia de las alternativas de reutilización de las salmueras. No solo se han considerado aspectos técnicos, sino también impactos ambientales, sociales y de adaptación a las condiciones específicas de cada territorio.

Para este estudio se utilizaron los siguientes criterios:

1. Impacto ambiental:
 - Reducción de las descargas directas salmueras al mar o suelo.
 - Contribución a la mitigación del cambio climático (ej. generación de energía limpia, recuperación de nutrientes).
 - Potencial para la regeneración de ecosistemas o reducción de contaminantes.

2. Beneficio económico y social
 - Creación de empleos y fortalecimiento de economías locales.
 - Diversificación de fuentes de ingresos en comunidades costeras o agrícolas.
 - Aporte a la seguridad alimentaria y energética.

3. Viabilidad técnica
 - Madurez tecnológica de la alternativa.
 - Requerimientos de infraestructura y recursos para su implementación.
 - Compatibilidad con la composición química típica de las salmueras en Chile.

4. Escalabilidad y replicabilidad.
 - Posibilidad de implementar en diferentes zonas del país.
 - Flexibilidad para adaptarse a plantas desalinizadoras de distinta capacidad.
 - Integración con otros procesos productivos.

5. Plazo de implementación.
 - Horizonte temporal estimado para obtener resultados tangibles (corto, mediano o largo plazo).
 - Tiempo requerido para superar barreras regulatorias, técnicas y de financiamiento.

Una vez que hemos determinado los criterios a utilizar, podemos analizar y comparar las principales opciones identificadas, priorizando aquellas que sean capaces de maximizar los beneficios económicos y sociales, además de reducir el impacto ambiental y presenten factibilidad técnica en el contexto chileno.

7.2 Evaluación de alternativas de reutilización de salmueras.

La existencia de alternativas que nos permitan reutilizar las salmueras provenientes de plantas desalinizadoras, constituye una gran oportunidad para la economía circular y la reducción del impacto ambiental asociado al vertido de estos efluentes.

A continuación, se presenta la evaluación de las alternativas que se han estudiado a lo largo del trabajo.

1. Generación de energía a partir de salmueras: Basada en tecnologías con gradiente de concentración o conversión termoeléctrica. Pese a que requiere investigación aplicada, una alta inversión inicial y adaptación a las condiciones locales en donde se desee aplicar, posee un alto potencial de innovación.
2. Uso en acuicultura y cultivo de algas: Es posible su contribución en economías costeras y absorbiendo nutrientes, ya que permite el cultivo de especias marinas y macroalgas para bioproductos. De igual forma, es necesario el control de parámetros de salinidad y monitoreo ambiental.
3. Uso en cultivos agrícolas: Requiere un plan de tratamiento para evitar la salinización de los suelos. Sin embargo, se ha podido comprobar su viabilidad en especies halotolerantes o mediante mezclas controladas, especialmente en zonas áridas.
4. Uso como fertilizante mineral en agricultura controlada: Mediante la extracción selectiva de nutrientes como el potasio, magnesio y calcio, es posible su aplicación en cultivos hidropónicos o de invernadero. Posee un alto potencial de eficiencia y menor riesgo ambiental, pero requiere del procesamiento previo de las salmueras.

	<i>Ventajas principales</i>	<i>Limitaciones</i>	<i>Viabilidad a corta plazo en Chile</i>	<i>Viabilidad a largo plazo en Chile</i>
<i>Generación de energía</i>	Aprovecha gradientes salinos. Energía limpia.	Alto costo inicial. Baja madurez tecnológica.	Baja.	Alta.
<i>Uso en acuicultura y cultivo de algas</i>	Impulsa economías costeras. Producción de biomasa.	Control ambiental estricto. Riesgo de eutrofización.	Media-alta.	Alta.
<i>Uso en cultivo agrícola</i>	Aporta agua y nutrientes en zonas áridas. Uso directo.	Riesgo de salinización de suelos. Especies limitadas	Media.	Media-alta.
<i>Fertilizante mineral en agricultura controlada</i>	Recupera nutrientes valiosos. Control de calidad.	Requiere procesamiento y purificación.	Media	Alta.

