



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE
MAGÍSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

**Propuesta de Marco Técnico para la Regulación de
Descargas de Salmuera: Definición de Monitoreos,
Analitos y Límites Máximos Permitidos (LMP)
Específicos.**

Daniel Alejandro González Labra

Profesor Guía:
Jairo Valencia Muñoz

07 de enero de 2026

RESUMEN

La desalinización de agua de mar se ha consolidado como una fuente estratégica para enfrentar la escasez hídrica en Chile, particularmente en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, el vertimiento de salmuera hipersalina al medio marino constituye uno de los principales desafíos ambientales asociados a esta industria, debido a sus potenciales efectos sobre la estructura, funcionamiento y biodiversidad de los ecosistemas costeros. En el contexto nacional, el marco normativo vigente carece de criterios específicos para regular este tipo de efluente, lo que genera una brecha relevante en la protección ambiental del medio marino.

El presente trabajo tuvo como objetivo general proponer criterios técnicos para la elaboración o actualización de una futura norma de emisión aplicable a la descarga de salmuera proveniente de plantas desalinizadoras en Chile. Para ello, se desarrolló un estudio de carácter cualitativo y descriptivo, basado en el análisis documental del marco normativo chileno, la revisión sistemática de literatura científica nacional e internacional y el análisis comparado de experiencias regulatorias en países con desarrollo avanzado en desalinización, tales como Australia, España, Omán y Estados Unidos.

Los resultados evidencian que los principales instrumentos de gestión ambiental chilenos, en particular el Decreto Supremo N.º 90/2000, no incorporan parámetros asociados a la salinidad ni consideran zonas de mezcla o criterios ecológicos, limitando su aplicabilidad frente a descargas hipersalinas. En contraste, las normativas internacionales analizadas integran enfoques basados en límites absolutos y relativos de salinidad, delimitación de zonas de mezcla, monitoreo biológico y ecotoxicológico, y mecanismos de gestión adaptativa en función de las condiciones locales del cuerpo receptor. A partir de esta evidencia, se proponen criterios técnicos estructurados en cuatro ejes: (i) establecimiento de límites de salinidad considerando tanto valores absolutos como incrementos relativos respecto de la salinidad natural; (ii) definición de zonas de mezcla ajustadas a las condiciones hidrodinámicas y ecológicas locales; (iii) incorporación de monitoreo biológico y

ecotoxicológico con especies representativas del territorio; y (iv) adopción de un enfoque regulatorio adaptativo, que permita ajustar los criterios técnicos en función de la variabilidad ambiental y de los resultados del monitoreo.

En conjunto, los resultados respaldan la necesidad de transitar desde un enfoque normativo generalista hacia una regulación específica, territorialmente contextualizada y basada en evidencia científica, que permita resguardar la integridad de los ecosistemas marinos y asegurar el desarrollo ambientalmente sustentable de la industria desalinizadora en Chile.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCION.....	6
1.1	Característica de la Salinidad de Agua de Mar y Salmuera.....	10
1.2	Efecto de la salmuera sobre especies hidrobiológicas	12
1.3	Instrumentos de gestión ambiental normativo para la salmuera.....	17
1.4	Criterios técnicos como base para la regulación ambiental de la salmuera 19	
2	Problema	21
3	OBJETIVOS.....	23
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	23
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4	METODOLOGÍA.....	24
4.1	Caracterización del marco normativo chileno actual.....	24
4.2	Análisis comparado de experiencias internacionales	25
4.3	Criterios técnicos para una futura norma chilena.....	26
5	RESULTADOS	28
5.1	Caracterización del marco normativo chileno actual.....	28
5.1.1	Norma de calidad secundaria de bahías	32
5.2	Análisis comparado de normativas internacionales	39
5.2.1	Australia	39
5.2.2	Estados Unidos	42
5.2.3	Unión Europea	43
5.2.4	España	44
5.2.5	Omán.....	44
5.3	Definición de criterios técnicos aplicables a una futura norma de emisión para descargas de salmuera en Chile	46
5.3.1	Parámetros de control y límites de salinidad.	47
5.3.2	Delimitación de zonas de mezcla.	47
5.3.3	Monitoreo ambiental y biológico.	48
5.3.4	Gestión, fiscalización y mecanismos de incorporación.	48
6	DISCUSIONES	49

6.1	Implicancias del marco normativo chileno frente a la regulación de descargas de salmuera.....	49
6.2	Análisis comparado de normativas internacionales	54
6.3	Criterios técnicos aplicables a una futura norma de emisión para descargas de salmuera en Chile.	59
6.3.1	Salinidad como parámetro regulatorio central	59
6.3.2	Uso de incrementos relativos respecto a las condiciones naturales....	60
6.3.3	Definición y delimitación de zonas de mezcla	61
6.3.4	Monitoreo fisicoquímico específico del efluente y del medio receptor .	62
6.3.5	Incorporación de monitoreo biológico y ecotoxicológico	65
6.3.6	Enfoque adaptativo y revisión periódica de los criterios regulatorios...	68
7	CONCLUSIONES.....	70
7.1	Caracterizar el marco normativo chileno vigente en relación con las descargas de residuos líquidos industriales al mar, identificando sus limitaciones frente a las emisiones de salmuera hipersalina.	70
7.2	Analizar comparativamente normativas internacionales aplicables a la descarga de salmuera al medio marino.....	70
7.3	Definir criterios técnicos aplicables a una futura norma de emisión para descargas de salmuera en Chile.	72
7.4	Propuesta de lineamientos técnicos para fortalecer la regulación ambiental de las descargas de salmuera en Chile.....	72
8	BIBLIOGRAFÍA.....	74
9	ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Variaciones zonales de salinidad en la columna de agua en Chile, las unidades son en PSU. (Modificado de Gatica 2023).....	11
Figura 5.3. Áreas de vigilancia para las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas marinas de la bahía de Quintero- Puchuncaví. Decreto 43/2023 del ministerio del medio ambiente.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Plantas desaladoras en Chile y su capacidad de producción. 2025.....	7
Tabla 5.2. Límites máximos permitidos para las descargas de Residuos Líquidos a cuerpos de agua marinos.....	31
Tabla 5.3. Norma de Calidad secundaria Decreto 43/2024, establece niveles de calidad ambiental por área de vigilancia en la Bahía de Quintero-Puchuncaví.	35
Tabla 5.4. Instrumentos de gestión chilenos para descargas líquidas industriales al mar.	37
Tabla 5.5. Instrumentos ambientales internacionales para la regulación de descarga de salmuera.....	45

1. INTRODUCCION

La escasez de agua dulce ya afecta a más del 50 % de la población mundial, y la demanda por este recurso continúa en aumento, impulsada principalmente por el crecimiento económico (Khan et al., 2021). En este escenario de creciente presión hídrica, la desalación de agua de mar se consolida como una alternativa viable y estratégica para la obtención de recursos hídricos. Actualmente, esta tecnología representa una de las industrias de mayor expansión a nivel global, con proyecciones de crecimiento sostenido asociadas a la necesidad de enfrentar los efectos del cambio climático y la desertificación, especialmente en regiones semiáridas y de clima mediterráneo, como Chile (Blanco-Murillo et al., 2023a)

sectores industrial, minero, domiciliario e incluso agrícola, en respuesta a los efectos persistentes de la sequía y a la creciente presión sobre las fuentes de agua continentales. Este escenario ha impulsado el desarrollo acelerado de la infraestructura de desalinización a nivel nacional. Al año 2024, Chile cuenta con 21 plantas desalinizadoras en operación, con una capacidad de producción aproximada de 8.500 L/s. No obstante, las proyecciones indican un aumento significativo de esta capacidad en el mediano plazo, estimándose que en los próximos diez años el número de plantas podría incrementarse hasta alcanzar un total de 43 unidades, con una producción proyectada del orden de 35.000 L/s hacia el año 2035 (Vicuña et al., 2022).

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 1.1, que incluye plantas desalinizadoras en operación, construcción y en evaluación ambiental, la capacidad total de producción de agua desalada en Chile alcanza actualmente los 11.668 L/s. Con la puesta en marcha de los proyectos en desarrollo, se proyecta que hacia el año 2030 la capacidad nacional se incremente en aproximadamente 23.097 L/s, alcanzando un total cercano a los 34.765 L/s. Este crecimiento implica, en términos prácticos, una triplicación de la producción de agua desalinizada en un período de cinco años, con una fuerte concentración de los nuevos proyectos en las regiones

de Antofagasta y Atacama, zonas caracterizadas por una alta demanda hídrica y una marcada escasez de recursos de agua dulce.

Tabla 1.1. Catastro de plantas desaladoras en Chile y su capacidad de producción. Desde el Catastro ACADES Plantas Desaladoras de Agua de Mar en Chile. 2025.

Planta	Titular	Estado	Sector	Capacidad (l/s)	Región
CCT Tocopilla	Engie	Operación	industrial	22	
Mejillones	Eléctrica Cochrane Spa	Operación	industrial	56	
Mejillones	Gasatacama	Operación	industrial	30	
Desaladora Tocopilla	Grupo EPM	Operación	Agua potable	75	
Tocopilla	Norgener	Operación	Industrial	25	
Angamos	Eléctrica Angamos	Operación	Industrial	56	
Ampliación Angamos	Eléctrica Angamos	Evaluación	Industrial	158	
Desaladora Norte- Antofagasta	Grupo EPM	Operación	Agua potable	1053	
Desaladora Antofagasta	Grupo EPM	Operación	Agua potable	634	
Desaladora Distrito norte	Codelco	Evaluación	minería	1956	Antofagasta
Minera Antucoya	Antofagasta Minerals	Operación	Minería	30	
Michilla	Haldeman mining company	Operación	minería	70	
Minería Sierra Gorda	KGHM	Operación	minería	63	
Distrito Centinela (esperanza + el tesoro)	Antofagasta Minerals	Operación	Minería	50	
Distrito Minero Centinela I y II	Antofagasta Minerals	Evaluación	minería	140	
Spence Growth Option (SGO)	BHP	Operación	minería	1000	
Planta 0 y Ampliaciones EWS y EWSE	BHP	Operación	minería	3858	
GRAMSA	Compañía Regional Aguas Marítimas	Construcción	Multipropósito	8000	
Desaladora de Atacama	ECONSSA/Nueva Atacama	Evaluación	Agua potable	450	Atacama

Planta	Titular	Estado	Sector	Capacidad (l/s)	Región
Desaladora Bahía Caldera	Seven Seas Water Chile	Construcción	Multipropósito	93	
Atacama	ENAPAC	Operación	Industrial	1750	
Desaladora Guacolda	Guacolda Energía	Evaluación	Industrial	1400	
Huasco	Guacolda	Operación	Industrial	70	
Santo Domingo	CAPSTONE	Evaluación	Minería	30	
Minería Mantoverde	Minería Mantos Cooper	Operación	Minería	120	
Expansión Mantoverde	CAPSTONE	Operación	Minería	260	
Aguas CAP	AGUASCAP	Operación	Minería	600	
Minera Candelaria	Lund Mining Corporation	Operación	Minería	500	
Nueva Unión	Nueva Unión	Evaluación	Minería	970	
Desaladora Arica	Aguas Altiplano	Evaluación	Agua potable	200	Arica y Parinacota
Desaladora Collahuasi	Minera Doña Inés de Collahuasi	Construcción	Minería	1050	Tarapacá
Quebrada Blanca Hipógeno	Minera Teck	Construcción	Minería	850	
Desaladora Coquimbo	Aguas del Valle	Operación	Agua potable	1200	Coquimbo
Proyecto Azul	Oceanus	Evaluación	Multipropósito	1200	
Huentelauquén	Desala	Evaluación	Multipropósito	1000	
Fase inicial Ampliación IV Los pelambres	Minera los Pelambres	Ampliación	Minería	400	
Desaladora Petorca	Desala	Evaluación	Multipropósito	1200	Valparaíso
Unidad 3 Ventanas	Eléctrica Ventanas	Operación	Industrial	20	
Unidad 4 ventanas	Eléctrica Campiche	Operación	Industrial	30	
Aconcagua	Aguas Pacífico	Construcción	Multipropósito	1000	
O'Higgins	Desala	Evaluación	Multipropósito	3000	O'Higgins
Central térmica Santa María	Colbún	Operación	Industrial	33	Bío Bío
Cabo Negro	Methanex	Operación	Industrial	63	Magallanes y la Antártica Chilena

Las plantas de desalinización extraen grandes volúmenes de agua de mar para producir agua dulce y como consecuencia producen salmuera hipersalina como producto de rechazo, la cual es vertida al medio marino, esta salmuera puede contener hasta el doble de salinidad del medio marino, teniendo el potencial para impactar negativamente las características físicas y químicas de la columna de agua, sedimentos, como a las comunidades marinas y junto con ello a recursos hidrobiológicos de los ambientes receptores marinos (Roberts et al., 2010).

En términos normativos las desalinizadoras en Chile que emiten sus aguas de rechazo al cuerpos receptores marinos están regidos por el Decreto Supremo 90 del año 2000, del Ministerio secretaría general de la presidencia, el cual establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, cuyo objetivo recogido del artículo primero de mencionada norma es la “protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores. Con lo anterior, se logra mejorar sustancialmente la calidad ambiental de las aguas, de manera que éstas mantengan o alcancen la condición de ambientes libres de contaminación, de conformidad con la Constitución y las Leyes de la República”, sin embargo, dicha norma no recoge elementos característicos de la salmuera vertida al mar para prevenir la contaminación, principalmente referente a las descargas hipersalinas de plantas desalinizadoras.

Ante la ausencia de una normativa ambiental específica que regule la descarga de salmuera o establezca criterios de capacidad de dilución en su zona de influencia, en Chile resulta aplicable lo dispuesto en el artículo 11 del Decreto Supremo N.º 40 de 2012, que aprueba el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Dicho artículo establece un listado de Estados cuyos estándares de calidad ambiental y de emisión deben ser considerados como normativa de

referencia para la evaluación de los riesgos para la salud de la población (letra a del artículo 11 de la Ley N.º 19.300), así como de los efectos adversos significativos sobre los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, el agua y el aire (letra b del mismo artículo). Esta disposición se aplica específicamente en aquellos casos en que no exista normativa nacional vigente para la evaluación de tales efectos, características o circunstancias.

1.1 Característica de la Salinidad de Agua de Mar y Salmuera.

El agua de mar frente a la costa chilena exhibe una marcada variabilidad en su salinidad, tanto verticalmente a lo largo de la columna de agua como latitudinalmente a escala nacional. Esta heterogeneidad ha sido documentada por Gatica et al. (2023), a partir del análisis de datos oceanográficos recopilados entre 2004 y 2022 mediante el programa ARGO, respaldado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental. Dicho programa emplea boyas a la deriva con capacidad de variar su profundidad, lo que permite caracterizar de manera continua las condiciones hidrográficas de toda la columna de agua.

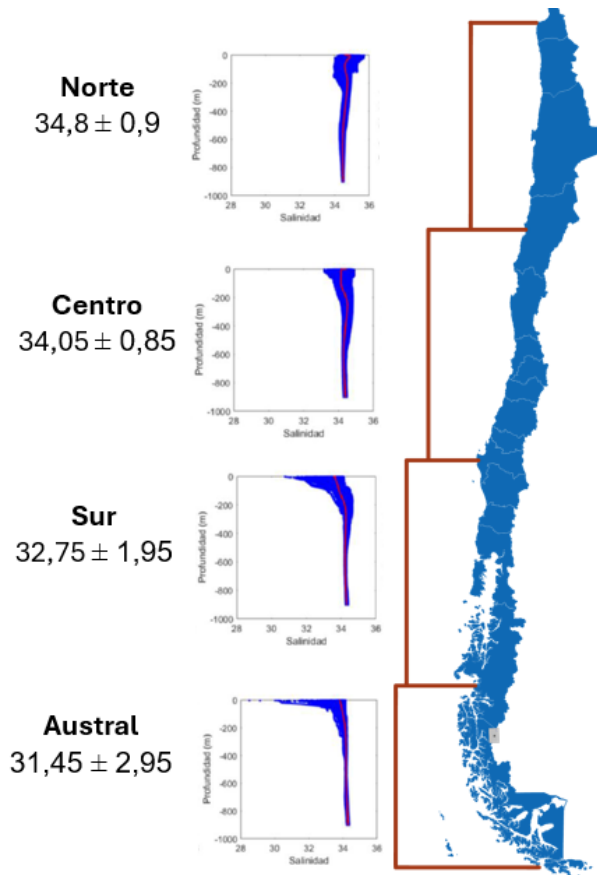


Figura 1.1. Variaciones zonales de salinidad en la columna de agua en Chile, las unidades son en PSU. (Modificado de Gatica 2023)

En la Figura 1.1 se identifican cuatro grandes zonas geográficas, Zona Norte, Zona Centro, Zona Sur y Zona Austral, que se diferencian por presentar contrastes significativos en los valores de salinidad a lo largo de la columna de agua. La mayor variabilidad se concentra en los primeros 50 m de profundidad, donde los procesos superficiales ejercen una mayor influencia. En la Zona Norte se registran valores entre 33,9 y 35,7 PSU, asociados principalmente a altas tasas de evaporación y baja precipitación; en la Zona Centro, la salinidad fluctúa entre 33,8 y 34,7 PSU, reflejando un equilibrio relativo entre evaporación y aportes continentales; en la Zona Sur, los valores varían entre 33,2 y 34,9 PSU, influenciados por un mayor aporte de agua dulce proveniente de ríos y precipitaciones; mientras que en la Zona Austral se observa el rango más amplio, entre 28,5 y 34,4 PSU, explicado por la intensa descarga de glaciares, escorrentía continental y alta pluviosidad. A mayores

profundidades, alrededor de los 200 m, la salinidad tiende a homogenizarse en torno a 34 PSU en las cuatro zonas, debido a procesos de mezcla vertical y circulación oceánica que reducen las diferencias superficiales (Pérez, 2023).

