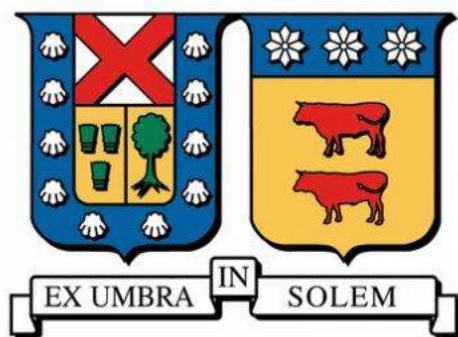




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**PAQUETE DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA LOS POTENCIALES
IMPACTOS AMBIENTALES EN LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO
VERDE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

DANIEL ALEJANDRO ESPINOZA BUGUEÑO

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO DALL'ORSO LEÓN

PROFESOR CORREFERENTE: JAVIER SCAVIA DAL POZZO

SANTIAGO DE CHILE, 18 DE AGOSTO, 2022

Resumen Ejecutivo

Durante las últimas décadas la preocupación mundial sobre el cambio climático ha ido en aumento, desde la primera Convención Marco de las Naciones Unidas por el Cambio Climático, hasta las posteriores convenciones de las partes (COP), destacando el Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París. En este último, Chile como parte de la convención se compromete a ser carbono neutral al año 2050, donde un pilar fundamental es la incipiente industria del hidrógeno. Frente a esto es necesario saber si el desarrollo y crecimiento de esta industria es viable de la mano de los compromisos ambientales que mantiene Chile.

Este estudio busca investigar sobre los distintos impactos ambientales a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus principales formas de mitigación, para de esta manera proponer una hoja de ruta en el desarrollo sustentable de la industria. Para esto, se analiza la literatura actual (desde el 2000 en adelante) sobre los distintos procesos involucrados en la producción de hidrógeno, desde la extracción de insumo, hasta su uso, siguiendo una ruta establecida por la estrategia nacional de hidrógeno verde de Chile.

Durante el desarrollo de la investigación se compararon estudios de diversos autores en cada etapa de la cadena para identificar puntos de concordancia entre los principales impactos ambientales y sus formas de mitigación, para así, mediante un análisis cualitativo, clasificarlos con un grado de importancia y destacar las mejores alternativas.

Como resultado de la investigación se descubre en primera instancia que hacia el final de la cadena de valor aún faltan estudios para clarificar los impactos ambientales que tienen algunos procesos, como son el almacenamiento, el transporte y el uso general del hidrógeno, destacando la necesidad de investigación sobre las emisiones de hidrógeno al medio ambiente que pueden generar depredación de ozono. Se plantean varias medidas de mitigación en las etapas de desalinización, generación de energía y producción de

hidrógeno, las cuales deben ser complementadas con cambios en la legislación y fiscalización chilena.

La desalinización carece de una legislación clara que permita una correcta evaluación ambiental, y se necesitan la creación y mejoramiento de rutas de reciclaje para paneles fotovoltaicos y deposición de materiales peligrosos. De esta manera, hay muchas mitigaciones planteadas en esta investigación que caen en la categoría de recomendaciones mientras no se apliquen los cambios legislativos correspondientes.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	Problema de Investigación	7
2.	Objetivos	9
2.1.	Objetivo General	9
2.2.	Objetivos Específicos.....	9
3.	Marco Teórico.....	10
3.1.	Cambio Climático	10
3.1.1	<i>Gases de Efecto Invernadero</i>	10
3.1.2	<i>Consecuencias</i>	10
3.2.	Contexto Internacional.....	11
3.2.1	<i>Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático</i>	11
3.2.2	<i>Conferencia de las Partes</i>	12
3.3.	Contexto Nacional.....	13
3.3.1	<i>Plan de Carbono Neutralidad</i>	13
3.4.	Hidrógeno.....	15
3.4.1	<i>Hidrógeno Verde</i>	15
3.4.2	<i>Cadena de Valor</i>	16
4.	Metodología	19
5.	Desarrollo.....	20
5.1.	Selección de Ruta en la Cadena de Valor del H2V	20
5.2.	Desalinización.....	20
5.2.1	<i>Extracción de Agua Salada</i>	21
5.2.2	<i>Operación</i>	26
5.2.3	<i>Descarga de salmuera</i>	27
5.3.	Energía	35
5.3.1	<i>Plantas Fotovoltaicas de Energía Solar</i>	37
5.3.2	<i>Plantas de Energía Eólica</i>	46
5.4.	Producción de Hidrógeno.....	54
5.5.	Almacenamiento y Distribución	63
5.6.	Uso del hidrógeno	68
5.7.	Clasificación de Impactos y Mitigaciones	76
5.8.	Propuesta de Hoja de Ruta	87
6.	Conclusiones	97
7.	Anexos	99
8.	Referencias.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Trayectoria de emisiones del escenario de Carbono Neutralidad al 2050.....	14
Figura 2.	Cadena de valor del hidrógeno verde.....	17
Figura 3.	Captura de agua en el proyecto de planta desalinizadora de Econssa.....	21
Figura 4.	Captura de agua en el proyecto de planta desalinizadora de Antofagasta Minerals	22
Figura 5.	Diagrama de un sistema de captación en el fondo marino.	23
Figura 6.	Diagrama de un colector Ranney de subsuperficie.	25
Figura 7.	Diagrama de una tubería de descarga con un sistema de difusores multipuerto.	30
Figura 8.	Potencial de energías renovables a lo largo de Chile, en GW.....	36
Figura 9.	Fuentes de generación de ruido en un aerogenerador.	49
Figura 10.	Indicador ecológico en base a los impactos ambientales de las distintas tecnologías de producción de hidrógeno estudiadas.	56
Figura 11.	Configuración simplificada de una unidad única de repetición de electrolisis usada en el análisis.	58
Figura 12.	Porcentaje de aporte a las emisiones generales de GWP y MRSP de la electrolisis para cada tecnología.....	60
Figura 13.	Reducciones en las 16 categorías de impactos ambientales al aplicar reciclaje y reducción de materiales al caso base.....	62
Figura 14.	Resultados de los impactos en la categoría “Cambio climático” para transporte sobre los 100 kilómetros.....	67
Figura 15.	Impactos ambientales de 6 categorías para una producción de 80 toneladas y 400 kilómetros de distancia de transporte.....	67
Figura 16.	Emisiones GHG para los distintos vehículos analizados.	69
Figura 17.	Emisiones de acidificación para los distintos vehículos analizados.....	70
Figura 18.	Agotamiento de ozono para el modelo estudiado según el hidrógeno emitido.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Comparación de tecnologías de desalinización basado en el requerimiento energético. ..	27
Tabla 2.	Tratamientos disponibles en Chile v/s Unión Europea	40
Tabla 3.	Distancias recomendadas en distintos países y regiones.....	51
Tabla 4.	Impacto total producido por el stack de electrolisis para cada categoría en las 3 tecnologías.	59
Tabla 5.	Resumen de los impactos y mitigaciones estudiados en esta investigación.....	76