Tabla 5: Tabla comparativa de viabilidad para cada una de las alternativas de reutilización de salmueras residuales.

7.3 Estrategias de implementación de alternativas combinadas de reutilización de salmueras.

Del análisis realizado podemos concluir que no existe una única solución universalmente óptima, sino que la viabilidad depende del contexto local, la infraestructura disponible y los objetivos estratégicos que haya en cada región o industria en donde se quiera aplicar.

Es posible priorizar la acuicultura y cultivo de alga si es integrada en zonas costeras, donde es posible ver ventajas inmediatas, aunque sigue requiriendo de estudios continuos para poder garantizar la salud de los ecosistemas marinos. Por otro lado, la generación de energía se muestra como una opción con alto potencial innovador y de valor agregado a largo plazo, pese a que su implementación requiere un importante nivel de inversión y desarrollo tecnológico, pero que podría verse beneficiado si es implementado en regiones que cuenten con la capacidad de inversión y tecnologías. Por último, en zonas agrícolas áridas, es posible utilizar fertilizantes minerales en cultivos controlados.

La visión integrada de estas tecnologías, nos permitirían transformar las salmueras de un pasivo ambiental a un recurso estratégico que impulse a la innovación productiva y resiliencia hídrica.

CAPÍTULO 8: PROYECCIONES FUTURAS Y RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REUTILIZACIÓN DE SALMUERAS EN CHILE.

El escenario actual de nuestro país producto de la escasez hídrica y la creciente dependencia a las tecnologías de desalinización, ha dejado a la vista un aumento sostenido de las salmueras residuales. Muchas veces, este subproducto que es considerado un desecho, representa una fuente valiosa de elementos recuperables y con una oportunidad para ser desarrollados de forma estratégica sostenible para la economía circular. Sin embargo, la creciente preocupación por la preservación de ecosistemas marinos, evitar la acumulación de contaminantes en suelos agrícolas y proteger las fuentes de agua dulce, ha derivado en la necesidad de robustecer las normativas nacionales sobre el manejo de efluentes salinos.

Bajo este mismo contexto, es posible realizar proyecciones futuras en nuestro país, que apuntarían no solo a expandir la capacidad de desalación, sino que también la implementación de tecnologías para la reutilización de salmueras de forma eficiente, segura y viable económicamente.

8.1 Proyecciones tecnológicas a corto y mediano plazo.

Se espera que Chile, en el corto y mediano plazo, se avance hacia la incorporación de tecnologías de separación avanzadas, tales como la cristalización fraccionada, precipitación química selectiva y la electrodiálisis, las cuales permitirían que se recuperen sales de alto valor industrial, además de generar soluciones salinas con aplicación directa en sectores como la acuicultura, agricultura y minería. Todas estas tecnologías requieren primeramente una inversión en investigación aplicada, desarrollo de pilotos en regiones costeras y una mayor articulación entre el sector público y privado.

8.2 Visión a largo plazo: tecnologías híbridas y biotecnologías.

A largo plazo, se esperaría que el uso de mecanismos híbridos –como el uso de membranas avanzadas, organismos halotolerantes y procesos biológicos de concentración– puedan cambiar de forma radical y positiva la manera en la que son vistas y tratadas la salmueras. Es posible también, que a medida que los costos de las tecnologías vayan disminuyendo y se obtengan más datos sobre sus impactos y beneficios, haya más plantas desalinizadoras en Chile que deseen incorporar sistemas integrados de reutilización, incluso como parte obligatoria de sus proyectos ambientales.