Diversos autores han caracterizado los principales elementos constituyentes del agua de mar; sin embargo, son aún limitados los estudios que analizan estas características en relación con las descargas hipersalinas en Chile. Entre los trabajos disponibles, destaca el aporte de Hernández et al. (2020), cuyos resultados son consistentes con lo reportado a nivel internacional (Waly et al., 2012; Khan et al., 2021; del Villar et al., 2023). En términos generales, los constituyentes mayoritarios del agua de mar corresponden, en orden decreciente de concentración, al cloruro y sodio, seguidos por sulfato, magnesio, calcio y bicarbonato, además de diversos elementos traza.

En los sistemas de desalación por ósmosis inversa, el agua de mar es forzada a atravesar una membrana semipermeable mediante la aplicación de alta presión, separando el agua dulce de las sales disueltas. Este proceso genera, como subproducto, una corriente residual altamente concentrada en sales —denominada salmuera o agua de rechazo— que puede alcanzar concentraciones cercanas al doble de las presentes en el agua de mar original, además de contener aditivos propios de la operación industrial, como biocidas, floculantes y detergentes (Park et al., 2011). Diversos estudios han demostrado que esta descarga hipersalina constituye uno de los principales agentes estresores para el medio ambiente marino, afectando a especies hidrobiológicas y promoviendo procesos de sucesión biológica y pérdida de biodiversidad asociados al estrés osmótico (Jiang et al., 2024; Manríquez et al., 2024).

1.2 Efecto de la salmuera sobre especies hidrobiológicas

Los impactos ambientales producidos por la descarga de salmuera hipersalina al medio marino tienen efectos altos en ecosistemas sensibles. La característica de estos impactos depende de las condiciones fisicoquímicas, hidrogeografía y

condiciones biológicas del cuerpo receptor marino donde es vertida la salmuera hipersalina (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

La salmuera generada como agua de rechazo en las plantas desalinizadoras ejerce efectos significativos sobre las comunidades marinas, debido a su elevada concentración de sales y bajo contenido de nutrientes. Esta descarga afecta especialmente a la fauna bentónica, cuyos organismos no siempre están adaptados a condiciones de alta salinidad ni a variaciones bruscas de este parámetro (Sánchez-Lizaso et al., 2008). Dichos impactos se ven acentuados porque la salmuera, al presentar una mayor densidad que el agua de mar circundante, tiende a permanecer cerca del fondo de la columna de agua, donde se acumula e interactúa directamente con los ecosistemas bentónicos.

En este sentido la fauna que sufre mayor afectación son los organismos sésiles bentónicos, donde se ha demostrado disminuciones significativas de abundancia de la meiofauna representada por nemátodos y poliquetos, inmediatamente adyacente al sistema de descarga con niveles de salinidad de 45 psu, mientras que a 30 metros de la descarga aumenta la abundancia con niveles de salinidad de 36 psu, copépodos también han evidenciado la misma dinámica (Riera et al., 2011). Esto cambios en la estructura de las comunidades de macrofauna bentónicas cercanas a los puntos de descargas o zona de influencia de la descarga ha sido reportada por diversos trabajos (Del-Pilar-Ruso et al., 2015; Yoon & Park, 2012), por este motivo los invertebrados bentónicos son utilizados como bioindicadores de cambios ambientales asociado a presiones antrópicas (Borja et al., 2010).

Por otra parte, se ha evidenciado en bioensayos de toxicidad aguda de exposición a agua de rechazo de una planta desalinizadora mediante la evaluación de tres niveles tróficos consistentes en tres especies de microalgas (*Isochrysis galbana*, *Tetraselmis suecica*, and *Chlorella vulgaris*), dos representantes de zooplancton (*Brachionus plicatilis* y *Tigriopus japonicus*) y una especie pez en estado larval (*Paralichthys olivaceus*), las cuales evidenciaron un efecto umbral sobre las 40 psu

en términos de crecimiento y mortalidad, por lo cual el autor sugiere mantener las concentraciones de salmuera en el medio bajo las 40 psu para disminuir el impacto de la descarga en ambientes marinos (Park et al., 2011). Por otra parte, la materialidad de los ductos e infraestructura que tienen contacto con el agua de rechazo también puede producir efectos nocivos hacia la vida marina, donde se evidenció mediante bioensayo “*in situ*” con equinodermos, ascidias, corales y cangrejos en la zona de descarga que murieron a los pocos días de exposición, lo que estaba sujeto a estructuras de cobre y níquel corroídas, que al ser reemplazadas la sobrevivencia aumentó (Roberts et al., 2010).

La pérdida de riqueza en las comunidades bentónica producto de la emisión de salmuera tiene un impacto no menor sobre las algas, que, a su vez, son sustrato ecológico para otras especies, en este contexto la pérdida de algas tiene un efecto directo sobre la ecología del bentos, se ha evidenciado afectaciones y caracterizado la respuesta de algas y plantas acuáticas marinas las cuales son objeto de protección ambiental. Por ejemplo, el pasto marino *Posidonia oceánica* es una especie endémica del mediterráneo donde la salinidad ambiental es de $37,7 \pm 0,12$ psu, habita entre la línea de costa y los 25 metros de profundidad, cuyas praderas están protegidas conforme a la normativa medioambiental Europea debido al gran valor y servicios ecológicos que brindan, ya sea protegiendo la dinámica de playas, aporte de nutrientes y elementos propios de productores primarios, donde (Sánchez-Lizaso et al., 2008), observó mediante ensayos de laboratorio que salinidades superiores a 39,1 psu provoca una reducción en la vitalidad de las praderas marinas, provocando necrosis, manchas en el tejido foliar, senescencia prematura de la hojas y mayor mortalidad de las plantas, la mortalidad incrementó a salinidades a 40 psu, mientras que a exposiciones de 45 psu el 50% de los ejemplares ensayados murieron, estos resultados fueron concordantes con los estudios en el medio marino en la zona de descarga de salmuera, junto al ensayo de *P. oceánica* se evaluaron dos especies cohabitantes, correspondientes al mysido *Leptomysis posidoniae*, y el erizo de mar *Paracentrotus lividus*, en ambas

especies los aumentos de mortalidad fueron en salinidades superiores a 41 psu (Fernández-Torquemada & Sánchez-Lizaso, 2005)

En relación a antecedentes normativos internacionales, la autoridad medioambiental de España recoge las recomendaciones del autor (Sánchez-Lizaso et al., 2008) estableciendo que, en caso de existir praderas de *P. oceánica* cercanas a una zona de descarga de salmuera, esta no debe 38,5 psu de salinidad en cualquier punto de la pradera para más del 25% de las observaciones en un año o no se debe permitir exceder las 40 psu de salinidad en cualquier punto de la pradera para más del 5% de las observaciones anuales.

Otros antecedentes exponen una afectación de las comunidades bentónicas cercanas a descargas de salmuera, por ejemplo (Ruso et al., 2007), evidenció que las comunidades bentónicas adyacentes a una zona de emisión de agua de rechazo hipersalina, la fauna dominante en un 98% correspondió a nemátodos, mientras que poliquetos, moluscos y crustáceos se hicieron más abundantes mientras mayor es la distancia de la descarga. También se ha evidenciado la recuperación de comunidades bentónicas posteriormente de la implementación de medidas de mitigación aplicadas a difusores de descargas, donde la recuperación de la fauna bentónica fue relativamente rápida, tardando meses en vez de años, por lo cual se comprueba que la adopción de medidas de mitigación que maximicen la mezcla del efluente es efectiva para minimizar los impactos de las descargas hipersalinas sobre la vida marina (Del-Pilar-Ruso et al., 2015).

Estudios en Chile han evidenciado efectos adversos de diferentes especies expuestas a concentraciones elevadas de salmuera tanto en laboratorio como ensayos *in situ*. Al evaluar los efectos de salmuera en larvas del recurso loco *Concholepas concholepas* recurso que habita sobre el bentos, se obtuvo que el consumo de oxígeno aumentó significativamente en salinidades superiores a 38 psu en comparación con salinidades controles de 34 psu, esto se traduce en un incremento de las tasas metabólicas y disminución en el rendimiento energético de

las larvas bajo salinidades anormales, lo cual podría exponerlas a bajas posibilidades de supervivencia (Manríquez, González, Abarca, Jenó, et al., 2024) Al igual que *C. concholepas*, el recurso macha *Mesodesma donacium* son importantes recursos de desembarque por parte de la pesca artesanal, *M. donacium* habita enterrado en el sustrato, donde al evaluar su rendimiento mediante bioensayo de exposición aguda a diferentes salinidades, se observaron efectos adversos sobre su enterramiento, y un incremento en su tasa metabólica sobre las 38 psu con respecto a la salinidad control de 34 psu (Manríquez, González, Abarca, Jofré, et al., 2024).

Al evaluar la respuesta en el alga phaeophyta *Dictyota Kunthii* en trasplantes en zonas de afectación por exposición a vertidos de salmuera de plantas desalinizadoras generó una respuesta y aumento de la condición de estrés oxidativo, una menor productividad primaria en dos puntos de control, cuya salinidad medida fue de $35,9 \pm 0,07$ psu a 30 metros de la descarga de salmuera y $36,8 \pm 0,06$ psu a 10 metros de la emisión.

Por otra parte, en la planta acuática o pasto marino *Zostera chilensis* catalogada “en peligro” en el Inventario nacional de especies de Chile, del Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, s/f), es la especie de pasto marino más septentrional del mundo, donde una de las tres bahías que es posible encontrarla se encuentra un proyecto en evaluación un proyecto de planta desalinizadora. Estudios previos ya han evidenciado estrés oxidativo y cambios en la expresión de genes en pastos marinos expuestos a condiciones de hipersalinidad (Capó et al., 2020; Piro et al., 2015), en *Z. Chilensis* se observó su respuesta ante la exposición a salinidad demostrando estrés fotoquímico y metabólico a las 37 psu siendo mayor a las 40 psu, aunque también evidenció respuestas de tolerancia y viabilidad durante el periodo de exposición de 10 días que duró el ensayo, sin embargo, los mecanismos de tolerancia y las respuestas oxidativas funcionaron mejor a las 37 psu que a las 40 psu con respecto al control natural de 34 psu, lo que podría señalar

que el umbral de tolerancia fisiológica de *Z. chilensis* está por encima de las salinidades evaluadas (Blanco-Murillo et al., 2023b).

1.3 Instrumentos de gestión ambiental normativo para la salmuera.

La protección del medioambiente ha sido ratificada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, en Río de Janeiro en 1992, donde en el principio 4, expone que “A fin de alcanzar el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente deberá constituir parte integrante del proceso de desarrollo y no podrá considerarse en forma aislada”.

Si bien es cierto el desarrollo económico y social provoca efectos ambientales, nace también como consecuencia una mayor conciencia en el cuidado ambiental y nueva evidencia científica para identificar tanto los efectos, consecuencias, tecnologías de mitigación y normativa aplicable para recuperar condiciones ambientales favorables o mitigar los impactos producidos por alguna actividad antrópica. En ese contexto, el rol que cumplen las normas ambientales es fijar, a través de disposiciones legales, los valores máximos permisibles de contaminantes con el fin de proteger la salud y el medio ambiente (Skewes Urtubia, 2017).

En Chile, existen instrumentos de gestión ambiental para para mantener las aguas continentales, y aguas marinas en condiciones aceptables para la vida, en este sentido existen normas primarias y secundarias de calidad, y las normas de emisión.

Las normas de calidad primaria establecen la cantidad máxima de sustancias contaminantes cuya presencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o salud de la población. Se aplican en todo el país por igual, mientras que las normas secundarias establecen cantidades máximas de sustancias cuya presencia en el ambiente puede constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza. Su aplicación puede ser a nivel nacional o a nivel local dependiendo del recurso que se está protegiendo, y las

normas de emisión Las normas de emisión son aquellas que establecen límites a la cantidad de contaminantes emitidos al aire o al agua que pueden producir instalaciones industriales o fuentes emisoras en general. Su aplicación puede ser a nivel nacional o local dependiendo del objetivo de protección que tenga la norma.

En este contexto el agua de mar cuenta con instrumento de calidad primaria Decreto 144 del 2008 del Ministerio secretaría general de la presidencia, el cual establece normas de calidad primaria para la protección de las aguas marinas y estuarinas aptas para actividades de recreación con contacto directo (Abarca, 2008), mientras que el presente año 2024 se publicó la primera norma de calidad secundaria en las bahías, para la protección de las aguas marinas y sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví, el Decreto 43 del año 2023 del Ministerio del medio ambiente.

Por otra parte, el instrumento de gestión para regular emisiones en aguas marinas es el Decreto 90 del año 2000, del ministerio secretaría general de la presidencia (DS 90/2000), el cual, es la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales, el cual hace diferencia en la emisión tanto dentro como fuera de la zona de protección litoral.

Como producto de rechazo de las plantas desalinizadoras se genera un efluente hipersalino, comúnmente denominado salmuera, cuya concentración de sales puede llegar a duplicar la del cuerpo marino receptor. A pesar de constituir el principal residuo asociado a los procesos de desalinización, la salmuera y sus constituyentes no se encuentran actualmente regulados de manera específica en el marco normativo chileno. La evidencia científica disponible ha demostrado que este tipo de efluente presenta características potencialmente contaminantes para la vida marina y los recursos naturales, dado su efecto sobre las condiciones osmóticas, la fisiología de los organismos y la estructura de las comunidades biológicas, especialmente bajo escenarios de descarga continua y exposición crónica (Lattemann & Höpner, 2008; Roberts et al., 2010).

Por otra parte, en países con importantes desarrollo de desalinización como, Omán, Australia, Estados Unidos y España, entre otros, han regulado límites de salinidad permisible o un área de influencia determinada, regulando incrementos en salinidad directamente en la emisión y zona de mezcla, también se establecen incrementos máximos de salinidad en relación a la salinidad ambiental en la zona de mezcla establecida o se fija un valor máximo absoluto permisible de salinidad ((Ahmad & Baddour, 2014; Farag & Harper, 2014; Sola et al., 2020), lo cual es útil para proteger especies sensibles o con baja capacidad de osmorregulación.

1.4 Criterios técnicos como base para la regulación ambiental de la salmuera

En el contexto de la gestión ambiental, los criterios técnicos corresponden a un conjunto de parámetros, condiciones y lineamientos fundamentados en evidencia científica, orientados a guiar la toma de decisiones regulatorias y la formulación de instrumentos normativos. Estos criterios permiten traducir el conocimiento científico sobre los procesos físicos, químicos y biológicos de un sistema en requisitos operativos y verificables, que pueden ser incorporados en normas de emisión, normas de calidad ambiental o instrumentos de evaluación ambiental.

En el caso de la desalinización de agua de mar, la definición de criterios técnicos resulta particularmente relevante debido a la naturaleza no convencional del efluente generado. A diferencia de otros residuos líquidos industriales, la salmuera no se caracteriza principalmente por la presencia de contaminantes puntuales, sino por una alteración sustantiva de las condiciones fisicoquímicas del medio receptor, especialmente asociada a incrementos de salinidad y cambios en la composición iónica. Esta complejidad dificulta su regulación mediante marcos normativos generalistas y refuerza la necesidad de contar con criterios técnicos específicos que permitan evaluar y gestionar sus impactos ambientales de manera adecuada (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014).

Desde una perspectiva regulatoria, los criterios técnicos cumplen un rol clave al permitir establecer umbrales ambientalmente relevantes, definir áreas de influencia de las descargas, seleccionar parámetros de monitoreo apropiados y orientar la implementación de medidas de mitigación. En experiencias internacionales, estos criterios se han desarrollado considerando variables como la salinidad natural del cuerpo receptor, la dinámica hidrodinámica local, la sensibilidad ecológica del ecosistema marino y la respuesta de especies bioindicadoras, lo que ha permitido avanzar hacia regulaciones más efectivas y territorialmente contextualizadas (Sola et al., 2020; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

En el contexto chileno, la ausencia de una normativa específica para la descarga de salmuera implica que la evaluación y gestión ambiental de este efluente dependa, en gran medida, de interpretaciones caso a caso dentro del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental o de la aplicación de normas diseñadas para otros tipos de residuos líquidos. Esta situación pone de relieve la necesidad de definir criterios técnicos claros, consistentes y basados en evidencia científica, que permitan orientar tanto la evaluación ambiental de nuevos proyectos como el fortalecimiento del marco normativo existente.

En este contexto, en el presente trabajo se propondrán criterios técnicos que deben ser considerados para la dictación o actualización de normas ambientales aplicables a la descarga de salmuera proveniente de plantas desalinizadoras al medio marino. Estos criterios no buscan reemplazar los instrumentos regulatorios vigentes, sino complementarlos, aportando fundamentos científicos que permitan avanzar hacia una regulación más específica, adaptativa y coherente con la diversidad ambiental, oceanográfica y ecológica de los ecosistemas marinos chilenos. De este modo, los criterios técnicos desarrollados constituyen un insumo central para la formulación de futuras propuestas normativas

2 Problema

La protección ambiental en Chile busca prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales, objetivo que se materializa a través del Decreto Supremo N.º 90 de 2000, el cual regula los contaminantes asociados a los residuos líquidos que se vierten en estos cuerpos receptores. Sin embargo, los analitos y límites actualmente establecidos en esta normativa resultan insuficientes para abordar de manera adecuada los contaminantes específicos generados por las plantas desalinizadoras que operan mediante ósmosis inversa en el medio marino, lo que evidencia la existencia de un vacío regulatorio relevante.