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Requerimiento de suelo para distintas tecnologías de energía solar y eólica.....	99
Anexo 2.	Costos de producción de hidrógeno para distintas tecnologías.....	99
Anexo 3.	Costos de capital según la capacidad de producción de distintas tecnologías.	100
Anexo 4.	Cadenas de suministro de los distintos métodos de tratamiento del hidrógeno	100
Anexo 5.	Costos generales de los sistemas de producción de hidrógeno.	101
Anexo 6.	Categorías de impactos ambientales considerados para el estudio.	101
Anexo 7.	Artículo 11 de la ley 19.300.....	102

1. Problema de Investigación

Durante las últimas décadas la preocupación por el calentamiento global y el cambio climático ha estado en la palestra de distintos países y organizaciones internacionales, de hecho, fue en los años 90 cuando la “Cumbre por la Tierra” dio lugar a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) donde se reconoció por primera vez la preocupación internacional por el cambio climático y cómo las actividades humanas aumentan sustancialmente las concentraciones de gases de efecto invernadero (CMNUCC, 1992).

Asimismo, en las posteriores Convenciones de las Partes (COP) se buscó reforzar la postura inicial mediante la acción. Se destacan el Protocolo de Kyoto, donde se obligó jurídicamente a los países que son Parte, a cumplir metas de reducción de emisiones (CMNUCC, 1997) y el Acuerdo de París, cuyo principal objetivo es fortalecer las medidas contra el cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial bajo los 2°C durante el siglo XXI (Naciones Unidas, s. f.).

En el contexto nacional, Chile ha centrado su esfuerzo contra el cambio climático en el Plan de Carbono Neutralidad, donde, como compromiso pactado en el acuerdo de París, busca que para el año 2050 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) sean iguales o menores a las absorciones (Gobierno de Chile, 2019). Dentro de las medidas de mitigación más importantes se encuentra la industria sostenible y el hidrógeno, con un 25% y 21% de participación respectivamente (Ministerio de Energía, 2020a), donde este último se basa en el remplazo del diésel por hidrógeno verde en usos motrices de industria y minería.

Aparte de poseer un gran potencial de descarbonización, el hidrógeno verde hoy se plantea como el futuro pilar económico de Chile, con un crecimiento anual proyectado de

un 15% llegando a 33 billones de dólares en el año 2050, equiparando el tamaño de la industria minera nacional (Ministerio de Energía, 2020b). Esto basado en el potencial competitivo del país por su bajo costo de producción, de la mano del alto desarrollo de energías renovables.

Frente a los esfuerzos de disminuir los gases de efecto invernadero, y una industria incipiente del hidrógeno verde, es necesario plantear los posibles impactos ambientales derivados de una producción que buscar satisfacer tanto el mercado nacional como internacional. De esta manera, ¿Es viable el desarrollo y crecimiento de la industria del hidrógeno verde en Chile de la mano de una política regulatoria que respete los compromisos ambientales que ha asumido el país? ¿Cuáles son los principales impactos que presenta la cadena de valor del hidrógeno verde?

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Proponer medidas para mitigar los potenciales impactos ambientales en la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile, y una hoja de ruta a seguir para que el desarrollo y crecimiento de esta industria vaya en línea con el desarrollo sustentable y los compromisos ambientales que ha asumido el país.

2.2. Objetivos Específicos

Analizar la cadena de valor del hidrógeno verde, para identificar cada proceso desde la extracción de insumos, hasta su uso.

Identificar los potenciales impactos ambientales asociados a cada proceso de la cadena de valor según una ruta establecida a seguir en el contexto nacional.

Agrupar los impactos y sus formas de mitigación para cada proceso de la cadena de valor, dando un grado de importancia en la disminución de la perturbación que genera en el entorno según un análisis cualitativo.

Proponer una hoja de ruta sobre un desarrollo y crecimiento sostenible de la industria del hidrógeno verde, en base a los principales impactos y mitigaciones encontrados.