8.3 Marco normativo y regulatorio.

Si bien es cierto que en la actualidad nuestro país cuenta con normativas que regulan la descarga de salmueras al mar, como la RCA (Resolución de Calificación Ambiental) y

algunas directrices de la SMA (Superintendencia del Medioambiente), aún es necesario un marco normativo más firme y específico que:

- Se promueva con incentivos económicos y regulatorios la valorización y reutilización de las salmueras.
- Establezca estándares de calidad para productos que se fabriquen como derivados de salmueras (fertilizantes, soluciones salinas, biomasa).
- Facilite la aprobación y seguimiento de proyectos innovadores en el sector.

Un marco regulatorio que sea firme es clave para fomentar la inversión, innovación y la adopción segura de estas tecnologías.

8.4 Estrategias para la innovación y colaboración intersectorial.

Para que su implementación sea efectiva, es recomendable:

- Fomento de la investigación interdisciplinaria, especialmente en centros regionales cercanos a las zonas con mayor actividad de desalinización, como Antofagasta, Atacama y Coquimbo.
- Creación de alianzas público-privadas para escalar tecnologías emergentes desde fase piloto hasta implementación industrial.
- Desarrollar programas de capacitación técnica para operadores, agricultores y productores acuícolas, asegurando una adopción informada y segura.

8.5 Educación y sensibilización.

La educación y formación continua son esenciales para:

- Promover la comprensión de las ventajas y limitaciones de la reutilización de salmueras.
- Generar confianza en comunidades y usuarios finales.
- Asegurar la correcta operación y mantenimiento de las tecnologías implementadas.

El aprovechamiento de las salmueras no debería considerarse únicamente como una medida ambiental, sino como una estrategia que agregue valor, permita la reducción de residuos y posicionar a Chile como un líder en innovación hídrica en el contexto latinoamericano. Como frente al cambio climático, la resiliencia hídrica no debe ser construida solo desde la producción de agua como tal, sino también debe considerar el manejo inteligente de los residuos que se generen en su producción. En este sentido, es posible dejar de ver a las salmueras como un pasivo ambiental y convertirlas en un recurso clave para el desarrollo sostenible del país.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el contexto de la escasez hídrica que vive en nuestro país, actualmente, la reutilización de Salmueras provenientes de planta desalinizadoras representa una oportunidad clara para avanzar un modelo de economía circular. A lo largo del trabajo, se ha podido demostrar que las salmueras lejos de ser meramente un desecho, puede ser valorizada como fuente de recursos estratégicos, con aplicaciones reales en sectores productivos, siendo clave en la generación de energía, acuicultura, cultivo de algas y la fabricación de fertilizantes minerales.

La creciente dependencia a las nuevas tecnologías para la desalinización de agua, han dado lugar a un nuevo escenario, el cual nos obliga a mirar con responsabilidad y visión de futuro el destino de los residuos generados, pues hoy en día, la gran mayoría de las plantas desalinizadoras descargan directamente sus salmueras al mar, sin tratamiento previo adecuado, lo que genera impactos negativos en ecosistemas marinos, alterando la biodiversidad local y acumulando elementos potencialmente contaminantes en el ambiente.

Para la reutilización de las salmueras, podemos encontrar diversas tecnologías, las cuales presentan diferentes niveles de maduración. Algunas de estas tecnologías como la cristalización fraccionada, la precipitación selectiva o la electrodiálisis, ya cuentan con validación en otras partes del mundo y presentan un alto potencial para ser adoptadas a las condiciones chilenas. Así mismo, hay otras tecnologías que aún se encuentran en fase de investigación, como el uso de microorganismos halotolerantes o procesos biotecnológicos, sin embargo, a largo plazo podrían convertirse en soluciones transformadoras.

Sobre los usos directos que se le puede dar a las salmueras, se han identificado usos seguros y productivos en acuicultura de especies salinas, en sistemas de cultivos de algas con fines industriales o energéticos, en agricultura controlada mediante la adaptación de cultivos resistentes, y como materia prima para la fabricación de fertilizantes ricos en micronutrientes. El éxito de estos casos, depende de la correcta caracterización química de la salmuera, el control de sus concentraciones y del monitoreo ambiental constante.