Las aguas de rechazo, o salmuera, provenientes de estas instalaciones producen una afectación significativa sobre los ecosistemas marinos, tanto por el aporte de compuestos químicos utilizados en la operación, como biocidas, antiincrustantes, antiespumantes y detergentes, como por el efecto físico y químico de la pluma salina, que genera gradientes de hipersalinidad en la columna de agua. Esta condición interfiere con el metabolismo del nitrógeno y del carbono, reduce los procesos fotosintéticos y afecta directamente a comunidades bentónicas, planctónicas y a los corredores larvales. Diversos estudios han documentado, además, una disminución de la biodiversidad y el reemplazo de las comunidades originales por organismos indicadores de estrés ambiental.

Frente a este escenario que no cuenta con una regulación específica, surge la necesidad de sistematizar y analizar tanto la normativa ambiental internacional como la evidencia científica disponible, con el fin de proponer un marco técnico que permita definir nuevos esquemas de monitoreo, analitos prioritarios y límites máximos permitidos orientados a regular las descargas de salmuera. Este enfoque contribuirá a la modernización de los sistemas de monitoreo ambiental y sentará las bases para la incorporación de instrumentos de gestión ambiental en Chile destinados a la regulación de la salinidad en el medio marino, ya sea mediante el

establecimiento de una Norma de Calidad Secundaria o a través de una futura actualización del Decreto Supremo N.º 90 de 2000.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer criterios técnicos para la elaboración de una futura norma de emisión que garantice la protección de la salud ambiental de los ecosistemas costeros, mediante revisión de literatura científica y normativa nacional e internacional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el marco normativo chileno actual en relación con las descargas de residuos líquidos industriales al mar, dando cuenta de sus limitaciones frente a las emisiones de salmuera hipersalina.
- Analizar experiencias internacionales sobre regulación de salmuera en países como Australia, España, Omán y Estados Unidos, enfocándose en criterios técnicos como límites de salinidad, zonas de mezcla e impacto sobre especies hidrobiológicas.
- Definir criterios técnicos y lineamientos de aplicación que, puedan ser incorporados en una futura norma de emisión chilena para regular las descargas de salmuera al medio marino.

4 METODOLOGÍA

4.1 Caracterización del marco normativo chileno actual

Para esta fase se empleó el método de análisis documental descrito por Bowen (2009), el cual se aplicó mediante una revisión sistemática de los instrumentos normativos y documentos técnicos vigentes en Chile relacionados con la regulación de descargas de residuos líquidos al medio marino. El procedimiento consistió en seleccionar los textos normativos y reglamentarios analizados desde fuentes oficiales, principalmente la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile y el Diario Oficial de la República de Chile, complementados con documentos técnicos disponibles en los sitios institucionales del Ministerio del Medio Ambiente, la Superintendencia del Medio Ambiente y el Servicio de Evaluación Ambiental considerando criterios de pertinencia temática, vigencia normativa y aplicabilidad al objeto de estudio. Posteriormente, la información contenida en dichos documentos fue examinada y organizada en categorías, tales como, ámbito de aplicación y objetivos de protección ambiental; y consideración explícita de la salinidad y zonas de mezcla. Finalmente, se realizó un análisis comparativo e interpretativo entre los distintos instrumentos, particularmente en relación con criterios específicos para la gestión de emisiones de salmuera hipersalina, permitiendo así caracterizar de forma sistemática el marco normativo chileno vigente en este ámbito.

Esta etapa se sustentó en un análisis documental exhaustivo de las principales disposiciones legales y reglamentarias que rigen la gestión ambiental de los recursos hídricos marinos en el país, entre ellas la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994), el Decreto Supremo N° 90/2000 que establece la norma de emisión para descargas de residuos líquidos, el Decreto Supremo N° 43/2024 sobre normas secundarias de calidad ambiental para bahías, y el Decreto Supremo N° 144/2008 sobre normas primarias de calidad para aguas marinas y estuarinas. También se consideraron reglamentos complementarios como el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (DS 40/2012), así como documentos técnicos del Ministerio del Medio Ambiente (MMA),

la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante (DIRECTEMAR) y la Dirección General de Aguas (DGA).

El análisis documental se complementó con una revisión de literatura científica nacional sobre impactos ambientales de la salmuera en Chile, cuyo auge en la investigación no tiene más de 10 años, incluyendo estudios realizados en macroalgas, moluscos y pastos marinos, tales como los trabajos de Manríquez et al. (2024) sobre los efectos metabólicos de la salinidad en larvas de *Concholepas concholepas* y *Mesodesma donacium*, o el estudio de Blanco-Murillo et al. (2023) sobre estrés fotoquímico en *Zostera chilensis*. También se recopiló literatura científica internacional, de países que tienen un desarrollo consolidado en la industria de la desalinización con más de 25 años de información y gestión en la emisión de salmuera, como el trabajo de Sánchez-Lizaso (2008), sobre *Posidonia oceánica*, esto permitió contextualizar la regulación en función de la evidencia ecológica disponible.

4.2 Análisis comparado de experiencias internacionales

El análisis comparado de experiencias internacionales se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica, normativa y técnica, siguiendo los lineamientos metodológicos propuestos por Kitchenham y Charters (2007). Este enfoque permitió estructurar un proceso de búsqueda, selección y síntesis de información de manera transparente y reproducible. La revisión se orientó a identificar marcos regulatorios aplicables a la descarga de salmuera en países con desarrollo avanzado en desalinización, específicamente Australia, España, Omán y Estados Unidos. Para ello, se definió una estrategia de búsqueda que incluyó bases de datos científicas indexadas (Web of Science, Scopus, ScienceDirect y SpringerLink) y literatura gris proveniente de agencias ambientales oficiales. Se aplicaron criterios explícitos de inclusión y exclusión, priorizando documentos que abordaran límites de salinidad, definición de zonas de mezcla, exigencias de monitoreo ambiental y biológico, y mecanismos de fiscalización. La información seleccionada fue sistematizada en una matriz comparativa, permitiendo identificar

convergencias y divergencias regulatorias, así como extraer criterios técnicos transferibles al contexto chileno.

4.3 Criterios técnicos para una futura norma chilena

La definición de criterios técnicos para una futura norma de emisión chilena se desarrolló mediante un proceso de síntesis metodológica que integró los resultados obtenidos en las fases previas del estudio. En primer lugar, se consideraron los vacíos y limitaciones identificados en el análisis documental del marco normativo chileno, los cuales permitieron establecer las brechas regulatorias prioritarias en relación con la gestión de descargas de salmuera al medio marino. En paralelo, se incorporaron los criterios técnicos y enfoques regulatorios identificados en el análisis comparado de experiencias internacionales, seleccionando aquellas prácticas respaldadas por evidencia científica y con factibilidad de implementación en el contexto institucional chileno. Desde el punto de vista metodológico, esta fase combinó un enfoque inductivo y deductivo. El análisis inductivo se aplicó para extraer principios regulatorios generales a partir de la observación de casos específicos, particularmente de los marcos normativos internacionales analizados. A través de este proceso, se identificaron patrones comunes y recurrencias en la regulación de descargas de salmuera, tales como el establecimiento de límites máximos de incremento de salinidad, la delimitación de zonas de mezcla y la exigencia de monitoreo ambiental y biológico, los cuales emergieron de manera consistente en distintos contextos regulatorios.

Complementariamente, el análisis deductivo permitió evaluar la aplicabilidad de estos principios generales al contexto chileno, contrastándolos con las características del marco normativo vigente, las condiciones ambientales locales y la capacidad institucional de fiscalización. Este proceso deductivo implicó descartar, ajustar o adaptar determinados criterios internacionales en función de su coherencia con la legislación nacional, su viabilidad técnica y su pertinencia ecológica para los ecosistemas marinos de Chile.

Finalmente, la integración de ambos enfoques permitió sistematizar los criterios técnicos propuestos en ejes estructurales como: límites de salinidad, delimitación de zonas de mezcla, monitoreo ambiental y biológico, y mecanismos de gestión y fiscalización, asegurando que la propuesta normativa resultante no solo se fundamente en buenas prácticas internacionales, sino que responda de manera coherente a las brechas regulatorias y condiciones específicas del contexto chileno

5 RESULTADOS

5.1 Caracterización del marco normativo chileno actual

El análisis documental y bibliográfico realizado permitió caracterizar el desarrollo normativo chileno en torno a la regulación ambiental de los recursos hídricos, particularmente en relación con los efluentes industriales. Los hallazgos dan cuenta de un proceso progresivo de institucionalización ambiental que, si bien presenta avances, aún enfrenta desafíos en términos de especificidad técnica, integración ecosistémica y adaptación a escenarios complejos como los ambientes costeros altamente intervenidos.

Se observó que el proceso de formalización de la regulación ambiental en Chile cobró especial fuerza a partir de la década de 1990, con la promulgación de la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994). Esta legislación se constituyó como la piedra angular de la normativa ambiental chilena, estableciendo principios rectores como la prevención, la responsabilidad ambiental y la sustentabilidad, junto con mecanismos institucionales como el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Previo a esta ley, existían normas dispersas en distintos cuerpos legales, muchas veces enfocadas en aspectos sectoriales sin una visión integrada del medio ambiente.

A partir de esta ley y sus reglamentos asociados, se establecieron los procedimientos para la elaboración de normas de calidad ambiental y normas de emisión, cuya formulación y dictación se rige por el Decreto N° 38 del año 2012 del Ministerio del Medio Ambiente, el cual regula la participación pública, los fundamentos técnicos y los procesos de revisión periódica.

El análisis permitió identificar tres tipos principales de normas ambientales, con sus respectivas características:

1. Normas primarias de calidad ambiental: diseñadas para proteger la salud humana frente a la exposición a contaminantes. Estas normas son de carácter nacional y establecen límites máximos permisibles de sustancias en matrices ambientales como el aire y el agua. Son esenciales para la formulación de políticas de prevención y planes de descontaminación.
2. Normas secundarias de calidad ambiental: orientadas a la protección de componentes específicos del medio ambiente, como cuerpos de agua, especies biológicas, ecosistemas o sitios de valor cultural. Estas normas pueden tener aplicación local o regional, y su elaboración requiere de una caracterización ecológica detallada del área objetivo.
3. Normas de emisión: regulan la cantidad máxima de contaminantes que pueden ser descargados directamente por fuentes emisoras, tales como instalaciones industriales, plantas mineras o desalinizadoras. Se aplican a distintas matrices (aire, agua, suelo) y buscan reducir o evitar impactos ambientales directos, además de facilitar el cumplimiento de las normas de calidad ambiental.

En el marco jurídico chileno, el artículo 19 N.º 8 de la Constitución Política de la República consagra el derecho de todas las personas a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, estableciendo como deber del Estado la protección de la naturaleza y la prevención del daño ambiental. En este contexto, el principal instrumento normativo aplicable a la regulación de residuos líquidos industriales (RILES) incluyendo aquellos con características propias de la salmuera generada por plantas desalinizadoras es el Decreto Supremo N.º 90 de 2000 (DS90/2000), emitido por el ministerio secretaría general de la presidencia, que tiene como objetivo prevenir la contaminación de los cuerpos de agua receptores en el territorio nacional. Para ello, establece límites máximos permisibles para distintos parámetros fisicoquímicos (como sólidos disueltos totales, metales pesados, temperatura y pH), aplicables tanto a emisiones puntuales como difusas que lleguen a cuerpos marinos o continentales. Si bien esta normativa no fue diseñada específicamente para

abordar la descarga de salmuera, sus disposiciones permiten establecer umbrales de control para algunos de los contaminantes más relevantes presentes en este tipo de efluente, lo que la convierte en un marco base útil, aunque insuficiente, para una regulación ambiental más específica y robusta en el contexto del desarrollo de la desalinización en Chile.

En este contexto, el DS90/2000, establece las condiciones y límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Esta norma ha sido aplicada como referencia principal para evaluar efluentes mineros y de emisarios submarinos, pero su formulación no considera aún de forma suficiente los efectos acumulativos ni la sensibilidad específica de ecosistemas marinos de alta productividad biológica.

La determinación del "contenido natural" de cada cuerpo receptor, entendido como la concentración natural de un contaminante en dicho cuerpo, es responsabilidad de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección General de Territorio Marítimo (DGMT). La norma clasifica los cuerpos receptores en cinco categorías y establece valores máximos específicos para cada una, los cuales deben ser respetados por las descargas líquidas:

- Cuerpos de agua fluviales sin capacidad de dilución.
- Cuerpos de agua fluviales con capacidad de dilución.
- Cuerpos lacustres.
- Cuerpos marinos situados dentro de la zona de protección litoral.
- Cuerpos marinos ubicados fuera de la zona de protección litoral.

Además, el instrumento regula los procedimientos para medir y controlar las descargas, asignando la responsabilidad de fiscalizar su cumplimiento a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).

En contexto, los contaminantes relacionados a las descargas de salmuera hipersalinas de plantas desalinizadoras sólo se reconoce el cobre como único analito a ser evaluado (Tabla 5.1), el que no constituye una proporción y característica importante de estos Riles, mientras que los elementos constitutivos naturalmente en el agua de mar y en el agua de rechazo se observan en la Tabla 5.2

Tabla 5.1. Límites máximos permitidos por el DS 90/2000 para las descargas de Residuos Líquidos a cuerpos de agua marinos

Contaminantes	Unidad	Dentro ZPL	Fuera ZPL
Aceites y Grasas	mg/L	20	150
Aluminio	mg/L	1	10
Arsénico	mg/L	0,2	0,5
Cadmio	mg/L	0,02	0,5
Cianuro	mg/L	0,5	1
Cobre	mg/L	1	3
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	1000-70*	-
Índice de Fenol	mg/L	0,5	1
Cromo hexavalente	mg/L	0,2	0,5
Cromo total	mg/L	2,5	10
DBO5	mg/L	60	-
Estaño	mg/L	0,5	1
Fluoruro	mg/L	1,5	6
Fósforo	mg/L	5	-
Hidrocarburos totales	mg/L	10	20
Hidrocarburos volátiles	mg/L	1	2
Hierro disuelto	mg/L	10	-
Manganeso	mg/L	2	4
Mercurio	mg/L	0,005	0,02
Molibdeno	mg/L	0,1	0,5
Níquel	mg/L	2	4
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	50	-
pH	Unidad	6,0 - 9,0	5,5 - 9,0
Plomo	mg/L	0,2	1
SAAM	mg/L	10	15
Selenio	mg/L	0,01	0,03
Sólidos sedimentables	ml/L/h	5	20
Sólidos suspendidos totales	mg/L	100	300
Sulfuro	mg/L	1	5
Zinc	mg/L	5	5
Temperatura	° C	30	-

La Tabla 5.2 presenta las concentraciones (mg/L) de elementos constitutivos del agua de mar natural y del agua de rechazo proveniente de procesos de desalinización (agua de rechazo). En general, el agua de rechazo muestra concentraciones superiores para la mayoría de los elementos analizados. Se observan incrementos absolutos relevantes en sodio (+8518 mg/L), cloro (+15 785 mg/L), sulfato (+2305 mg/L) y magnesio (+1041 mg/L), así como aumentos en potasio (+345 mg/L) y bicarbonato (+87 mg/L). En el caso de los nutrientes y metales traza, el nitrato presenta un incremento de +4.0 mg/L, mientras que el cobre duplica su concentración respecto al agua de mar natural. En contraste, el calcio registra una disminución de 72 mg/L en el agua de rechazo en comparación con el agua de mar natural.

Tabla 5.2. Concentraciones (mg/L) de elementos constitutivos del agua de mar natural y del agua de rechazo provenientes de procesos de desalinización

Elemento	Agua de mar (mg/L)	Agua de rechazo (mg/L)	Diferencia absoluta (mg/L)	Incremento relativo
Calcio	427.00	355.00	-72.00	-16.9 %
Magnesio	1256.00	2297.00	+1041.00	+82.9 %
Sodio	11250.00	19768.00	+8518.00	+75.7 %
Potasio	401.00	746.00	+345.00	+86.0 %
Cloro	20289.00	36074.00	+15785.00	+77.8 %
Sulfato	2758.00	5063.00	+2305.00	+83.6 %
Bicarbonato	149.00	236.00	+87.00	+58.4 %
Cobre	0.07	0.14	+0.07	+100 %
Nitrato	2.40	6.40	+4.00	+166.7 %

5.1.1 Norma de calidad secundaria de bahías

El 2 de octubre de 2024 fue publicado en el Diario Oficial el Decreto Supremo N.º 43 del ministerio del medio ambiente (DS43/2023), mediante el cual se establecen las primeras Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) orientadas a la protección de las aguas marinas y sedimentos de la Bahía de Quintero–Puchuncaví.

La promulgación de este instrumento normativo constituye un hito en la regulación ambiental costera del país, al representar la primera normativa de carácter específico que fija umbrales de calidad ambiental para cuerpos marinos y sus sedimentos en un territorio históricamente expuesto a múltiples presiones industriales.

Las NSCA establecidas por el DS43/2023 tienen por finalidad resguardar la integridad de los ecosistemas marinos y asegurar los usos legítimos del recurso hídrico, mediante la definición de concentraciones máximas permitidas para un conjunto de contaminantes prioritarios. Entre estos se incluyen metales pesados como arsénico, cobre y zinc, así como hidrocarburos y compuestos orgánicos persistentes, considerando tanto la columna de agua como el compartimento sedimentario. La incorporación de estos parámetros permite abordar de manera más integral los procesos de deterioro ambiental acumulativo que han afectado a esta bahía, reconocida como una de las zonas costeras más industrializadas del país.