3. Marco Teórico

3.1. Cambio Climático

Cambio climático y calentamiento global son comúnmente confundidos o interpretados como sinónimos. Lo cierto es que el calentamiento global es la principal causa del cambio climático, y a su vez, el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) es la principal causa del calentamiento global.

3.1.1 Gases de Efecto Invernadero

Para entender estas relaciones causa-consecuencia hay que partir de la base. El efecto invernadero es un proceso natural del planeta tierra que ocurre gracias a la atmósfera, en la cual están presentes ciertos gases como el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, entre otros, que absorben la radiación infrarroja liberada por la tierra y proveniente del sol, y la vuelven a irradiar a la superficie terrestre. Este proceso se conoce como efecto invernadero natural y es lo que permite la vida en el planeta, ya que, de no existir, la temperatura promedio en la superficie sería de aproximadamente 18°C bajo cero (Ballesteros & Aristizabal, 2007).

El ser humano ha ido contribuyendo significativamente desde la revolución industrial al aumento de gases de efecto invernadero, principalmente de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), lo que genera que más energía sea retenida en la superficie terrestre y, por ende, aumente su temperatura promedio, lo cual es conocido como calentamiento global (ACCIONA, s. f.). Las principales fuentes de emisión de GEI son la quema de combustibles fósiles para la generación eléctrica, la industria y la agricultura, siendo la primera la que más aporta con un 80,7% del total en la UE (Parlamento Europeo, 2018).

3.1.2 Consecuencias

De esta manera, el calentamiento global es el principal causante del cambio

climático, el cual es definido como una variación en el clima del planeta, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera y se manifiesta como un aumento de las temperaturas medias y una alteración del clima a escala mundial, generando que los eventos climáticos extremos sean más comunes (Ministerio del Medio Ambiente, s. f.).

Dentro de las consecuencias del cambio climático, hay impactos que ya son perceptibles, como el aumento de la temperatura media mundial en 1,1°C desde la época preindustrial, el aumento de la tasa de subida del nivel del mar a 5 milímetros por año, y además otros impactos económicos y sociales ligados a daños en la producción alimenticia, sequías, riesgos de salud, mega incendios y los fenómenos meteorológicos extremos como tormentas y huracanes (Greenpeace, s. f.).

Frente a la gravedad del asunto, países y entidades internacionales han empezado a movilizarse para tomar acciones, buscando frenar el cambio climático y sus consecuencias a través de acuerdos y trabajo global conjunto.

3.2. Contexto Internacional

El primer hito de carácter internacional para la lucha contra el cambio climático se dio en la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que fue el paso inicial y que se reforzaría en las posteriores Conferencias de las Partes (COP) de las cuales salieron importantes acuerdos. Pero ¿qué es la CMNUCC y que es la COP?

3.2.1 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

La CMNUCC es una de las tres convenciones que se abrieron en la Cumbre de la Tierra en Rio en 1992, siendo las restantes la Convención de Lucha contra la Desertificación y el Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica,

donde, a pesar de que las tres están intrínsecamente vinculadas, la primera es la que ha tomado mayor relevancia. Fue la primera vez que se reconoció el problema de la incidencia del ser humano en el cambio climático, lo cual es notable ya que, en 1994 (año en que entró en vigor la CMNUCC), no existían demasiadas pruebas científicas como las existen hoy. El objetivo final de la CMNUCC es la prevención de la interferencia humana “peligrosa” en el sistema climático, lo cual se ha trabajado en las diversas COP hasta el día de hoy, donde 197 países han ratificado la convención y son llamados Partes en la convención (United Nations Climate Change, s. f.-b).

3.2.2 Conferencia de las Partes

Al igual que con el cambio climático y el calentamiento global, se suele confundir la relación que la COP tiene con la CMNUCC, y es que las Conferencias de las Partes son reuniones de alto nivel, celebradas anualmente, en las que participan expertos en medio ambiente, ministros, jefes de estado y representantes de ONG de los países que actualmente forman Parte de la CMNUCC (Universidad de Chile, 2019).

Si bien en todas las COP se avanza sobre el objetivo final de la CMNUCC, hay dos que destacan debido a los acuerdos adoptados. El primero corresponde al Protocolo de Kyoto, acordado en la COP3 en 1997, en el cual se marcan objetivos individuales y jurídicamente vinculantes para los países desarrollados, que apuntan a reducir las emisiones de GEI en al menos un 5% con respecto a los niveles de 1990, en el periodo de compromiso de 2008 a 2012 (CMNUCC, 1997).

El segundo corresponde al Acuerdo de París, concretado en la COP21 en 2015, que tiene como principal objetivo que el aumento de la temperatura global no sea más del 2°C al año 2100, a través de responsabilidades comunes, pero diferenciadas para cada una de las Partes. Este acuerdo entra en vigor el año 2020 (Gobierno de Chile, s. f.), año en el que se

deben presentar las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NCD en inglés). Las NCD son el núcleo del Acuerdo de París, ya que encarnan los esfuerzos que cada Parte adoptará para reducir las emisiones nacionales, instaurar medidas de mitigación y adaptarse a los efectos del cambio climático, con el fin de alcanzar los objetivos de estas contribuciones (United Nation Climate Change, s. f.-a)

La República de Chile firmó el Acuerdo de París el 20 de septiembre del 2016, para luego ser promulgado el 13 de febrero de 2017 (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2017) quedando de esta manera comprometida con la reducción de emisiones GEI.