En conclusión, el cambio climático y la crisis hídrica se han vuelto grandes propulsores para la innovación ambiental, ya que nos abren puertas inéditas para enfrentar estos desafíos.

Bajo este mismo contexto, podemos decir que Chile tiene grandes posibilidades de ser un líder latinoamericano en esta transición hacia un modelo hídrico sostenible, pues posee una amplia experiencia en tecnologías de desalinización y su creciente demanda hídrica lo vuelve único y el más capacitado para implementar modelo hídrico sostenible, en el que las salmueras dejan de ser tratadas como un desecho y se conviertan en una estrategia central para la sostenibilidad, aportando desarrollo a nuevas industrias, a la regeneración ambiental y a la adaptación territorial del cambio climático.

Para poder lograr esto, no solo son necesarios los avances tecnológicos, se necesita compromiso multisectorial y a largo plazo. Las decisiones políticas deben ser firmes y coherentes, establecer normas claras, fomentar la inversión pública y privada. Asimismo, contar con una ciudadanía activa, informada y comprometida con la transformación ecológica de los territorios para poder abrir caminos hacia un desarrollo justo, regenerativo y resiliente para las generaciones presentes y futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ahmed, M., Shayya, W. H., Hoey, D., Al-Handaly, J., & Al-Rubai, A. (2000). Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants. *Desalination*, 130(1), 155–168. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00082-0)
2. Akbarzadeh, M., & Saberi, A. (2022). Recent advances in zero-liquid discharge technologies for brine management in desalination. *Water Research*, 225, 119098. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119098>
3. Comisión Nacional de Riego (CNR). (2023). Reutilización de aguas salinas en agricultura: oportunidades y desafíos. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <https://www.cnr.gob.cl>
4. Cornejo, M. (2021). Impacto ambiental de las salmueras en ecosistemas marinos del norte de Chile. *Revista Chilena de Medio Ambiente*, 17(2), 56–72.
5. Global Water Intelligence. (2020). *Desalination Market Report: Growth and Trends 2020–2025*. GWI Publications.
6. Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S.-M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
7. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2024). Normativa ambiental sobre efluentes salinos y salmueras. Gobierno de Chile. <https://mma.gob.cl>
8. Pérez, J., & Vargas, N. (2022). Tecnologías emergentes para el tratamiento de salmueras: una revisión crítica. *Ingeniería del Agua*, 26(1), 41–55.
9. Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 97(4), 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>
10. Universidad de Antofagasta. (2022). Estudios piloto sobre la valorización de salmueras residuales en la región de Antofagasta. Facultad de Recursos Naturales Renovables.
11. Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1–3), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>
12. Panagopoulos, A. (2022). Techno-economic evaluation of zero-liquid discharge systems for brine management. *Journal of Cleaner Production*, 368, 132859. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132859>
13. United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Brine management: Turning waste into resource*. <https://www.unep.org>
14. FAO. (2011). *The use of saline waters for crop production*. FAO Irrigation and Drainage Paper 48. <https://www.fao.org>

15. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2023). Evaluación del uso de aguas salinas en cultivos agrícolas bajo condiciones controladas. Ministerio de Agricultura, Chile.
16. Fundación Chile (2022). Hacia una economía circular del agua: Oportunidades en la reutilización de salmueras. <https://fch.cl>
17. Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). (2023). Guía de fiscalización ambiental de plantas desalinizadoras y sus efluentes. Gobierno de Chile. <https://sma.gob.cl>
18. Asociación Latinoamericana de Desalación y Reúso de Agua (ALADyR). (2023). Casos de éxito en reutilización de salmueras en América Latina. <https://aladyr.net>
19. Observatorio del Agua (ODEPA). (2024). Panorama de la desalación en Chile: usos, impactos y desafíos futuros. Gobierno de Chile. <https://www.odepa.gob.cl>
20. Criterios y normas de evaluación de impacto ambiental en plantas desaladoras (2019). Revista de Derecho Ambiental de Chile, 34(2), 133–158.