El cumplimiento de las normas será verificado a través de un Programa de Medición y Control de Calidad Ambiental del Agua, cuya elaboración y ejecución recaerá en la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), con el apoyo técnico de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), y que deberá contar con informe favorable del Ministerio del Medio Ambiente. Dicho programa deberá ser implementado dentro de un plazo máximo de seis meses desde la publicación del decreto y constituye el principal instrumento operativo para la evaluación periódica del estado ambiental de las aguas y sedimentos de la bahía.

Este programa contempla un esquema de monitoreo sistemático de carácter estacional, con una frecuencia mínima de cuatro campañas anuales en las áreas de vigilancia definidas por la norma (**Figura 5.1. Áreas de vigilancia para las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas marinas de la bahía de Quintero- Puchuncaví. Decreto 43/2023 del ministerio del medio ambiente.**), orientado a

caracterizar y evaluar la variación temporal de la calidad ambiental. Entre los parámetros mínimos a considerar se incluyen la medición de materia orgánica en sedimentos, así como oxígeno disuelto, pH, salinidad y temperatura en la columna de agua, esta última incorporando además un sitio de referencia externo a la bahía. Complementariamente, el programa establece la realización de ensayos ecotoxicológicos en organismos representativos de distintos niveles tróficos, tales como algas, equinodermos, moluscos y crustáceos, junto con la ejecución de al menos dos campañas anuales de muestreo de bioindicadores en los seis sectores definidos como áreas de vigilancia (**Tabla 5.3**).

En su conjunto, el DS43/2023 sienta un precedente relevante para el desarrollo futuro de regulaciones ambientales aplicables a otros sistemas costeros del país expuestos a descargas industriales, incluidas aquellas asociadas a plantas desalinizadoras, al incorporar un enfoque que integra criterios fisicoquímicos, biológicos y ecosistémicos en la gestión de la calidad ambiental marina.

Tabla 5.3. Norma de Calidad secundaria Decreto 43/2023, establece niveles de calidad ambiental por área de vigilancia en la Bahía de Quintero-Puchuncaví.

Parámetro	AMERB Norte		AMERB Sur		Bahía Norte		Bahía Centro		Bahía Sur		Submareal Profundo	
	Agua (mg/L)	Sed (mg/kg)	Agua (mg/L)	Sed (mg/kg)	Agua (mg/L)	Sed (mg/kg)	Agua (mg/L)	Sed (mg/kg)	Agua (mg/L)	Sed (mg/kg)	Agua (mg/L)	Sed (mg/kg)
Arsénico	0,008	–	0,008	–	0,008	20,00	0,008	20,00	0,008	20,00	0,008	20,00
Benceno	0,008	–	0,008	–	0,008	–	0,008	–	0,008	–	0,008	–
Bromoformo	0,001	–	0,001	–	0,001	–	0,001	–	0,001	–	0,001	–
Cloro libre residual	0,0075	–	0,0075	–	0,0075	50,63	0,0075	50,63	0,0075	50,63	0,0075	50,63
Cobre	0,003	–	0,003	–	0,003	52,30	0,003	52,30	0,003	52,30	0,003	52,30
Cromo (VI)	0,002	–	0,002	–	0,002	–	0,002	–	0,002	–	0,002	–
Etilbenceno	0,025	–	0,025	–	0,025	–	0,025	–	0,025	–	0,025	–
HAPS	–	–	–	–	–	2,00	–	2,00	–	2,00	–	2,00
Mercurio	0,00073	–	0,00073	–	0,00073	0,40	0,00073	0,40	0,00073	0,40	0,00073	0,40
Naftaleno	0,0059	–	0,0059	–	0,0059	–	0,0059	–	0,0059	–	0,0059	–
Níquel	0,007	–	0,007	–	0,007	30,90	0,007	30,90	0,007	30,90	0,007	30,90
Plomo	0,0055	–	0,0055	–	0,0055	33,90	0,0055	33,90	0,0055	33,90	0,0055	33,90
Tolueno	0,215	–	0,215	–	0,215	–	0,215	–	0,215	–	0,215	–
Vanadio	0,001	–	0,001	–	0,001	90,00	0,001	90,00	0,001	90,00	0,001	90,00
4-Nonilfenol	0,0007	–	0,0007	–	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007

Sed: Sedimento

Nota: Para la matriz de columna de agua, la fracción de metales normados corresponde a la total, mientras que para la matriz de sedimentos marinos, la fracción de los metales normados corresponde a la extraíble.

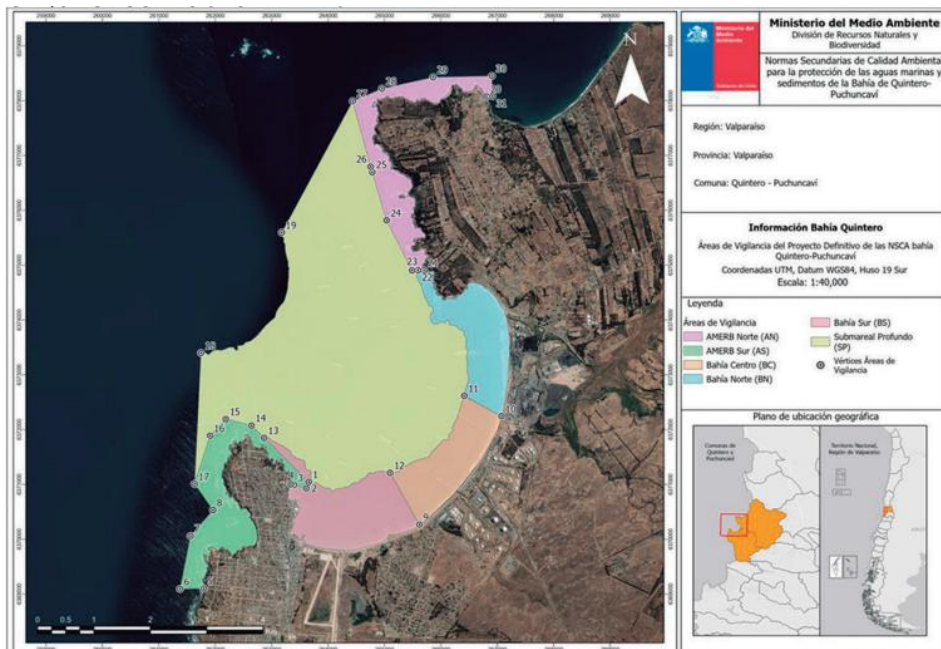


Figura 5.1. Áreas de vigilancia para las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas marinas de la bahía de Quintero- Puchuncaví. Decreto 43/2023 del ministerio del medio ambiente.

Tabla 5.4. Evaluación de fortalezas y vacíos del marco normativo chileno en relación con la salinidad y las descargas hipersalinas.

Instrumento normativo	Ámbito de aplicación	Fortalezas	Debilidades / Vacíos frente a la salmuera	Observaciones específicas sobre salinidad
Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente	Marco general de gestión ambiental; establece los instrumentos de evaluación y control.	Define los principios de prevención y responsabilidad ambiental. Obliga a someter proyectos al SEIA.	No establece parámetros ni límites técnicos. La salinidad no se considera contaminante.	Reconoce la necesidad de normas de emisión específicas, pero no aborda descargas hipersalinas.
Decreto Supremo N° 90/2000 de ministerio secretaria general de la presidencia	Norma de emisión para descargas de residuos líquidos a cuerpos marinos y continentales superficiales	Es la principal norma de control de efluentes líquidos. Define parámetros y límites para compuestos químicos comunes.	No incluye salinidad, conductividad ni densidad como parámetros. No contempla zonas de mezcla.	Regula DBO, SST, metales y aceites, pero omite la salinidad; inaplicable a salmueras hipersalinas.
Decreto Supremo N° 144/2008 de ministerio secretaria general de la presidencia	Norma primaria de calidad ambiental para la protección de aguas marinas y estuarinas	Cubre contaminantes relevantes (metales, hidrocarburos, nutrientes).	No aborda la salinidad ni el balance iónico. Falta evidencia local para definir límites ecológicos.	La salinidad no se regula como factor de calidad, pese a ser un estresor abiótico reconocido.
Decreto Supremo N° 43/2023 del ministerio del medio ambiente	Normas secundarias de calidad ambiental para bahías (ej. Bahía de Quintero–Puchuncaví)	Considera indicadores biológicos, fisicoquímicos y límites para contaminantes locales.	La salinidad no figura como parámetro; se priorizan metales y compuestos orgánicos.	Útil para definir zonas sensibles, pero insuficiente para gestionar descargas de salmuera.
Decreto Supremo N° 38/2012 del ministerio del medio ambiente	Reglamento para la dictación de normas de calidad y de emisión	Proporciona la vía formal para crear una norma específica de salmuera.	No entrega criterios técnicos predefinidos; depende de evidencia científica disponible.	Es el mecanismo más adecuado para incorporar futuros parámetros de salinidad.
Guías técnicas de evaluación de proyectos de desalinización (SEA–MMA)	Documento orientador para el SEIA.	Reconoce el riesgo de impactos por hipersalinidad y recomienda modelaciones numéricas.	No tiene fuerza normativa; recomendaciones no obligatorias.	Incluye la salinidad como parámetro de seguimiento, pero sin límites definidos.
Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) de plantas desalinizadoras	Instrumentos administrativos de aprobación ambiental.	Incorporan exigencias de monitoreo específicas y adaptadas a cada proyecto.	Inconsistencia entre proyectos: no existe criterio estandarizado.	Algunas RCA incluyen seguimiento de salinidad y cloruros, pero sin valores máximos establecidos.

En Chile, el marco regulatorio exige Estudios de Impacto Ambiental para proyectos que generan salmuera, la normativa no define estándares explícitos para salinidad, temperatura ni contenido químico en los efluentes vertidos al mar (**Tabla 5.4.** Evaluación de fortalezas y vacíos del marco normativo chileno en relación con la salinidad y las descargas hipersalinas.. Un análisis de planes de monitoreo ambiental de plantas de osmosis inversa señala que solo alrededor del 48 % de los planes de monitoreo ambiental revisados incluyen parámetros ambientales relevantes (como monitoreo biológico o indicadores eco-toxicológicos), lo que revela un déficit en la evaluación y control de los impactos ambientales potenciales (Sola et al., 2019). Asimismo, actualmente se desconoce el efecto de la salmuera en la biota costera chilena, ya que la mayoría de los estudios internacionales utilizan especies ecológicamente distintas de la costa del Humboldt, lo cual limita la validez de los métodos de biomonitoreo actuales.

Por lo tanto, existe un claro incentivo para que Chile adopte estándares internacionales de gestión de salmuera como establecer límites máximos de aumento de salinidad, definir requisitos de dispersión mediante corrientes marinas, exigir uso de difusores y sistemas de monitoreo biológico específicos, aplicando tecnologías emergentes (mezcla previa con agua de mar, zona de mezcla definida, recuperación de minerales) y protocolos de biomonitoreo adaptados a especies locales para garantizar una operación ambientalmente sustentable alineada con mejores prácticas globales.

En contraste, otros países han desarrollado estándares más estrictos para regular los vertidos de salmuera, imponiendo requisitos sobre salinidad, composición química, y localización estratégica de descargas en corrientes marinas que favorezcan la dispersión y dilución natural (Panagopoulos & Haralambous, 2020b). Por ejemplo, estudios globales proponen que los mejores enfoques incluyen mezcla controlada con corrientes fuertes, uso de difusores submarinos, y monitoreo continuo para minimizar impactos en los hábitats receptores.

5.2 Análisis comparado de normativas internacionales

Pocas naciones han desarrollado sistemas normativos avanzados que integran de manera eficaz la regulación ambiental con mecanismos de control, fiscalización y participación ciudadana, especialmente en sectores altamente intervenidos como la minería y la desalinización. Estas naciones no solo cuentan con marcos regulatorios robustos, sino que también promueven activamente modelos de desarrollo basados en principios de sostenibilidad, protección de ecosistemas marinos y uso eficiente de los recursos hídricos.

Se realizó un análisis comparativo de la legislación vigente en Australia y Estados Unidos, enfocándose particularmente en los criterios, estándares técnicos y guías de buenas prácticas aplicadas para la regulación de residuos líquidos industriales (RILES) derivados del proceso de desalinización y el vertido de salmuera hipersalina al medio marino.

5.2.1 Australia

En Australia, cada Estado y Territorio cuenta con una legislación integral y regulaciones específicas destinadas a gestionar y proteger los recursos hídricos. Cada jurisdicción establece los requisitos necesarios para mantener la calidad del agua, determinando límites máximos de emisión de contaminantes hacia cuerpos de agua a través de licencias específicas, las que limitan tanto la cantidad como las concentraciones máximas permitidas de contaminantes en las descargas líquidas.

Por ello, cualquier individuo o entidad que desee verter contaminantes en un cuerpo de agua debe obtener previamente una licencia de emisión emitida por el estado correspondiente. Estas regulaciones son administradas y supervisadas por la Autoridad de Protección Ambiental o la agencia ambiental de la jurisdicción pertinente.

A nivel federal, el Gobierno de Australia ha desarrollado guías ambientales para el control de la contaminación del agua. Un ejemplo destacado son las Guías para la Calidad de Aguas Dulces y Marinas en Australia y Nueva Zelanda (Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality: ANZECC), introducidas en el año 2000. Estas guías no establecen estándares obligatorios, sino que proporcionan una base técnica para apoyar la toma de decisiones tanto de las empresas mineras como de las autoridades ambientales de cada Estado o Territorio. En la práctica, estas guías han comenzado a utilizarse con mayor frecuencia como estándares de referencia por las autoridades ambientales locales.

Las Guías para la Calidad de Aguas Dulces y Marinas se consideran una herramienta científica ampliamente respaldada para evaluar la calidad del agua. Aunque no tienen carácter obligatorio, invitan a los estados y territorios a desarrollar marcos legales compatibles y consistentes con sus recomendaciones, acordadas a nivel nacional.

La calidad del agua varía según su uso, conocido como “valores ambientales”, que incluyen:

Protección de Ecosistemas Acuáticos (Aguas Dulces y Marinas): Este valor prioriza la conservación de la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos, asegurando que las condiciones permitan mantener comunidades equilibradas de flora y fauna, comparables con hábitats naturales.

- **Recreación y Estética:** Se refiere a la calidad del agua necesaria para actividades recreativas que implican contacto directo, como nadar o bucear, así como actividades de contacto indirecto, como la pesca o navegación.
- **Agricultura (Irrigación):** Considera la calidad del agua para el riego de cultivos y pastos, asegurando la salud y productividad agrícola.
- **Agricultura (Ganadería):** Protege la calidad del agua utilizada en la cría de ganado, contribuyendo a la producción animal saludable.

- Acuicultura: Enfocado en garantizar la calidad del agua para el desarrollo y supervivencia óptimos de especies acuáticas, resguardando también la seguridad alimentaria para los consumidores.

Las guías incluyen límites recomendados de contaminantes para cada valor ambiental, los cuales sirven como medidas preventivas más que como mandatos legales. Si la calidad del agua no cumple con estos valores de referencia, se podría indicar la necesidad de estudios más detallados para evaluar los impactos de los contaminantes o la implementación de medidas correctivas, como el tratamiento de las descargas líquidas industriales.

En cuanto a los ecosistemas acuáticos, los valores límite para contaminantes se determinan a partir de análisis estadísticos avanzados basados en datos de toxicidad acuática. Estos valores se calculan para distintos niveles de protección: 99%, 95%, 90% y 80%, lo que representa el porcentaje de especies acuáticas que se busca proteger. Hart et al. (1990 y 1991) sugirieron que, en el caso de las aguas dulces, la salinidad (medida a través de la conductividad) no debería superar los 1000 mg/L, lo que equivale aproximadamente a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para las aguas estuarinas y costeras, se recomendó que las variaciones de salinidad se mantuvieran por debajo del 5% en comparación con los niveles de referencia natural, según lo establecido en las recomendaciones de ANZECC (1992).

En Australia, la construcción de una planta desalinizadora cerca de la costa requiere la aprobación de la Agencia Australiana de Protección Ambiental (EPA) para las Actividades Relacionadas con el Medio Ambiente se debe realizar una evaluación de impacto ambiental que demuestre que no hay impactos significativos en el entorno circundante. Cualquier impacto previsto debe minimizarse con la implementación de medidas de gestión apropiadas. Algunos ejemplos son la construcción de la Planta Desalinizadora de Gold Coast, donde las autoridades locales propusieron una zona de mezcla de 120 metros de ancho y 225 metros de largo para la eliminación segura de la salmuera de la planta desalinizadora. Por otra parte, una planta de ósmosis inversa de agua de mar en el área metropolitana de Perth, la EPA australiana exige que la salinidad esté dentro de 1,2 psu de los niveles

ambientales dentro de los 50 m del punto de descarga y dentro de 0,8 psu de los niveles de fondo dentro de los 1000 m del punto de descarga.

5.2.2 Estados Unidos

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) es la entidad federal de los Estados Unidos encargada de administrar, implementar y hacer cumplir las leyes ambientales. Bajo la autoridad de la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA, 1977), que constituye la legislación federal principal para regular y controlar la contaminación del agua, la EPA ha establecido los estándares nacionales para la calidad del agua y los límites de descarga de aguas residuales a cuerpos de agua navegables.