3.3. Contexto Nacional

La firma del Acuerdo de París por parte de Chile, y como ya se explicó en el apartado anterior, viene con el compromiso de la preparación, comunicación y mantención de las sucesivas Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional que se proponga cumplir. De esta manera, el 9 de abril de 2020 el Gobierno de Chile hizo entrega oficial de su NCD a la CMNUCC, convirtiéndose en el primer país latinoamericano y de los primeros países en el mundo en hacerlo, donde sus principales medidas siguen cuatro pilares que son la mitigación, adaptación, integración y un pilar social interrelacionado con los otros 3 (Gobierno de Chile, 2020). Estas medidas están directamente relacionadas, en objetivos y ejecución, con el Plan de Carbono Neutralidad presentado por el Gobierno de Chile.

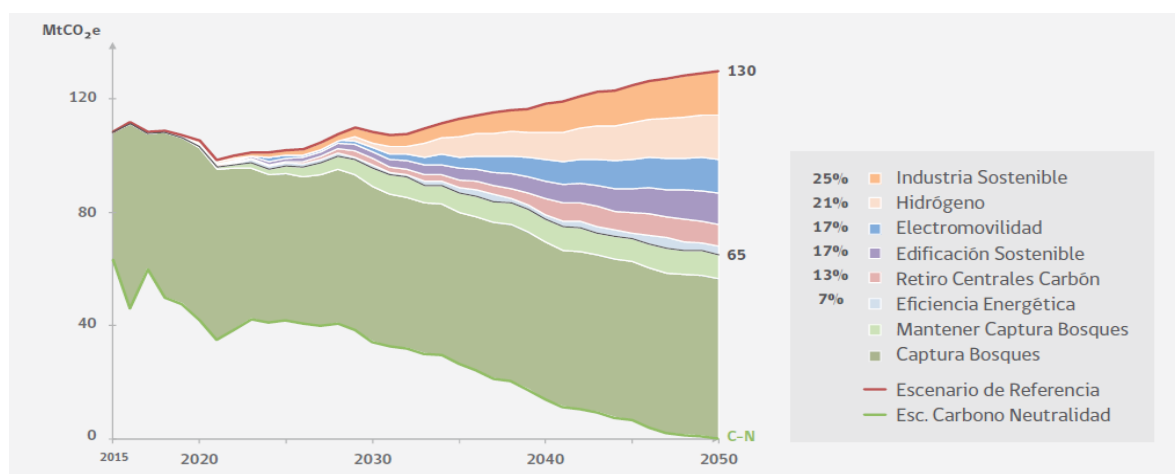
3.3.1 Plan de Carbono Neutralidad

Gran parte de los esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero están en el Plan de Carbono Neutralidad (Ministerio de Energía, 2020a), que busca que para el año 2050 las emisiones de GEI sean, a lo más, iguales a las absorciones. En Chile, el 2016, se emitieron 112 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente, de las cuales el 78% correspondieron al sector energía. Asimismo, las mayores

emisiones del sector energía provienen del sector eléctrico y de transporte, con un 32% y un 24% respectivamente.

Hay dos pilares fundamentales en el plan de carbono neutralidad. El primero corresponde a la descarbonización del sistema eléctrico nacional, donde se espera que para el 2040 se hayan cerrado el 100% de las generadoras eléctricas en base a carbón. La primera fase del cronograma aspira que para el 2024 se hayan cerrado 11 generadoras que corresponden al 31% del total centrales. El retiro de centrales de carbón solo representa una reducción de emisiones del 13% dentro del plan, pero si se considera que esta acción habilita los ámbitos de industria sostenible, hidrógeno y electromovilidad, se tiene que es responsable de un 76% de la reducción de emisiones (Ver **Figura 1**).

Figura 1. Trayectoria de emisiones del escenario de Carbono Neutralidad al 2050.



Fuente: Ministerio de Energía (2020a).

El segundo Pilar, y que se alza con fuerza para ser la nueva mayor fuente de ingresos del país, es el hidrógeno verde, que se presenta como un potencial reemplazo como combustible, tanto para transporte, como para usos residenciales, industriales y comerciales, que participa con un 21% en la reducción de emisiones del Plan de Carbono Neutralidad. Pero ¿Qué es el hidrógeno verde?

3.4. Hidrógeno

En primer lugar, es necesario conocer el hidrógeno. En condiciones estándar de presión y temperatura, el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido, que se representa con la fórmula molecular “ H_2 ”. Es el elemento químico más liviano y abundante del universo, constituyendo el 75% de la materia visible y es uno de los principales elementos que constituyen el agua y la materia orgánica. El hidrógeno es el segundo elemento de la tabla periódica y se encuentra en estado líquido recién bajo los $-252,78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, forma componentes químicos e inorgánicos con otros elementos, siendo el más común el agua (H_2O) que es el componente más abundante en la superficie terrestre (Zeceña, 2020).

El hidrógeno es utilizado como combustible para distintos medios, como calefacción o vehículos, llegando a poseer una demanda global de 70 millones de toneladas anuales el 2018. Una de sus ventajas es que es una fuente de energía limpia, ya que al ser combustionada solo emite vapor de agua, a diferencia del carbón o el petróleo, que dejan residuos en el aire (Iberdrola, 2020).

3.4.1 Hidrógeno Verde

La clasificación de hidrógeno verde, también conocido como H_2V , no viene específicamente por su combustión, sino, por la forma de obtenerlo. Como se explicó anteriormente, el hidrógeno es el elemento químico más abundante del universo y de la superficie terrestre, pero este no se presenta en su estado elemental, si no que se encuentra en los hidrocarburos o en sustancias como el agua. Así, las formas más comunes de producirlo son a través de la electrolisis (hidrólisis del agua) y del reformado de gas natural. El primero consiste en la separación de los átomos que constituyen su molécula (H_2O) por medio de la electricidad, obteniendo O_2 y H_2 por separado, y el segundo, obtiene el

hidrógeno mediante la reacción exotérmica del metano con agua, que produce CO₂. Una forma de clasificar al hidrógeno como gris, azul o verde es según la cantidad de emisiones que genera su producción y el origen de la fuente eléctrica, siendo hidrógeno gris si sus emisiones son mayores a 36,4 g de CO₂/MJ sin restricción de fuente, hidrógeno azul si posee una huella de carbono inferior a 36,4 g de CO₂/MJ con fuentes de energía no renovable, e hidrógeno verde si su huella de carbono es inferior a 36,4 g de CO₂/MJ con fuentes de energía renovable (Crozzoli et al., 2020).

Otras clasificaciones se enfocan más en la materia prima y la forma de generación, describiendo el hidrógeno gris como el producido por la reformación del gas natural, el hidrógeno azul como el producido también con gas natural, pero con proceso de captura del CO₂ resultante de la reacción, y como hidrógeno verde al que se obtiene por la electrolisis del agua con energías renovables (Lacueva, 2021). Sin embargo, el hidrógeno verde no solo genera emisiones en su producción y uso, si no que a través de toda su cadena de valor.

3.4.2 Cadena de Valor

La cadena de valor del hidrógeno incluye todos los procesos desde la extracción de la materia prima, hasta su uso final por el consumidor. El Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile (4eChile, 2021) presenta en su página web un mapa interactivo con todos los procesos de la cadena de valor del H₂V, dando una breve descripción de ellos. Cabe destacar que este mapa no presenta el paso inicial de la cadena, que corresponde a la extracción y desalinización del agua para su uso como materia prima en la producción de hidrógeno. Se puede observar la disposición del mapa en la **Figura 2** a continuación:

Figura 2. Cadena de valor del hidrógeno verde



Fuente: 4eChile (2021)

El mapa se puede dividir en secciones: En el primer bloque, se encuentra lo referente a la producción del hidrógeno, partiendo por la tecnología de energía renovable usada, que puede ser fotovoltaica, eólica o de concentración solar de potencia, la cual será cargada a la red eléctrica para poder ser utilizada por el electrolizador encargado de separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Además, se presentan dos formas de generar hidrógeno que están en evaluación o se producen de manera artesanal, siendo la termólisis del agua mediante concentración solar, que extrae el H_2 del agua mediante la aplicación de calor, y la fermentación, que utiliza biomasa como insumo de producción de H_2 .

El segundo bloque corresponde a el almacenamiento y transporte del hidrógeno producido. En primera instancia se encuentra la compresión, donde el hidrógeno es comprimido generalmente a 700 bar, para obtener densidades prácticas, y luego es almacenado en contenedores presurizados o en algunos casos en cavernas. El H_2V

presurizado también puede ser transportado directamente a través de cañerías o redes de gas para su uso en procesos por medio de combustión.

Otra forma de almacenamiento es la licuefacción que corresponde al proceso donde el hidrógeno se lleva a temperaturas de -253°C pasando de estado gaseoso a líquido y almacenándolo en estanques aislados llamados contenedores térmicos. La última forma de almacenamiento es mediante el uso de reacciones químicas para insertar el hidrógeno en otros compuestos (LOHC en inglés), como metanol o el amoníaco, y así facilitar su transporte, con la característica de que es necesaria una deshidrogenación que separa el hidrógeno de los demás compuestos para su posterior uso. Estas dos últimas formas de almacenamiento se suelen transportar en camiones tanque o barcos de distribución, a diferencia del primero que suele transportarse en camiones de carga ya que es técnicamente más sencillo manipular H_2 comprimido que H_2 líquido.

Finalmente, encontramos el tercer bloque que corresponde a la distribución del combustible a los clientes, donde los diversos medios de transporte del hidrógeno pueden llegar a estaciones de carga, las cuales alimentan a vehículos livianos, trenes o buses, o a diversas industrias para realizar procesos industriales o químicos como la refinación de petróleo, producción de metales y vidrio o reacción de arenas bituminosas.

4. Metodología

La investigación en esta memoria se encuentra limitada a la literatura disponible de los impactos y posibles impactos ambientales en los distintos procesos referentes a la cadena de valor del hidrógeno verde, como de sus formas de mitigación, enfocándose principalmente en una ruta elegida que va en concordancia con la estrategia nacional de hidrógeno verde de Chile y donde la evaluación económica de la implementación de las acciones de mitigación esta fuera del alcance de este estudio. Para esto se toma en cuenta literatura publicada desde distintas partes del mundo sobre los tópicos pertinentes desde el año 2000 en adelante. La metodología a seguir se presenta a continuación:

En primer lugar, frente a las distintas alternativas de producción en cada fase de la cadena de valor del hidrógeno verde, es que se seleccionara los procesos en concordancia con la ruta planteada por la estrategia nacional de hidrógeno verde. Esta selección no descarta posibles comparaciones con otros procesos.

Una vez elegidos estos procesos, se revisará diversas investigaciones sobre los problemas ambientales que presentan cada uno de ellos y las posibles formas de mitigación para hacerlos más sustentables y disminuir los impactos sobre el entorno.

A partir de un análisis de los estudios se creará una tabla resumen para clasificar los impactos y sus principales formas de mitigación, dando un grado de importancia cualitativo respecto de la reducción del impacto y sus barreras de implementación.