Para definir estos estándares nacionales, la Ley de Agua Limpia establece que la EPA debe determinar los límites de descarga hacia aguas superficiales basándose en los estándares locales de calidad del agua o en los estándares correspondientes a la mejor tecnología disponible para reducir los contaminantes en las descargas, adoptando siempre el más estricto de los dos. Así, los estándares se fundamentan en criterios tecnológicos, conocidos como las "effluent guidelines", así como en los estándares basados en la calidad del agua, que aseguran que los cuerpos receptores sean aptos para actividades como la pesca y la natación. Además, la Ley de Agua Limpia prohíbe el vertido de aceites y otras sustancias peligrosas que puedan causar daños.

Estos estándares son supervisados tanto a nivel federal como estatal, en los Estados Unidos, cualquier persona o entidad que vierta contaminantes a un cuerpo de agua debe obtener un permiso de emisión estatal. Este permiso establece la cantidad y concentración de los contaminantes permitidos en las descargas, con el fin de garantizar que el cuerpo receptor mantenga una calidad adecuada para su uso, cumpliendo con los estándares nacionales correspondientes. La Sección 402 de la Ley de Agua Limpia establece el Sistema Nacional de Eliminación de

Descargas de Contaminantes (NPDES, por sus siglas en inglés), que regula las fuentes puntuales de descarga. Las Fuentes Puntuales, según el NPDES, se definen como cualquier lugar identificable desde el cual se descargan contaminantes a cuerpos de agua. Esto incluye tuberías, drenajes, canales, y otras estructuras similares. Esta definición abarca una amplia variedad de actividades, como las descargas directas de fábricas, plantas de tratamiento de aguas residuales y las descargas de efluentes provenientes de la minería, entre otras.

En Estados Unidos existen regulaciones que norman directamente la descarga de salmuera en el mar, estableciendo el concepto de zona de mezcla, las cuales permiten regular las descargas contaminantes o tóxicas dentro de la cual la salmuera es considerada. Las normas y requisitos administrativos para las zonas de mezcla se basan en evaluaciones de ingeniería, ecológicas, y en la viabilidad económica de la mitigación (USEPA 1994)

Las características de la zona de mezcla de una emisión consideran los siguientes principios:

- a) no deben perjudicar la integridad del agua.
- b) no debe existir letalidad para los organismos que pasan a través de las zonas de mezcla.
- c) no debe haber riesgos significativos para la salud de los humanos.

Un instrumento de gestión en la zona de mezcla, es la Norma de Oregón, la cual define una zona de mezcla de agua la cual establece que la descarga debe reducir la toxicidad de organismos por debajo de las concentraciones letales, estos criterios deben cumplirse al final de la tubería a menos que se pueda demostrar que la dilución inmediata en la emisión dentro de la zona de mezcla y se reduce la toxicidad por debajo de las concentraciones letales y no causará letalidad a los organismos que interactúan con la zona de mezcla.

5.2.3 Unión Europea

las directivas de política hídrica de la Unión Europea, donde la Directiva Marco del Agua (DMA) es la más relevante. Mencionada Directriz no tiene regulaciones claras ni límites para controlar la eliminación de salmuera en el agua de mar. La DMA considera que la eliminación de salmuera puede causar ligeros cambios en los niveles de salinidad del agua de mar que no afectan potencialmente a la vida marina, sin embargo, la DMA tiene regulaciones muy exhaustivas para la eliminación de salmuera en acuíferos subterráneos.

5.2.4 España

A pesar de lo anterior, España ha reconocido los efectos nocivos del vertimiento de salmuera en el medio marino, el Ministerio de Medioambiente y Medio rural y Marino (MARM) de España, está utilizando valores umbrales críticos para controlar los vertidos de salmuera en el mar, el caso emblemático es la recuperación de poblaciones de P. oceánica gravemente afectadas por vertidos de salmuera, la cual ha evidenciado recuperación al establecer un máximo de salinidad de 38,5 psu donde la salinidad natural es de 37,5, es decir, el umbral está solo a 1 psu por encima de la salinidad ambiental promedio.

5.2.5 Omán

En caso de Omán, nación ubicada en la península arábiga cuyas costas limitan con el mar arábigo y el golfo pérsico, establece que no se puede emitir tanto directa como indirectamente residuos líquidos en el medio marino sin la obtención previa de una licencia, dentro de las obligaciones que deben cumplir las empresas desalinizadoras son el cumplimiento de los límites máximos establecidos donde la salinidad no debe superar en más de 2 psu por sobre de las condiciones ambientales del agua y una zona de mezcla de 300 metros de diámetro.

La **Tabla 5.5** expone normas de calidad secundarias de cada país analizado con sus respectivas normas federales o locales según corresponda, donde se

reconocen diferentes estándares de gestión, ya sea, regulando sobre incrementos relativos de salinidad en el cuerpo de agua receptor, como valores absolutos, el cual establece un límite máximo permitido en el borde de la zona de mezcla otorgada al titular. Una particularidad dentro de los instrumentos ambientales revisados es el caso de España, donde desde la ciencia se comprobó que valores absolutos sobre 40 psu provocan el detrimento y mortandad del alga *Posidonia oceánica* objeto de protección por la Unión Europea, la cual, es indicadora de buena calidad de las aguas marinas mediterráneas.

Tabla 5.5. Estándares ambientales internacionales para la regulación de descarga y niveles de mezcla de salmuera en el medio ambiente marino.

País	Autoridad	Límite de Salinidad	
		Incremento relativo	Valor Absoluto
Chile	Ministerio del medio Ambiente	N/A	N/A
	Oakajee Port ¹	≤ 1 ppt	N/A
Australia	Perth EPA ²	≤ 1,2 ppt a 50 m ≤ 0,8 ppt a 1 km	N/A
	Sydney ³	≤ 1 ppt a 50-70 m	N/A
	Gold Coast ⁴	≤ 1,2 ppt a 50 m	N/A
Estados Unidos	US EPA ⁵	≤ 4% ppt	N/A
	Carisbad ⁶	N/A	≤ 40 psu a 304,8 m.
	Huntington Beach ⁷	N/A	≤ 40 psu a 304,8 m.
España	MOPU (1988) ⁸	< 10% ppt	N/A
	- IHA y CEDEX (2011) ⁹	N/A	≤ 38,5 psu el 25% de las observaciones de <i>Posidonia oceánica</i> .
		N/A	≤ 40 psu el 5% de las observaciones de <i>Posidonia oceánica</i> .
Omán	Sultanate of Oman	≤ 2 ppt a 300 m	N/A

Visitar ANEXO 1

1: Victoria Government Gazette
2: Management of Brine Discharges to Coastal Waters
3: ANZECC (2000)

6: San Diego Regional Water Quality Control Board 2006
7: Santa Ana Regional Water Quality Control Board 2012

El análisis comparado de normativas internacionales tuvo como producto principal la sistematización de los criterios regulatorios aplicados en países con desarrollo avanzado en la industria de la desalinización, los cuales fueron organizados en una matriz técnica que integra límites de salinidad, definiciones de zonas de mezcla, exigencias de monitoreo ambiental y biológico, y mecanismos de fiscalización. Este entregable constituye un insumo central para la etapa siguiente del estudio, en la medida que permite transformar la revisión normativa comparada en una base estructurada de referencia para la formulación de criterios técnicos aplicables al contexto chileno. De esta forma, la matriz resultante no solo articula la evidencia regulatoria internacional, sino que también cumple un rol operativo en la consecución del objetivo general de la investigación, al sustentar de manera directa la propuesta de lineamientos normativos orientados a la regulación de las descargas de salmuera en el medio marino.

5.3 Definición de criterios técnicos aplicables a una futura norma de emisión para descargas de salmuera en Chile

A partir del análisis normativo nacional e internacional realizados en las fases anteriores, se definieron criterios técnicos fundamentales que orientan el diseño de una futura norma de emisión chilena para descargas de salmuera al medio marino. Estos criterios se estructuraron en torno a cuatro ejes principales: parámetros de control y límites de salinidad, delimitación de zonas de mezcla, monitoreo ambiental y biológico, y mecanismos de gestión y fiscalización. Cada eje integra evidencia científica, factibilidad técnica y coherencia normativa, con el propósito de avanzar hacia un marco regulatorio adaptado a las condiciones oceanográficas y ecológicas de Chile.

5.3.1 Parámetros de control y límites de salinidad.

En base al análisis de las normativas de Australia, España y Omán, se propone adoptar un enfoque combinado que establezca límites absolutos y relativos, considerando la línea base ambiental local. Se sugiere que el incremento máximo permitido de salinidad no supere +1 psu respecto del promedio natural a una distancia de 50 m del punto de descarga, y que el límite absoluto de salinidad no exceda 40 psu, valor asociado a afectaciones fisiológicas en organismos marinos bentónicos y fitobentónicos como lo propone Sánchez-Lizaso et al. (2008) (Park et al., 2011). Este rango se considera ambientalmente seguro y compatible con las condiciones oceanográficas del norte de Chile. La incorporación de la salinidad como parámetro explícito dentro del DS90/2000 o alguna norma complementaria, permitiría transitar desde un enfoque químico genérico a una regulación más integral acorde al desarrollo de la industria en Chile.

5.3.2 Delimitación de zonas de mezcla.

El segundo criterio técnico propuesto es la definición estandarizada de zonas de mezcla. Se propone que toda descarga de salmuera cuente con una evaluación oceanográfica previa que determine la distancia mínima requerida para alcanzar una dilución efectiva del efluente. Esta evaluación debe considerar la velocidad de las corrientes, batimetría local, estratificación térmica y densidad del efluente. A partir del análisis de las normas de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 1994) y la Environmental Protection Authority de Australia, se recomienda establecer zonas de mezcla variables, pero sujetas a un máximo general de 300 m desde el punto de descarga. Dentro de esta zona, la salinidad podrá exceder temporalmente los límites de la norma, siempre que no genere letalidad ni

alteraciones permanentes en la biota. Este criterio busca equilibrar la viabilidad técnica de las plantas con la protección de los ecosistemas costeros.

5.3.3 Monitoreo ambiental y biológico.

Se sugiere incluir organismos bentónicos locales como poliquetos, macroalgas pardas y moluscos filtradores para evaluar respuestas fisiológicas y comunitarias frente al incremento de salinidad, siguiendo metodologías aplicadas en el Mediterráneo y adaptadas por autores como Borja et al. (2010) y Del-Pilar-Ruso et al. (2015). El monitoreo propuesto combina tres niveles: parámetros fisicoquímicos (salinidad, temperatura, conductividad, cloruros), indicadores biológicos de estructura comunitaria (índices AMBI o BENTIX) y ensayos ecotoxicológicos de toxicidad aguda y subcrónica que estén integrados en los programas de vigilancia ambiental. Este esquema permitiría establecer una base científica sólida para la gestión adaptativa de descargas marinas en Chile, superando el enfoque puramente químico que actualmente caracteriza al DS 90/2000.

5.3.4 Gestión, fiscalización y mecanismos de incorporación.

Finalmente, se propone que los criterios técnicos anteriores se integren al marco jurídico chileno mediante dos vías complementarias: (a) la actualización del Decreto Supremo N° 90/2000, incorporando nuevos parámetros asociados a la salinidad, biocidas y metales traza, o (b) la elaboración de un nuevo decreto específico para descargas de salmuera, siguiendo el procedimiento establecido en el DS N° 38/2012, que regula la dictación de normas de emisión. La segunda alternativa ofrece mayor flexibilidad y pertinencia técnica, permitiendo establecer límites y metodologías acordes a la realidad de las plantas desalinizadoras. Se recomienda además la creación de un comité técnico interinstitucional integrado por MMA, SMA, DIRECTEMAR y DGA, responsable de definir las condiciones de monitoreo y

fiscalización, cuyo marco se plasma en este trabajo, lo que permite garantizar la coherencia entre la regulación nacional y los compromisos internacionales en materia de protección marina (UNEP, 2019; WHO, 2007).

6 DISCUSIÓN

6.1 Implicancias del marco normativo chileno frente a la regulación de descargas de salmuera

Los resultados del análisis documental del marco normativo chileno evidencian un proceso progresivo de institucionalización de la gestión ambiental de los recursos hídricos, particularmente a partir de la promulgación de la Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300, 1994; Skewes Urtubia, 2017). Este proceso permitió consolidar un entramado institucional y normativo orientado a la evaluación, fiscalización y control ambiental de actividades productivas, así como al establecimiento de normas de calidad ambiental y normas de emisión aplicables a distintos cuerpos receptores, incluyendo aguas marinas y continentales superficiales (Abarca, 2008; Decreto Supremo N.º 90/2000). En términos generales, este marco ha contribuido a fortalecer la protección del medio ambiente marino y a ordenar la relación entre desarrollo productivo y resguardo ambiental; sin embargo, al contrastar sus instrumentos con las características específicas de las descargas de salmuera provenientes de plantas desalinizadoras, se evidencian limitaciones estructurales que restringen su efectividad para abordar este tipo de efluentes no convencionales. Estas limitaciones han sido identificadas en la literatura como una debilidad recurrente de los marcos regulatorios generalistas, los cuales tienden a focalizarse en contaminantes tradicionales sin incorporar adecuadamente parámetros clave asociados a la desalinización, como la salinidad y la composición iónica del efluente (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014).

Estas limitaciones se expresan de manera particularmente clara en el DS.º 90/2000, principal norma de emisión aplicable a residuos líquidos industriales descargados a

aguas marinas y continentales superficiales. Este instrumento fue concebido bajo un enfoque generalista, orientado al control de contaminantes tradicionales asociados principalmente a actividades industriales y mineras, priorizando parámetros fisicoquímicos clásicos y metales regulados (Decreto Supremo N.º 90/2000; Abarca, 2008). Si bien la norma establece límites máximos permisibles y clasifica los cuerpos receptores según su capacidad de dilución, su formulación no incorpora de manera explícita variables críticas propias de la descarga de salmuera, como la salinidad y la composición iónica del efluente, las cuales constituyen los principales factores de presión ambiental asociados a los procesos de desalinización (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014). Asimismo, el DS 90/2000 no considera de forma explícita los efectos potenciales derivados de incrementos locales y persistentes de sales disueltas en ecosistemas marinos, particularmente en escenarios de descarga continua o de limitada capacidad de dispersión, omisión que ha sido ampliamente señalada como una debilidad de los marcos regulatorios no específicos para la desalinización (Roberts et al., 2010; Fernández-Torquemada & Sánchez-Lizaso, 2005).

La relevancia de estas limitaciones normativas se ve reforzada por la evidencia fisicoquímica obtenida en este estudio, donde se documentan diferencias sustantivas entre el agua de mar natural y el agua de rechazo de desalinización, tanto en la concentración total de sales disueltas como en la presencia de elementos traza asociados al proceso de tratamiento (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014). En particular, se observa un aumento significativo en la concentración de ciertos metales traza en el efluente, como el cobre, cuya concentración se incrementa en aproximadamente un 100% respecto a las condiciones naturales del agua de mar, en concordancia con observaciones realizadas en descargas de plantas desalinizadoras a nivel internacional (Kress et al., 2020; Neubauer, 2022). Este enriquecimiento adquiere especial relevancia ambiental considerando el carácter ecotóxico del cobre para numerosos organismos marinos, especialmente algas, invertebrados bentónicos y estadios tempranos de desarrollo, aun cuando se encuentre presente en concentraciones relativamente

bajas en términos absolutos (Fernández-Torquemada & Sánchez-Lizaso, 2005; Capó et al., 2020; Manríquez et al., 2024). En este contexto, la descarga reiterada de un efluente enriquecido en cobre puede contribuir a procesos de bioacumulación local y a modificaciones en la estructura y funcionamiento de las comunidades biológicas, incluso en escenarios donde no se registran superaciones puntuales de los límites normativos tradicionales establecidos para contaminantes individuales (Roberts et al., 2010; Borja et al., 2010).

De manera complementaria, la reducción observada en la concentración de calcio en la salmuera respecto al agua de mar natural introduce una dimensión adicional de impacto potencial que rara vez es considerada en los marcos regulatorios convencionales, los cuales tienden a focalizarse en contaminantes traza o en parámetros fisicoquímicos generales sin atender a modificaciones en la composición iónica del efluente (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014). El calcio constituye un elemento esencial para los procesos de calcificación y para la integridad estructural de numerosos organismos marinos, tales como moluscos, equinodermos y algas calcáreas, desempeñando un rol clave en la formación de conchas, esqueletos y estructuras carbonatadas (Fernández-Torquemada & Sánchez-Lizaso, 2005; Piro et al., 2015). En este sentido, una disminución relativa de la disponibilidad de este ion en el medio receptor, asociada a la descarga continua de salmuera, podría afectar procesos fisiológicos fundamentales y modificar las condiciones locales para el desarrollo y mantención de comunidades biológicas calcificadoras, particularmente en ambientes costeros sensibles (Waly et al., 2012; Capó et al., 2020).

La coexistencia de incrementos significativos en metales traza, como el cobre, y alteraciones en la disponibilidad de elementos mayoritarios, como el calcio, refuerza la idea de que la salmuera constituye un efluente de elevada complejidad fisicoquímica, cuyos efectos no pueden ser adecuadamente abordados mediante el control aislado de uno o pocos parámetros regulados. Diversos estudios han señalado que la evaluación fragmentada de efluentes hipersalinos tiende a

subestimar sus efectos ambientales reales, al no considerar interacciones entre estresores químicos, iónicos y osmóticos (Lattemann & Höpner, 2008; Roberts et al., 2010; Panagopoulos & Haralambous, 2020). En este contexto, la ausencia de criterios específicos para la regulación de la salinidad y de enfoques que integren la sensibilidad ecológica de los cuerpos marinos receptores limita la capacidad del marco normativo chileno vigente para prevenir impactos acumulativos en zonas costeras altamente intervenidas, particularmente en regiones donde la presión antrópica se superpone a ecosistemas marinos vulnerables (Ahmad & Baddour, 2014; Sola et al., 2020).