Finalmente se creará una hoja de ruta por seguir en el desarrollo de la industria sustentable del hidrógeno verde en Chile de forma que se respeten los compromisos ambientales del país.

5. Desarrollo

Para poder investigar sobre los impactos de los distintos procedimientos para la producción de hidrógeno, es necesario seleccionar la ruta que se va a seguir en su cadena de valor, lo cual se presenta a continuación.

5.1. Selección de Ruta en la Cadena de Valor del H2V

Como se evidencio en el marco teórico, Chile ya ha planteado sus desafíos de ser carbono neutral para el año 2050 y ha establecido una estrategia nacional de hidrógeno verde, la cual ha demarcado las rutas principales a seguir en términos de producción, por lo que en esta investigación se opta por considerar estas rutas para su análisis ambiental, aunque evaluando posibles alternativas ante otros procesos. De esta manera, la línea principal a seguir corresponde a:

- Obtención de Insumo: Planta desalinizadora de agua de mar, mediante osmosis inversa.
- Obtención de energía: Parques eólicos y plantas fotovoltaicas.
- Producción de hidrógeno: Electrolizador
- Almacenamiento: Licuefacción/Redes de gas
- Transporte: Camiones/Cañerías
- Uso: Celdas de combustible

5.2. Desalinización

Dentro del proceso de desalinización se encuentran varios procedimientos que pueden generar diversos impactos ambientales, entre ellos está la extracción de agua salada, la descarga de salmuera en el fondo marino y la forma de operación de la planta. A continuación, se desmiembran los problemas asociados a estos procedimientos y se plantean sus formas de mitigación.

5.2.1 Extracción de Agua Salada

Como lo explica Veolia [Veolia Water Technologies] (2016), para la extracción de agua salada del mar, se utilizan cañerías que van desde un sistema de captación en el fondo marino hasta la planta desalinizadora, más específicamente, hasta piscinas de acumulación. El punto de captación se puede encontrar a distintas distancias y profundidades dependiendo de la ubicación geográfica del proyecto, la calidad del agua de mar y las características ambientales de la zona. Por ejemplo, el proyecto de planta desalinizadora de Econssa Chile dispuesta en Punta Zorro, en la comuna de Caldera en Chile, tendrá su cámara de captación a 20 metros bajo el nivel del mar y a una distancia de 250 metros de la costa (Econssa Chile S.A., 2018) como se diagrama en la **Figura 3**, versus la planta de Antofagasta Minerals, dispuesta en la bahía Conchalí, provincia del Choapa en Chile, que la proyecta a la misma profundidad, pero a 730 metros de la costa (Antofagasta Minerals, 2016). Cabe destacar que el proyecto de Econssa ya ha sido finalizado y está en funcionamiento y el proyecto de Antofagasta Minerals se encuentra con un avance del 60% y se espera que la planta desalinizadora esté operativa en agosto del 2022 (Minería Chilena, 2021).

Figura 3. Captura de agua en el proyecto de planta desalinizadora de Econssa



Fuente: Econssa Chile S.A. (2018)

A partir de estos ejemplos también se puede observar las dos formas de elevación del agua capturada en el fondo marino, siendo una de ellas a través de gravitación, es decir, que las tuberías llegan directamente hasta el depósito y el agua asciende por el nivel del mar (Ver **Figura 4**), y la otra, que es mediante la elevación del agua desde un depósito subterráneo a través de bombas.

Figura 4. Captura de agua en el proyecto de planta desalinizadora de Antofagasta Minerals



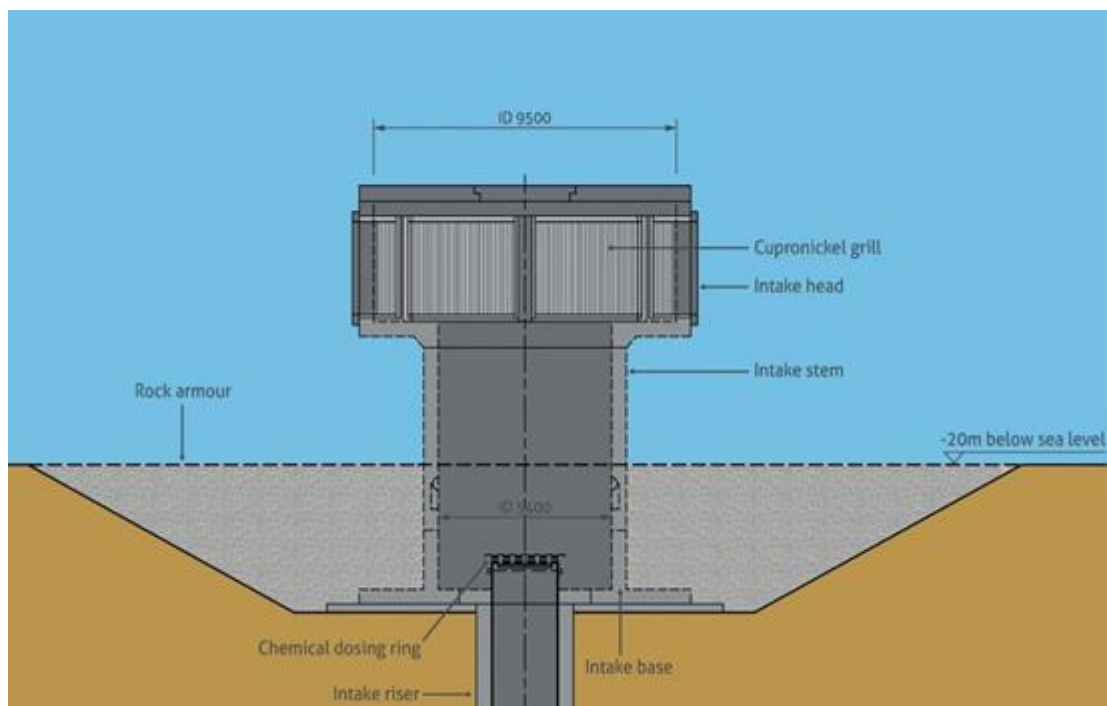
Fuente: Antofagasta Minerals (2016)

El proceso de captación, según exponen Missimer y Maliva (2016), tiene la mala fama de ser conocido por su capacidad de eliminación de organismos marinos, los cuales se pueden clasificar en dos grupos. El primero corresponde a los organismos que son lo suficientemente grandes para quedar atrapados en las rejillas del sistema de captación, que suelen tener una movilidad activa y que, por su edad, se pueden caracterizar como jóvenes o adultos. El segundo grupo corresponde a organismos que son lo suficientemente pequeños para atravesar las rejillas y que poseen baja o nula movilidad, como lo son huevos de pescado o plancton, que son finalmente absorbidos por el sistema. Aun así, es difícil corroborar el real impacto que tiene el sistema de captación en el ambiente marino

especifico en el que está, aunque sectores conservadores asumen que la mortalidad de los organismos que entran al sistema es del 100%. También se destaca que el impacto de mortalidad de los organismos marinos depende de la localización de la captación, el diseño del sistema de captación, la hidráulica ambiental, la calidad del agua y la fisiología y morfología de la fauna de la zona.

Los sistemas de captación en aguas profundas son la ruta más viable para la captación (Ver **Figura 5**), a pesar de la contra respecto de la pérdida de organismos acuáticos que se ha convertido en una preocupación contante para diversos investigadores (Ihsanullah et al., 2021). Sin embargo, a las profundidades adecuadas se obtiene agua de mar de mayor calidad y mediante un correcto estudio de la localización de las instalaciones y mediciones de la población marina, se puede atacar el efecto negativo de atrapamiento y absorción de organismos marinos e ictioplancton. (Missimer & Maliva, 2018).

Figura 5. Diagrama de un sistema de captación en el fondo marino.



Fuente: Blesing (s.f.)

Es necesario saber cuál es la profundidad adecuada según el estudio de la zona, y es que hay variaciones al respecto donde, por ejemplo, Cartier y Corsin (2007) plantean que la profundidad debería ser mayor a 20 metros bajo el nivel del mar e Ito et al. (2013) en la evaluación de impacto ambiental de la planta desalinizadora Mega-Ton plantean que la profundidad debería ser mayor a 100 metros bajos el nivel del mar.

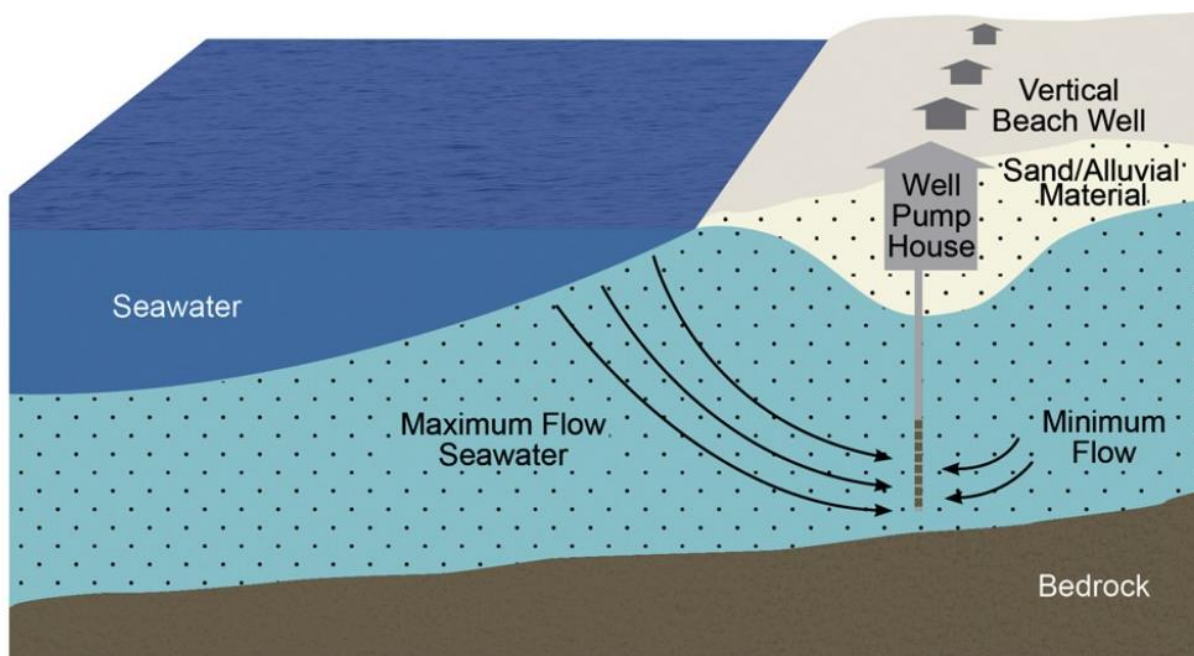
Cooley et al. (2013) luego de un análisis a los sistemas de captura de agua, concluyen que, para mitigar los efectos negativos presentes, en primer lugar, estas deben poseer una malla o una pantalla de alambre de cuña que, si bien se conocen los problemas asociados a ellas, siguen siendo necesarias para bloquear el paso de organismos más grandes. Sin embargo, agregan que el sistema de captación debería ir acompañado de un sistema de colección y retorno para aquellos organismos que hayan logrado quedar atrapados, evitando de esta manera que mueran en los posteriores procesos. Otra medida de mitigación es incluir luces estroboscópicas, cortinas de burbujas o generadores de sonido para entregar una señal de advertencia a los organismos que pueden ser absorbidos, aunque hay discrepancias entre estudios sobre la efectividad de estos métodos, recalando que pueden servir solo para algunas especies, además, requieren de sistemas específicos (eléctricos y de bombas) para su funcionamiento. Finalmente recalcan la importancia de la localización de las capturas de agua, las cuales deberían estar localizadas fuera de áreas con alta concentración biológica y previo estudio de las condiciones temporales del lugar, para lo cual es necesario realizar estudios a largo plazo que permitan dilucidar la variabilidad de las comunidades marinas.