Esta situación resulta especialmente crítica en áreas de alta productividad biológica, como las del centro-norte de Chile, donde variaciones relativamente pequeñas en las condiciones fisicoquímicas pueden traducirse en cambios significativos en la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas marinos. La alta sensibilidad de estos sistemas frente a perturbaciones fisicoquímicas ha sido ampliamente documentada, advirtiéndose que impactos acumulativos y crónicos pueden manifestarse incluso en ausencia de excedencias normativas puntuales (Borja et al., 2010; Vicuña et al., 2022).

Desde una perspectiva comparada, las normativas internacionales analizadas han avanzado de manera más decidida en la incorporación de herramientas de gestión orientadas a abordar las particularidades de la descarga de salmuera al medio marino. Entre estas herramientas destacan la definición de zonas de mezcla, sustentadas en la comprensión de los gradientes fisicoquímicos generados por la descarga y en el control espacial de sus efectos inmediatos, así como la implementación de programas de monitoreo ambiental que integran componentes fisicoquímicos, biológicos y ecotoxicológicos (Lattemann & Höpner, 2008; Portillo et al., 2013; Sola et al., 2020). Estos enfoques reconocen que los efectos ambientales de la salmuera no siempre se manifiestan mediante excedencias puntuales de parámetros individuales, sino que pueden expresarse a través de respuestas subletales, procesos de adaptación fisiológica y cambios progresivos en la

estructura y composición de las comunidades biológicas, especialmente bajo escenarios de exposición crónica (Roberts et al., 2010; de-la-Ossa-Carretero et al., 2016; Del-Pilar-Ruso et al., 2015). Este reconocimiento contrasta con la regulación nacional vigente, donde la evaluación ambiental continúa centrada principalmente en el cumplimiento de límites fisicoquímicos aislados, sin incorporar de manera sistemática indicadores biológicos que permitan detectar impactos ecológicos tempranos o acumulativos (Sola et al., 2019; Skewes Urtubia, 2017).

En este escenario, la reciente promulgación del Decreto Supremo N.º 43/2024, que establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para las aguas marinas y sedimentos de la Bahía de Quintero–Puchuncaví, constituye un avance relevante en la regulación ambiental costera chilena al incorporar un enfoque más integral y ecosistémico en la gestión de los impactos industriales sobre el medio marino (Decreto Supremo N.º 43/2024). La inclusión de parámetros fisicoquímicos, biológicos y ecotoxicológicos, junto con la exigencia de programas sistemáticos de monitoreo ambiental, evidencia una evolución hacia instrumentos normativos más sensibles a la complejidad de los sistemas marinos y a la evaluación de impactos acumulativos, en línea con enfoques recomendados en la literatura internacional sobre gestión ambiental costera (de-la-Ossa-Carretero et al., 2016; Borja et al., 2010). No obstante, el carácter localizado y específico de esta normativa pone de relieve la ausencia de una regulación de alcance nacional que aborde de manera explícita y sistemática las descargas de salmuera asociadas al crecimiento proyectado de la desalinización en Chile, brecha identificada como un desafío relevante en la literatura nacional e internacional (Skewes Urtubia, 2017; Vicuña et al., 2022).

En conjunto, estos antecedentes permiten sostener que, si bien el marco normativo chileno ha avanzado de manera significativa en la protección del medio ambiente marino, persisten brechas regulatorias relevantes frente a efluentes no convencionales como la salmuera hipersalina. La integración de la evidencia normativa y fisicoquímica presentada en este estudio refuerza la necesidad de

desarrollar criterios técnicos específicos que complementen los instrumentos existentes, permitan avanzar hacia una regulación más robusta y coherente con las mejores prácticas internacionales, y respondan de manera más efectiva a los desafíos ambientales asociados a la expansión de la desalinización en el país.

6.2 Análisis comparado de normativas internacionales

Los resultados del análisis comparado de normativas internacionales evidencian que los países con mayor experiencia en la gestión ambiental de la desalinización han desarrollado marcos regulatorios específicos para abordar las particularidades de la descarga de salmuera al medio marino. En estos contextos, la salmuera es reconocida explícitamente como un residuo líquido con características fisicoquímicas propias, cuya regulación requiere instrumentos diferenciados, criterios técnicos específicos y enfoques adaptados a las condiciones del cuerpo receptor (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

A diferencia del enfoque chileno, donde no existen límites explícitos para la salinidad ni criterios estandarizados para la gestión ambiental de la salmuera, las experiencias internacionales analizadas incorporan parámetros regulatorios específicos, tales como umbrales de salinidad, definición de zonas de mezcla y exigencias de monitoreo ambiental integrado. Estas aproximaciones se sustentan en una comprensión más avanzada de los procesos de dispersión, dilución e impacto ecológico asociados a la descarga de salmuera, y han sido ampliamente documentadas en marcos regulatorios y evaluaciones ambientales desarrolladas en países como España, Australia, Estados Unidos y Omán (Sola et al., 2020; Sultanate of Oman, 2005; Portillo et al., 2013).

En este sentido, la literatura internacional coincide en que la ausencia de criterios específicos para la regulación de la salmuera constituye una debilidad estructural de los marcos normativos generalistas, al limitar su capacidad para anticipar impactos crónicos, acumulativos y subletales sobre los ecosistemas marinos,

especialmente en escenarios de expansión acelerada de la desalinización (Roberts et al., 2010; Missimer & Maliva, 2018; Al-Saidi et al., 2024).

La Tabla 5.5 pone de manifiesto una diferencia estructural relevante entre los marcos normativos comparados: mientras Chile no establece actualmente límites de salinidad ni valores de referencia específicos para la descarga de salmuera, países como Australia, Estados Unidos, España y Omán han incorporado criterios explícitos, ya sea mediante incrementos relativos respecto a la salinidad ambiental o a través de valores absolutos máximos permitidos. Este contraste resulta particularmente significativo, considerando que la salinidad constituye el principal factor de presión ambiental asociado a la descarga de salmuera.

En el caso de Australia, los estándares analizados muestran una tendencia a regular incrementos muy acotados de salinidad en distancias específicas desde el punto de descarga, generalmente dentro de rangos inferiores a 1–1,2 ppt en zonas cercanas al emisario. Este enfoque evidencia una estrategia preventiva orientada a minimizar alteraciones locales del medio marino y a proteger ecosistemas costeros sensibles, mediante el control explícito de los gradientes fisicoquímicos generados por la descarga de salmuera (Lattemann & Höpner, 2008; Australian Centre for Mining Environmental Research, 2003).

La existencia de límites diferenciados según la distancia al punto de descarga sugiere una comprensión integrada de los procesos de dispersión y dilución del efluente, así como de la necesidad de establecer umbrales espaciales de protección ambiental que permitan compatibilizar la operación de plantas desalinizadoras con la conservación de los ecosistemas marinos receptores (Roberts et al., 2010; Portillo et al., 2013).

Estados Unidos presenta un enfoque complementario, en el cual se combinan criterios de incremento relativo de salinidad con valores absolutos máximos permitidos en el borde de la zona de mezcla. Los casos de Carlsbad y Huntington

Beach, que establecen un umbral de aproximadamente 40 psu a distancias del orden de 300 metros desde el punto de descarga, reflejan una aproximación regulatoria que reconoce la inevitabilidad de una alteración local inmediata asociada a la descarga de salmuera, pero que fija límites claros y verificables para evitar impactos más allá de un área espacialmente controlada (Lattemann & Höpner, 2008; Missimer & Maliva, 2018).

Este enfoque resulta particularmente relevante en contextos donde las condiciones oceanográficas favorecen la dispersión del efluente, pero aun así se requiere establecer umbrales de protección ambiental que permitan evaluar el cumplimiento normativo y prevenir impactos crónicos o acumulativos en el medio marino receptor. Estudios realizados en zonas de descarga de grandes plantas desalinizadoras en Estados Unidos e Israel han demostrado que, incluso bajo condiciones de alta dispersión, la delimitación explícita de zonas de mezcla y la fijación de límites de salinidad en su borde constituyen herramientas clave para la gestión ambiental de la desalinización (Roberts et al., 2010; Kress et al., 2020; Wood et al., 2020).

En el contexto europeo, y particularmente en España, la regulación de la descarga de salmuera se distingue por su estrecha vinculación con evidencia científica y con objetivos explícitos de conservación ecológica. En este caso, los valores umbrales adoptados para la gestión ambiental de la salmuera se han definido en función de la tolerancia fisiológica y ecológica de especies indicadoras, como *Posidonia oceanica*, cuyo deterioro estructural y funcional ha sido asociado a exposiciones prolongadas a salinidades superiores a 38,5–40 psu (Fernández-Torquemada & Sánchez-Lizaso, 2005; Sánchez-Lizaso et al., 2008).

Este enfoque evidencia una transición desde criterios regulatorios puramente fisicoquímicos hacia una regulación basada en la respuesta ecológica del ecosistema receptor, integrando explícitamente la protección de hábitats prioritarios dentro de la normativa ambiental. La literatura científica desarrollada en el contexto español ha demostrado que las praderas de *Posidonia oceanica* constituyen uno de

los componentes más sensibles frente a la descarga de salmuera, lo que ha motivado la incorporación de criterios ecológicos, monitoreo biológico y límites de salinidad ajustados a la conservación de estos sistemas bentónicos de alto valor ecológico (Sola et al., 2020; Capó et al., 2020; Fernández-Torquemada et al., 2019).

Por su parte, Omán establece límites relativos de incremento de salinidad asociados a la descarga de salmuera, junto con la exigencia de zonas de mezcla de extensión definida, lo que refleja una estrategia de gestión ambiental adaptada a un contexto de alta dependencia estructural de la desalinización para el abastecimiento hídrico. Este enfoque normativo reconoce explícitamente la necesidad de regular la salinidad como principal factor de presión ambiental y de controlar espacialmente los efectos inmediatos de la descarga mediante la delimitación de áreas de influencia regulada (Sultanate of Oman, 2005; Lattemann & Höpner, 2008).

Si bien los límites establecidos en este contexto resultan menos restrictivos en comparación con aquellos adoptados en algunos marcos regulatorios europeos o australianos, su existencia evidencia un reconocimiento explícito de la salmuera como un efluente con características propias que requiere criterios regulatorios específicos. Este reconocimiento contrasta con la normativa chilena vigente, donde la salinidad no es considerada de manera explícita como variable regulada, pese a la creciente expansión de la desalinización. Estudios recientes sobre la sostenibilidad de la desalinización en los países del Golfo refuerzan esta observación, destacando que la definición de límites de salinidad y zonas de mezcla constituye un componente mínimo indispensable para la gestión ambiental de la descarga de salmuera en contextos de alta presión antrópica sobre el medio marino (Al-Saidi et al., 2024).

En conjunto, la comparación de los instrumentos internacionales analizados evidencia una convergencia hacia modelos regulatorios que incorporan límites específicos de salinidad, la definición de zonas de mezcla y criterios de evaluación ambiental que trascienden el control de contaminantes tradicionales. La diversidad

de enfoques observada en la Tabla 5.5 pone de manifiesto que no existe un único modelo normativo aplicable a todos los contextos, sino un conjunto de estrategias regulatorias adaptadas a las condiciones ambientales, oceanográficas y ecológicas de cada país. No obstante, todos los casos analizados comparten el reconocimiento explícito de la salinidad como un parámetro crítico que debe ser regulado de manera directa en el marco de la gestión ambiental de la desalinización (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014; Sola et al., 2020).

Desde esta perspectiva, los resultados del análisis comparado refuerzan la idea de que la ausencia de criterios explícitos de salinidad en el marco normativo chileno constituye una brecha significativa frente a las mejores prácticas internacionales. La evidencia disponible sugiere que una regulación efectiva de la descarga de salmuera requiere adoptar enfoques flexibles y adaptativos, capaces de integrar límites relativos y absolutos, criterios espaciales como las zonas de mezcla y consideraciones ecológicas específicas del medio receptor, particularmente en escenarios de alta sensibilidad ambiental o presión antrópica creciente (Roberts et al., 2010; Missimer & Maliva, 2018; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

En este sentido, los aprendizajes derivados de las experiencias internacionales analizadas constituyen un insumo central para la formulación y discusión de los criterios técnicos propuestos en la sección siguiente, permitiendo avanzar hacia una regulación más robusta, coherente con la evidencia científica disponible y alineada con los desafíos ambientales asociados a la expansión de la desalinización en Chile (Skewes Urtubia, 2017; Vicuña et al., 2022).

6.3 Criterios técnicos aplicables a una futura norma de emisión para descargas de salmuera en Chile.

6.3.1 Salinidad como parámetro regulatorio central

Los resultados presentados en la sección 5.3 destacan la necesidad de considerar la salinidad como un parámetro central en la regulación de las descargas de salmuera, dado que constituye el principal factor diferenciador entre este efluente y los residuos líquidos industriales convencionales. La discusión de este criterio resulta fundamental, ya que el marco normativo chileno vigente no regula explícitamente la salinidad, pese a que los resultados fisicoquímicos evidencian incrementos sustantivos en la concentración de sales disueltas en el agua de rechazo, una característica ampliamente documentada en los procesos de desalinización por ósmosis inversa y otras tecnologías asociadas (Khan et al., 2021; Neubauer, 2022).

Desde una perspectiva ambiental, la omisión de este parámetro limita la capacidad regulatoria para anticipar y prevenir alteraciones en las condiciones osmóticas del medio marino, las cuales pueden afectar directamente la fisiología, el balance energético y la distribución espacial de numerosos organismos marinos. Estudios experimentales y de campo han demostrado que variaciones relativamente acotadas en la salinidad pueden inducir respuestas de estrés osmótico, alteraciones en los sistemas antioxidantes y cambios metabólicos en invertebrados y macroalgas, incluso dentro de rangos cercanos a las condiciones marinas naturales (Farang & Harper, 2014; Jiang et al., 2024; Rodríguez-Rojas et al., 2020).

En este contexto, la incorporación de la salinidad como variable regulada permitiría alinear la normativa nacional con las mejores prácticas internacionales, donde este parámetro es reconocido como un indicador clave del impacto potencial de la desalinización sobre los ecosistemas marinos. Sin embargo, su inclusión también

plantea desafíos técnicos y operativos relevantes, particularmente en relación con la variabilidad natural de la salinidad en sistemas marinos abiertos y con la influencia de factores oceanográficos locales. Esta complejidad refuerza la necesidad de definir criterios regulatorios que consideren explícitamente el contexto ambiental del cuerpo receptor, incorporando enfoques flexibles y adaptativos que permitan diferenciar entre variabilidad natural y alteraciones atribuibles a la descarga de salmuera (Petersen et al., 2018; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

6.3.2 Uso de incrementos relativos respecto a las condiciones naturales

El criterio de regular la descarga de salmuera en función de incrementos relativos de salinidad respecto a las condiciones naturales del cuerpo receptor, en lugar de aplicar valores absolutos fijos, responde directamente a la heterogeneidad espacial y temporal que caracteriza a los sistemas marinos. En este sentido, los resultados del análisis comparado muestran que este enfoque ha sido ampliamente adoptado en normativas internacionales, ya que permite evaluar el impacto ambiental de la descarga en términos de desviaciones ecológicamente relevantes y no únicamente mediante el cumplimiento de umbrales fijos, los cuales pueden resultar poco representativos en ambientes dinámicos (Lattemann & Höpner, 2008; Sola et al., 2020).

Otros autores han destacado que el uso de incrementos relativos constituye una herramienta regulatoria más sensible para discriminar entre variabilidad natural y perturbaciones inducidas por actividades antrópicas, particularmente en zonas costeras sujetas a fluctuaciones naturales de salinidad asociadas a procesos oceanográficos, estacionales y climáticos (Roberts et al., 2010; Petersen et al., 2018). En esta línea, otros trabajos señalan que los criterios absolutos pueden conducir tanto a una sobreprotección innecesaria en algunos contextos como a una subestimación del impacto en otros, dependiendo de las condiciones de referencia del cuerpo receptor (Missimer & Maliva, 2018; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

Desde el punto de vista regulatorio, este enfoque ofrece ventajas significativas al reconocer explícitamente la variabilidad natural del medio marino y reducir el riesgo de aplicar criterios excesivamente restrictivos o, por el contrario, insuficientes en determinados contextos ambientales. No obstante, diversos estudios advierten que su correcta implementación requiere contar con una caracterización robusta de las condiciones de referencia, así como con capacidades técnicas adecuadas para monitorear variaciones espaciales y temporales de la salinidad, aspectos que deben ser cuidadosamente considerados al evaluar la factibilidad de este enfoque en el contexto chileno (Lattemann & Höpner, 2008; Sola et al., 2019; Wood et al., 2020)

6.3.3 Definición y delimitación de zonas de mezcla

La definición de zonas de mezcla emerge en los resultados como un criterio técnico clave para la gestión de las descargas de salmuera, particularmente en escenarios de descarga continua y elevada concentración iónica. La discusión de este criterio se sustenta en la evidencia de que los efectos más intensos del efluente tienden a concentrarse en áreas espacialmente acotadas cercanas al punto de descarga, donde se generan gradientes fisicoquímicos abruptos que disminuyen progresivamente con la distancia, condicionados por factores hidrodinámicos y morfológicos locales (Lattemann & Höpner, 2008; Wood et al., 2020).

Diversos trabajos han demostrado que la delimitación explícita de zonas de mezcla constituye una herramienta eficaz para compatibilizar la operación de plantas desalinizadoras con la protección del medio marino circundante, al permitir acotar espacialmente los efectos inmediatos de la descarga y establecer umbrales ambientales verificables en el borde de dichas zonas. En este sentido, estudios de modelación hidrodinámica y evaluación de dispersión han evidenciado que el diseño adecuado de emisarios y difusores puede reducir significativamente la extensión del impacto de la salmuera, siempre que las zonas de mezcla sean claramente

definidas, monitoreadas y sujetas a criterios ambientales específicos (Portillo et al., 2013; Wood et al., 2020).

Desde una perspectiva ecológica, otros autores han señalado que la existencia de zonas de mezcla bien delimitadas facilita la identificación de gradientes de impacto y la implementación de programas de monitoreo biológico orientados a detectar respuestas subletales y cambios en la estructura de las comunidades bentónicas cercanas a los emisarios (Riera et al., 2011; Yoon & Park, 2012). En el contexto chileno, la ausencia de una definición normativa clara de zonas de mezcla para descargas de salmuera representa una brecha relevante, cuya superación requeriría integrar de manera explícita consideraciones hidrodinámicas, ecológicas y de uso del espacio marino en el diseño de futuros instrumentos regulatorios.

6.3.4 Monitoreo fisicoquímico específico del efluente y del medio receptor

Los resultados presentados en la sección 5.3 destacan la necesidad de considerar la salinidad como un parámetro central en la regulación de las descargas de salmuera, dado que constituye el principal factor diferenciador entre este efluente y los residuos líquidos industriales convencionales. A diferencia de otros efluentes, cuyo impacto ambiental se asocia principalmente a la presencia de contaminantes específicos, la salmuera se caracteriza por una elevada concentración de sales disueltas, capaz de modificar de manera significativa las condiciones fisicoquímicas del medio marino receptor, tal como ha sido ampliamente documentado en estudios de caracterización de salmueras provenientes de plantas de desalinización por ósmosis inversa (Khan et al., 2021; Neubauer, 2022). En este sentido, la discusión de este criterio resulta fundamental, considerando que el marco normativo chileno vigente no regula explícitamente la salinidad, pese a que los resultados fisicoquímicos evidencian incrementos sustantivos en la concentración total de iones disueltos en el agua de rechazo, una omisión recurrente en normativas generalistas no diseñadas específicamente para la desalinización (Lattemann & Höpner, 2008; Ahmad & Baddour, 2014).

Desde una perspectiva ambiental, la omisión de la salinidad como variable regulada limita la capacidad del marco normativo para anticipar y prevenir alteraciones en las condiciones osmóticas del medio marino, las cuales pueden afectar directamente la fisiología, distribución y desempeño de los organismos marinos. Diversos estudios han demostrado que cambios relativamente pequeños en la salinidad pueden desencadenar respuestas de estrés osmótico, alterar procesos metabólicos y modificar interacciones ecológicas clave, particularmente en ecosistemas costeros sometidos a múltiples presiones antrópicas (Farag & Harper, 2014; Jiang et al., 2024; Rodríguez-Rojas et al., 2020). Por ello, la incorporación explícita de este parámetro permitiría fortalecer la capacidad preventiva de la regulación ambiental frente a los impactos asociados a la descarga de salmuera, especialmente en escenarios de exposición crónica.

La inclusión de la salinidad como variable regulada permitiría, además, alinear la normativa nacional con las mejores prácticas internacionales, donde este parámetro es reconocido como un indicador clave del impacto potencial de la desalinización sobre los ecosistemas marinos. No obstante, su incorporación también plantea desafíos técnicos y operativos relevantes, especialmente en relación con la variabilidad natural de la salinidad en sistemas marinos abiertos y su modulación por factores oceanográficos locales. Esta variabilidad refuerza la necesidad de definir criterios regulatorios que consideren el contexto ambiental específico del cuerpo receptor, evitando la aplicación de umbrales rígidos que no reflejen adecuadamente las condiciones naturales del sistema (Petersen et al., 2018; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

En este contexto, parámetros como la conductividad eléctrica (CE) se utilizan comúnmente como indicadores indirectos de la presencia y concentración total de iones disueltos en cuerpos de agua. En términos generales, las aguas dulces presentan valores de conductividad eléctrica inferiores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que las aguas marinas alcanzan valores cercanos a los 52 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (52 mS/cm),

rangos ampliamente utilizados como referencia para la evaluación de alteraciones en la composición química del agua (ANZECC, 1992; Australian Centre for Mining Environmental Research, 2003). Tanto la salinidad como la conductividad eléctrica constituyen herramientas útiles para identificar cambios fisicoquímicos en el medio acuático y pueden actuar como señales de alerta temprana frente a procesos de pérdida de biodiversidad o deterioro funcional de las comunidades biológicas (Farang & Harper, 2014; Petersen et al., 2018).

En la literatura técnica y normativa, es frecuente encontrar distintos términos para referirse a la cantidad de materia inorgánica disuelta en el agua, tales como sales disueltas totales, sólidos disueltos totales, salinidad o conductividad eléctrica, junto con diversas unidades asociadas, como partes por mil (ppt) o unidades prácticas de salinidad (psu). Si bien estos conceptos se encuentran estrechamente relacionados, su uso responde a contextos ligeramente distintos. Por ejemplo, el término “ppt” suele emplearse para describir variaciones puntuales en la salinidad, mientras que “psu” se utiliza comúnmente para caracterizar condiciones generales del sistema marino, como la salinidad media oceánica cercana a 35 psu (Lattemann & Höpner, 2008; Khan et al., 2021).

Para facilitar la interpretación de estos parámetros y su aplicación en contextos regulatorios, la conductividad eléctrica puede convertirse en una estimación de sólidos disueltos totales mediante relaciones empíricas ampliamente utilizadas. Una de las más empleadas es la propuesta por ANZECC (1992), expresada como:

$$\text{Sólidos disueltos totales (mg/L)} = 0,68 \times \text{conductividad eléctrica } (\mu\text{S/cm})$$

Esta relación permite traducir mediciones de conductividad eléctrica en una estimación cuantitativa de la carga total de solutos presentes en el agua, facilitando la comparación entre distintos sistemas y la evaluación de los efectos potenciales sobre la biota y el funcionamiento del ecosistema. En este sentido, la integración de parámetros como la salinidad y la conductividad eléctrica dentro de una futura

norma de emisión no solo resulta técnicamente viable, sino que también proporciona herramientas operativas claras para el monitoreo, control y fiscalización ambiental de las descargas de salmuera en el medio marino, en línea con enfoques recomendados en la literatura internacional (Australian Centre for Mining Environmental Research, 2003; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

6.3.5 Incorporación de monitoreo biológico y ecotoxicológico

La incorporación de componentes biológicos y ecotoxicológicos en la regulación de las descargas de salmuera emerge como uno de los criterios técnicos más relevantes derivados de los resultados del presente estudio. Este enfoque reconoce que los efectos ambientales asociados a la salmuera no siempre se manifiestan de manera inmediata ni son plenamente detectables a través de parámetros fisicoquímicos tradicionales, sino que pueden expresarse mediante respuestas subletales, alteraciones fisiológicas y cambios progresivos en la estructura y composición de las comunidades biológicas marinas. En este contexto, el monitoreo biológico y ecotoxicológico se posiciona como una herramienta clave para evaluar de forma integrada los impactos reales de la descarga de salmuera sobre los ecosistemas marinos receptores, superando las limitaciones inherentes a evaluaciones basadas exclusivamente en el cumplimiento de umbrales fisicoquímicos (Roberts et al., 2010; de-la-Ossa-Carretero et al., 2016).

Diversos estudios han demostrado que una planta desalinizadora, incluso operando de forma aislada, puede generar impactos ecológicos relevantes en el medio marino cuando no se implementan medidas adecuadas de mitigación. Un ejemplo ilustrativo de este fenómeno fue documentado en Israel, donde investigaciones realizadas en plantas de ósmosis inversa evidenciaron que la descarga crónica de salmuera produjo un incremento significativo en la abundancia y la actividad metabólica de bacterias bentónicas en áreas cercanas al emisario. Estos cambios se tradujeron en modificaciones sustantivas en la composición de las comunidades biológicas en comparación con estaciones de referencia no impactadas, con efectos

detectables en un área aproximada de 1,4 km² alrededor del punto de vertido (Sirota et al., 2024). Este tipo de respuestas microbianas, que difícilmente son detectadas mediante monitoreos fisicoquímicos convencionales, pone de manifiesto la importancia de incorporar indicadores biológicos sensibles a alteraciones tempranas en el funcionamiento del ecosistema.

La magnitud y extensión espacial de los impactos ecológicos asociados a la descarga de salmuera dependen, además, de una compleja interacción entre variables tecnológicas y oceanográficas. En este sentido, se ha observado que el tipo de tecnología empleada en los procesos de desalinización, como la destilación multietapa frente a la ósmosis inversa, junto con características hidrográficas locales tales como la velocidad de las corrientes, la profundidad del cuerpo de agua y la morfología del fondo marino, influyen de manera determinante en el comportamiento, dispersión y dilución de la salmuera en el medio receptor (Panagopoulos et al., 2019; Xue & Eltahir, 2017). Esta variabilidad ambiental refuerza la necesidad de implementar programas de monitoreo biológico que permitan capturar respuestas ecológicas específicas de cada sistema costero, más allá de la aplicación de criterios fisicoquímicos genéricos.

Si bien el desarrollo de la industria desalinizadora ha representado un avance significativo en términos de seguridad e independencia hídrica, especialmente para actividades industriales y mineras, su expansión sin una regulación ambiental adecuada ha sido asociada a impactos negativos sobre las comunidades hidrobiológicas marinas. Estudios previos han documentado reducciones en la riqueza de especies y procesos de sucesión ecológica que favorecen el establecimiento de organismos característicos de ambientes perturbados. En este contexto, Ruso et al. (2007) evidenciaron que las comunidades bentónicas cercanas al emisario de una planta desalinizadora estuvieron dominadas casi exclusivamente por nematodos, alcanzando hasta un 98 % de abundancia relativa, mientras que grupos como poliquetos, moluscos y crustáceos incrementaron progresivamente su

abundancia con la distancia al punto de descarga, reflejando un claro gradiente de perturbación ambiental asociado a la influencia de la salmuera.

En el contexto chileno, investigaciones recientes también han documentado respuestas biológicas contrastantes frente a la exposición a salmueras hipersalinas, lo que refuerza la necesidad de implementar un monitoreo biológico sistemático. Pérez-Hernández et al. (2024), en la región de Antofagasta, registraron un incremento significativo en la abundancia de la anémona nativa *Anthothoe chilensis* en ductos de descarga y áreas adyacentes a puntos de emisión de salmuera con salinidades cercanas a 56 psu. En este caso, la especie presentó una reducción en los parámetros de daño oxidativo y una mejora en sus respuestas antioxidantes y osmorreguladoras, sugiriendo una ventaja fisiológica frente a condiciones hipersalinas. Este tipo de respuesta evidencia que la descarga de salmuera puede favorecer selectivamente a determinadas especies, alterando la composición y estructura de las comunidades locales.

En contraste, otras especies de alto valor ecológico muestran una marcada sensibilidad frente a incrementos relativamente moderados de salinidad. Ensayos de laboratorio realizados con *Zostera chilensis*, una fanerógama marina del intermareal somero cuyo estado de conservación se encuentra catalogado como en peligro, han evidenciado daño celular, disminución de la actividad fotosintética y reducción en la eficiencia de conversión en biomasa a salinidades de 37 psu, alcanzando niveles críticos a 40 psu durante los primeros días de exposición. Si bien exposiciones más prolongadas mostraron mecanismos de osmorregulación y una recuperación parcial de las capacidades fisiológicas, estos resultados revelan una ventana temporal de alta vulnerabilidad frente a la descarga de salmuera (Blanco-Murillo et al., 2023a). De manera complementaria, evaluaciones de trasplante con *Ectocarpus* sp. en cercanías de descargas de salmuera en Chile evidenciaron inhibición de la fotosíntesis y una disminución significativa de la productividad primaria tras siete días de exposición a salinidades entre 36 y 37 psu, en comparación con condiciones control de 34 psu (Rodríguez-Rojas et al., 2020).

Evidencia concordante ha sido reportada a nivel internacional, en España, estudios realizados en praderas de *Posidonia oceanica* expuestas en terreno a salmueras durante un período de tres meses demostraron que incrementos de la salinidad natural del mar Mediterráneo desde 37,7 psu hasta 38,4 y 39,2 psu se asociaron a una disminución significativa en la abundancia y a un deterioro de las capacidades fisiológicas de las plantas sobrevivientes en comparación con sitios de control (Sánchez-Lizaso et al., 2008; Capó et al., 2020). Estos antecedentes han sido determinantes para la incorporación de criterios ecológicos específicos en la normativa ambiental de varios países europeos.

En conjunto, la evidencia presentada demuestra que los impactos ambientales de la descarga de salmuera pueden manifestarse de manera heterogénea entre distintos grupos taxonómicos, favoreciendo a algunas especies mientras afecta negativamente a otras, y que estos efectos no siempre son detectables mediante monitoreos fisicoquímicos convencionales. En este contexto, la incorporación de programas de monitoreo biológico y ecotoxicológico resulta esencial para evaluar de forma integral los efectos de la salmuera sobre los ecosistemas marinos, respaldando la necesidad de incluir este criterio como un componente central de una futura norma de emisión para descargas de salmuera en Chile, en concordancia con la evidencia científica nacional e internacional disponible.

6.3.6 Enfoque adaptativo y revisión periódica de los criterios regulatorios

Finalmente, los resultados ponen de manifiesto la relevancia de adoptar un enfoque adaptativo en la regulación de las descargas de salmuera, entendido no solo como la revisión periódica de los criterios normativos, sino también como la capacidad de ajustar los estándares de emisión en función de las características territoriales específicas del cuerpo de agua receptor. Este enfoque reconoce que la dinámica costera, la estructura y sensibilidad de los ecosistemas marinos, así como la salinidad natural y las condiciones oceanográficas locales, presentan una alta

variabilidad espacial y temporal, lo que impide la aplicación efectiva de umbrales regulatorios rígidos y homogéneos a escala nacional (Lattemann & Höpner, 2008; Petersen et al., 2018; Pistocchi et al., 2020).

Desde esta perspectiva, una regulación adaptativa implicaría evaluar cada descarga de salmuera considerando el contexto ambiental donde se emplaza la planta desalinizadora, incluyendo factores como la hidrodinámica local, la capacidad de dilución del sistema, la presencia de hábitats sensibles o especies de interés ecológico y la variabilidad natural de la salinidad del cuerpo receptor. La literatura internacional ha destacado que este tipo de aproximaciones permite definir criterios de emisión diferenciados y ambientalmente pertinentes, reduciendo el riesgo de subestimar impactos en sistemas frágiles o, por el contrario, imponer restricciones innecesarias en contextos de mayor capacidad de resiliencia ecológica (Missimer & Maliva, 2018; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

En el contexto chileno, la incorporación de un enfoque regulatorio adaptativo y territorialmente contextualizado permitiría superar las limitaciones del marco normativo actual, caracterizado por instrumentos generalistas que no distinguen adecuadamente entre realidades costeras contrastantes. No obstante, la implementación de este enfoque requiere un marco institucional robusto, con capacidades técnicas para caracterizar las condiciones de referencia de cada sistema marino, interpretar los resultados del monitoreo ambiental y ajustar los criterios de emisión de manera transparente y basada en evidencia científica (Skewes Urtubia, 2017; Sola et al., 2019; Vicuña et al., 2022). Estos elementos resultan fundamentales para el diseño de una futura norma de emisión para descargas de salmuera que sea efectiva, flexible y coherente con la diversidad ecológica y oceanográfica del litoral chileno.

7 CONCLUSIÓN

7.1 Caracterizar el marco normativo chileno vigente en relación con las descargas de residuos líquidos industriales al mar, identificando sus limitaciones frente a las emisiones de salmuera hipersalina.

El análisis del marco normativo chileno permitió constatar un proceso sostenido de institucionalización de la gestión ambiental de los recursos hídricos y marinos, particularmente desde la promulgación de la Ley N.º 19.300. Este marco ha consolidado instrumentos relevantes de evaluación, fiscalización y control ambiental, como las normas de emisión y de calidad ambiental aplicables a distintos cuerpos receptores. Sin embargo, los resultados evidencian que dichos instrumentos fueron concebidos bajo un enfoque generalista, orientado principalmente al control de contaminantes tradicionales asociados a actividades industriales y mineras.

En este contexto, el Decreto Supremo N.º 90/2000, principal norma de emisión aplicable a residuos líquidos industriales descargados a aguas marinas no incorpora de manera explícita variables críticas asociadas a la descarga de salmuera, como la salinidad ni la composición iónica del efluente. Esta omisión limita su capacidad para abordar los impactos específicos, crónicos y acumulativos derivados de la desalinización, evidenciando una brecha normativa relevante frente a efluentes no convencionales como la salmuera hipersalina.

7.2 Analizar comparativamente normativas internacionales aplicables a la descarga de salmuera al medio marino.

El análisis comparado de normativas internacionales demostró que los países con mayor experiencia en desalinización han desarrollado marcos regulatorios específicos para la gestión ambiental de la salmuera. A diferencia del enfoque

chileno, estas normativas reconocen explícitamente la salmuera como un residuo líquido con características fisicoquímicas propias, incorporando límites de salinidad, criterios de incremento relativo respecto a condiciones naturales y la definición de zonas de mezcla espacialmente delimitadas.

Las experiencias de Australia, Estados Unidos, España y Omán muestran una convergencia hacia modelos regulatorios que integran criterios fisicoquímicos, espaciales y ecológicos, adaptados a las condiciones oceanográficas y a la sensibilidad del ecosistema receptor. Asimismo, estos marcos incorporan programas de monitoreo ambiental que incluyen componentes biológicos y ecotoxicológicos, reconociendo que los efectos de la salmuera no siempre se manifiestan mediante excedencias puntuales de parámetros fisicoquímicos, sino a través de respuestas subletales y cambios progresivos en las comunidades marinas.

Los resultados fisicoquímicos del estudio evidenciaron diferencias sustantivas entre el agua de mar natural y el agua de rechazo de desalinización, tanto en la concentración total de sales disueltas como en la composición iónica del efluente. Destaca el incremento significativo en la concentración de metales traza, como el cobre, así como la reducción relativa de elementos mayoritarios esenciales, como el calcio.

Estas alteraciones refuerzan la idea de que la salmuera constituye un efluente de alta complejidad fisicoquímica, cuyos impactos potenciales no pueden ser evaluados adecuadamente mediante el control aislado de uno o pocos parámetros regulados. La evidencia disponible sugiere que estas modificaciones pueden afectar procesos fisiológicos fundamentales, generar estrés subletal y contribuir a cambios en la estructura y funcionamiento de las comunidades marinas, especialmente bajo escenarios de descarga continua.

7.3 Definir criterios técnicos aplicables a una futura norma de emisión para descargas de salmuera en Chile.

A partir de la integración de la evidencia normativa, fisicoquímica, ecológica e internacional, se identificaron criterios técnicos fundamentales para una futura norma de emisión de salmuera en Chile. Entre estos destacan la incorporación explícita de la salinidad como parámetro regulatorio central; el uso de incrementos relativos respecto a las condiciones naturales del cuerpo receptor; la definición y delimitación normativa de zonas de mezcla; y la implementación de programas de monitoreo fisicoquímico específicos del efluente y del medio receptor.

Asimismo, los resultados subrayan la necesidad de incorporar monitoreo biológico y ensayos ecotoxicológicos como herramientas complementarias, capaces de detectar respuestas tempranas, subletales y acumulativas en los ecosistemas marinos. Estos criterios permiten avanzar desde un enfoque regulatorio centrado exclusivamente en el cumplimiento de límites fisicoquímicos hacia una evaluación ambiental más integral y ecológicamente relevante.

7.4 Propuesta de lineamientos técnicos para fortalecer la regulación ambiental de las descargas de salmuera en Chile.

En respuesta al objetivo general, este estudio concluye que el fortalecimiento de la regulación ambiental de las descargas de salmuera en Chile requiere el desarrollo de una norma de emisión específica, basada en criterios técnicos robustos y alineada con las mejores prácticas internacionales. La propuesta técnica resultante integra límites de salinidad, la definición de zonas de mezcla, la incorporación de monitoreo biológico y ensayos ecotoxicológicos, y un enfoque regulatorio adaptativo.

Este enfoque adaptativo implica regular cada descarga en función de las características territoriales del sitio de emplazamiento, considerando la dinámica costera, la sensibilidad del ecosistema y la salinidad natural del cuerpo de agua receptor, reconociendo que estos factores varían significativamente a lo largo del territorio nacional. De este modo, la regulación deja de ser homogénea y rígida, y se transforma en un instrumento capaz de ajustarse a la diversidad ambiental de los sistemas marinos chilenos.

En conjunto, los resultados del estudio respaldan la necesidad de avanzar hacia una regulación específica, flexible y territorialmente contextualizada de las descargas de salmuera, que permita compatibilizar el desarrollo de la desalinización como estrategia de seguridad hídrica con la protección efectiva y de largo plazo de los ecosistemas marinos y costeros de Chile.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, R. C. B. (2008). Análisis comparativo de normativas de descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. www.cochilco.cl.
- Al Bazedí, G., Ettouney, R. S., Tewfik, S. R., Sorour, M. H., & El-Rifai, M. A. (2014). Salt recovery from brine generated by large-scale seawater desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 52(25–27), 4689–4697. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.810381>
- A Guide to the Application of the ANZECC / ARMCANZ Water Quality Guidelines in the Minerals Industry. Australian Centre for Mining Environmental Research, 2003.
- Ahmad, N., & Baddour, R. E. (2014). A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments. In *Ocean and Coastal Management* (Vol. 87, pp. 1–7). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.10.020>
- Al-Saidi, M., Ellermann, A.-K., Fittkow, M. F., Perillieux, T. R., Saadaoui, I., & Ben-Hamadou, R. (2024). The perils of building big: Desalination sustainability and brine regulation in the Arab Gulf countries. *Water Resources and Industry*, 32(100259), 100259. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100259>
- Blanco-Murillo, F., Díaz, M. J., Rodríguez-Rojas, F., Navarrete, C., Celis-Plá, P. S. M., Sánchez-Lizaso, J. L., & Sáez, C. A. (2023). A risk assessment on *Zostera chilensis*, the last relict of marine angiosperms in the South-East Pacific Ocean, due to the development of the desalination industry in Chile. *Science of the Total Environment*, 883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163538>
- Borja, Á., Dauer, D. M., Elliott, M., & Simenstad, C. A. (2010). Medium- and long-term recovery of estuarine and coastal ecosystems: Patterns, rates and restoration effectiveness. *Estuaries and Coasts: Journal of the Estuarine Research Federation*, 33(6), 1249–1260. <https://doi.org/10.1007/s12237-010-9347-5>
- Capó, X., Tejada, S., Ferriol, P., Pinya, S., Mateu-Vicens, G., Montero-González, I., Box, A., & Sureda, A. (2020). Hypersaline water from desalinization plants causes oxidative damage in *Posidonia oceanica* meadows. *The Science of the Total Environment*, 736(139601), 139601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139601>
- de-la-Ossa-Carretero, J. A., Del-Pilar-Ruso, Y., Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L. M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., Giménez-Casalduero, F., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2016). Bioindicators as metrics for environmental monitoring of desalination plant discharges. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1–2), 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.023>
- del Villar, A., Melgarejo, J., García-López, M., Fernández-Aracil, P., & Montano, B. (2023). The economic value of the extracted elements from brine concentrates of

Decreto 40 de 2012 [Ministerio del Medio Ambiente] Aprueba reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental. 30 de octubre de 2012.

Decreto 144 de 2008 [Establece normas de calidad primaria para la protección de las aguas marinas y estuarinas aptas para actividades de recreación con contacto directo]. 30 de diciembre de 2008

Decreto 90 de 2000 [Ministerio Secretaría General de la presidencia]. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. 30 de mayo de 2000.

Del-Pilar-Ruso, Y., Martínez-García, E., Giménez-Casalduero, F., Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L. M., Marco-Méndez, C., de-la-Ossa-Carretero, J. A., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2015). Benthic community recovery from brine impact after the implementation of mitigation measures. *Water Research*, 70, 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.036>

Farag, A. M., & Harper, D. D. (2014). A review of environmental impacts of salts from produced waters on aquatic resources. *International Journal of Coal Geology*, 126, 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.12.006>

Fernández-Torquemada, Y., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2005). Effects of salinity on leaf growth and survival of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 320(1), 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.12.019>

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

Gatica, M. T. (ciembre 2023). *Efectos de el niño y la niña en las condiciones hidrográficas en las zonas norte, centro, sur y austral de Chile* [Universidad de Concepción]. <https://repositorio.udec.cl/items/359c9ef2-bfb4-4b5d-82d1-cf1c1c5a6f7d>

Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197–207.

Hernández, P., Dorador, A., Martínez, M., Toro, N., Castillo, J., & Ghorbani, Y. (2020). Use of seawater/brine and caliche's salts as clean and environmentally friendly sources of chloride and nitrate ions for chalcopyrite concentrate leaching. *Minerals (Basel, Switzerland)*, 10(5), 477. <https://doi.org/10.3390/min10050477>

- Jiang, J., Tang, Y., Cao, Z., Zhou, C., & Yu, Z. (2024). Effects of hypo-osmotic stress on osmoregulation, antioxidant response, and energy metabolism in sea cucumber *Holothuria moebii* under desalination environment. *Environmental Research*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118800>
- Khan, M., Al-Absi, R. S., Khraisheh, M., & Al-Ghouti, M. A. (2021). A better understanding of seawater reverse osmosis brine: Characterizations, uses, and energy requirements. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100165>
- Kress, N., Gertner, Y., & Shoham-Frider, E. (2020). Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). *Water Research*, 171(115402), 115402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115402>
- 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>
- Ley 19300 de 1994. Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente. 01 de marzo de 1994.
- Manríquez, P. H., González, C. P., Abarca, A., Jenó, K., Jofré, V., Astudillo, O., & Aguilera, V. M. (2024). Effects of brine discharges on newly hatched larvae of the rocky-shore keystone gastropod *Concholepas concholepas*. *Desalination*, 581. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117579>
- Manríquez, P. H., González, C. P., Abarca, A., Jofré, V., Astudillo, O., & Aguilera, V. M. (2024). 'Behavioural and physiological responses of the surf clam *Mesodesma donacium* to brine discharges.' *Science of the Total Environment*, 922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171233>
- Ministerio del Medio Ambiente. (s/f). Gob.cl. Recuperado el 14 de agosto de 2024, de http://especies.mma.gob.cl/CNMWeb/Web/WebCiudadana/especies_amenazadas.aspx
- Missimer, T. M., & Maliva, R. G. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, 434, 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>
- Neubauer, K. (2022). Analysis of desalination discharge Brines for elements of environmental and economic importance with ICP-OES. *Spectroscopy (Springfield, Or.)*, 24–29. <https://doi.org/10.56530/spectroscopy.ud4983c8>
- Panagopoulos, A., & Haralambous, K. J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment - Challenges and mitigation measures. In *Marine Pollution Bulletin* (Vol. 161). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773>

- Park, G. S., Yoon, S. M., & Park, K. S. (2011). Impact of desalination byproducts on marine organisms: A case study at Chuja Island desalination plant in Korea. *Desalination and Water Treatment*, 33(1–3), 267–272. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2651>
- Pérez, G. (2023). Efectos de El niño y La niña en las condiciones hidrográficas en las zonas norte, centro, sur y austral de Chile. Universidad de Concepción.
- Pérez-Hernández, G., Morales, D., Pereira-Rojas, J., Díaz, M. J., Blanco-Murillo, F., Sola, I., Rámila, C., González, C., González, K., Sánchez-Lizaso, J. L., Sáez, C. A., & Rodríguez-Rojas, F. (2024). The halotolerant white sea anemone *Anthothoe chilensis*, highly abundant in brine discharge zones, as a promising biomonitoring species for evaluating the impacts of desalination plants. *Desalination*, 581(117612), 117612. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117612>
- Petersen, K. L., Frank, H., Paytan, A., & Bar-Zeev, E. (2018). Impacts of seawater desalination on coastal environments. En *Sustainable Desalination Handbook* (pp. 437–463). Elsevier.
- Piro, A., Marín-Guirao, L., Serra, I. A., Spadafora, A., Sandoval-Gil, J. M., Bernardeau-Esteller, J., Fernandez, J. M. R., & Mazzuca, S. (2015). The modulation of leaf metabolism plays a role in salt tolerance of *Cymodocea nodosa* exposed to hypersaline stress in mesocosms. *Frontiers in plant science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00464>
- Pistocchi, A., Bleninger, T., Breyer, C., Caldera, U., Dorati, C., Ganora, D., Millán, M. M., Paton, C., Poullis, D., Herrero, F. S., Sapiano, M., Semiat, R., Sommariva, C., Yuece, S., & Zaragoza, G. (2020). Can seawater desalination be a win-win fix to our water cycle?. *Water Research*, 182(115906), 115906. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115906>
- Portillo, E., Louzara, G., Ruiz de la Rosa, M., Quesada, J., Gonzalez, J. C., Roque, F., Antequera, M., & Mendoza, H. (2013). Venturi diffusers as enhancing devices for the dilution process in desalination plant brine discharges. *Desalination and Water Treatment*, 51(1–3), 525–542. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.694218>
- Pullin, A. S., & Stewart, G. B. (2006). Guidelines for systematic review in conservation and environmental management. *Conservation Biology*, 20(6), 1647–1656. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00485.x>
- Riera, R., Tuya, F., Sacramento, A., Ramos, E., Rodríguez, M., & Monterroso, Ó. (2011). The effects of brine disposal on a subtidal meiofauna community. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(4), 359–365. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.05.001>

- Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. In *Water Research* (Vol. 44, Issue 18, pp. 5117–5128). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.036>
- Rodríguez-Rojas, F., López-Marras, A., Celis-Plá, P. S. M., Muñoz, P., García-Bartolomei, E., Valenzuela, F., Orrego, R., Carratalá, A., Sánchez-Lizaso, J. L., & Sáez, C. A. (2020). Ecophysiological and cellular stress responses in the cosmopolitan brown macroalga *Ectocarpus* as biomonitoring tools for assessing desalination brine impacts. *Desalination*, 489(114527), 114527. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114527>
- Ruso, Y. D. P., la Ossa Carretero, J. A. D., Casalduero, F. G., & Lizaso, J. L. S. (2007). Spatial and temporal changes in infaunal communities inhabiting soft-bottoms affected by brine discharge. *Marine Environmental Research*, 64(4), 492–503. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.04.003>
- Sánchez-Lizaso, J. L., Romero, J., Ruiz, J., Gacia, E., Buceta, J. L., Invers, O., Fernández Torquemada, Y., Mas, J., Ruiz-Mateo, A., & Manzanera, M. (2008). Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1–3), 602–607. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.119>
- Sirota, R., Winters, G., Levy, O., Marques, J., Paytan, A., Silverman, J., Sisma-Ventura, G., Rahav, E., Antler, G., & Bar-Zeev, E. (2024). Impacts of desalination brine discharge on benthic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 58(13), 5631–5645. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07748>
- Sola, I., Sánchez-Lizaso, J. L., Muñoz, P. T., García-Bartolomei, E., Sáez, C. A., & Zarzo, D. (2019). Assessment of the requirements within the environmental monitoring plans used to evaluate the environmental impacts of desalination plants in Chile. *Water*, 11(10), 2085. <https://doi.org/10.3390/w11102085>
- Sola, I., Zarzo, D., Carratalá, A., Fernández-Torquemada, Y., de-la-Ossa-Carretero, J. A., Del-Pilar-Ruso, Y., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2020). Review of the management of brine discharges in Spain. *Ocean and Coastal Management*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105301>
- Sultanate of Oman (2005): Ministerial Decision No: 159/2005, Promulgating the bylaws to discharge liquid waste in the marine environment, Ministry of Regional Municipalities, Environment and Water Resources.
- Skewes Urtubia, F. (2017). Autorización ambiental para actividades de desalinización de agua de mar. *Revista de Derecho Ambiental*, 7, 35. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2017.46448>

- Vicuña, S., Daniele, L., Farías, L., González, H., Marquet, P. A., Palma-Behnke, R., Stehr, A., Urquiza, A., Wagemann, E., Arenas-Herrera, M. J., Bórquez, R., Cornejo-Ponce, L., Delgado, V., Etcheberry, G., Fragkou, M. C., Fuster, R., Gelcich, S., Melo, O., Monsalve, T., ... Winckler, P. (2022). Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Comité Asesor Ministerial Científico sobre Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Waly, T., Kennedy, M. D., Witkamp, G. J., Amy, G., & Schippers, J. C. (2012). The role of inorganic ions in the calcium carbonate scaling of seawater reverse osmosis systems. *Desalination*, 284, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.012>
- Wood, J. E., Silverman, J., Galanti, B., & Biton, E. (2020). Modelling the distributions of desalination brines from multiple sources along the Mediterranean coast of Israel. *Water Research*, 173(115555), 115555. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115555>
- Yoon, S. J., & Park, G. S. (2012). Microcosm approach for brine impact assessment from seawater desalination on benthic assemblages. *Desalination and Water Treatment*, 43(1–3), 102–112. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.672033>

9 ANEXOS

Anexo 1. Normativas referentes a descargas de salmuera expuestas en la **Tabla 5.5:**

Identificador	1
Nombre	Victoria Government Gazette
Link	
https://www.gazette.vic.gov.au/gazette/Gazettes2018/GG2018S499.pdf	

Identificador	2
Nombre	Management of Brine Discharges to Coastal Waters
Link	
https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/ocean/desalination/docs/dpr051812.pdf	

Identificador	3
Nombre	ANZECC (2000)
Link	
https://www.waterquality.gov.au/sites/default/files/documents/anzecc-armcanz-2000-guidelines-vol2.pdf	

Identificador	4
Nombre	Material Change of Use Application ERA 16, 19 & 7, Gold Coast Desalination Project
Link	
http://www.desalinfo.com.au/Environment.asp#Project	

Identificador	5
Nombre	US EPA
Link	
https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101EQ0C.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior+to+1976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C70thru75%5CTxt%5C00000021%5C9101EQ0C.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL	

Identificador	6
Nombre	San Diego Regional Water Quality Control Board 2006
Link	
https://www.waterboards.ca.gov/sandiego/water_issues/programs/basin_plan/issue_1.html	

Identificador	7
Nombre	Santa Ana Regional Water Quality Control Board 2012
Link	
https://www.waterboards.ca.gov/santaana/	

Identificador	8
Nombre	Real Decreto 927/1988
Link	
https://www.boe.es/eli/es/rd/1988/07/29/927	

Identificador	9
Nombre	Metodología de diseño de los vertidos al mar de la salmuera, para reducir el impacto ambiental de las plantas desalinizadoras
Link	
https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/metodologia-de-diseno-de-los-vertidos-al-mar-de-la-salmuera-para-reducir-el-impacto-ambiental-de-las-plantas-desaladoras	

Identificador	10
Nombre	Sultanate of Oman (2005)
Link	
https://faolex.fao.org/docs/pdf/oma097378E.pdf	