Ihsanullah et al. (2021) concuerda en estos puntos con Cooley, en mayor medida sobre la importancia de la localización, pero adiciona otro factor que es la velocidad del flujo de captura. Para poder reducir esta velocidad es necesario que el sistema posea una

apertura lo suficientemente grande para llegar a no más de 0.15 [m/s], que es la velocidad recomendada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA en inglés). Esta acción ya había sido recomendada por Arreguin y Martin (2000) destacando los efectos positivos en los costos de procesamiento y operación de la planta y agregando otra mitigación respecto a utilizar pozos de filtración para la toma de agua, lo que también reduce la entrada de especies marinas.

Finalmente, se han destacado los sistemas de captación de subsuperficie (Ver **Figura 6**), los cuales minimizan considerablemente los problemas de las capturas en el fondo marino ya que no poseen efectos de atrapamiento y arrastre, además de proveer un grado natural de filtración que reduce los costos operacionales de las plantas. Sin embargo, presentan impactos directos en las tierras o playas en las cuales están dispuestos tanto en su instalación, mantenimiento y operación.

Figura 6. Diagrama de un colector Ranney de subsuperficie.



Fuente: Missimer et al. (2013)

Cuando el atrapamiento no se puede evitar, otras medidas como la creación de hábitats o restauración y reabastecimiento de especies marinas críticas pueden ser ejecutadas, las cuales pueden variar su costo dependiendo de lo que se haga, por ejemplo, la creación de humedales marinos en California cuesta entre 4-5 USD\$/m² y la creación de un arrecife en alta mar puede costar 35 USD\$/m². El re-stock de especies marina suele ser más eficiente y barato que la creación de hábitats (Missimer & Maliva, 2018).

Cooley et al. (2013) en sus medidas de mitigación también destaca la alternativa de capturas de subsuperficie para eliminar el atrapamiento y arrastre, pero hace hincapié en que no son apropiadas para todas las locaciones, ya que dependen mucho de la geología del sector y las características de los sedimentos presentes. Con nuevas tecnologías, las capturas de subsuperficie pueden llegar a ser una buena alternativa, por lo que no hay que perderlas de vista.

5.2.2 Operación

Dependiendo de la tecnología implementada para realizar la desalinización es cuanto se va a ver afectado la calidad del aire y el entorno terrestre. Las principales tecnologías usadas se dividen en 2 grupos, siendo uno ellos la desalación térmica, que puede ser por multi efecto (MED en inglés) o multi etapa (MSF en inglés), y el otro, la destilación por membrana, que se realiza a través de osmosis inversa (RO en inglés) (Ihsanullah et al., 2021). La desalación por membrana es la que presenta mayor eficiencia energética, ya que para su producción no necesita energía térmica, pero si una mayor tasa de energía eléctrica (Ver **Tabla 1**). La desalación térmica trae consigo una mayor emisión de CO₂ y de gases de lluvia acida (como NO_x y SO_x) por los requerimientos energéticos y el procedimiento de vaporización usado para la desalación (Lattemann et al., 2010).

Tabla 1. Comparación de tecnologías de desalinización basado en el requerimiento energético.

Tecnología	Temperatura	Energía eléctrica	Energía Térmica	Energía total
	°C	(kWh/m³)	(kWh/m³)	(kWh/m³)
MED	<70	1,5-2	4-7	5.5-9
MSF	120	2,5-4	7,5-12	10-16
RO	<50	3-4	-	3-4

Fuente: Ihsanullah et al. (2021)

Matus (2020) en su comparación de estos tres métodos para la implementación de una planta desaladora en la Región de Atacama (Chile) también destaca la tecnología de osmosis inversa como la más eficiente en términos de cantidad de agua desalada, energía consumida, costos e impactos generados relacionados con las temperaturas de descarga de salmuera y emisiones de CO₂. Los costos asociados a la producción por osmosis inversa son aproximadamente 0.75 USD\$/m³, mientras que para MSF y MED son 1,4 USD\$/m³ y 1,1 USD\$/m³ respectivamente (Panagopoulos et al., 2019).

Cabe destacar que tanto en Chile como alrededor del mundo cerca del 70% de las plantas desaladoras tienen su línea de producción bajo la tecnología de osmosis inversa (UPLA, 2021), por lo que siguiendo esta línea para futuros proyectos, la principal preocupación recae en que, primero, la planta funcione por osmosis inversa, y segundo, la producción energética necesaria para la fábrica venga de energías renovables y no de combustibles fósiles, lo cual va de la mano con las políticas nacionales del camino a la carbono neutralidad.

5.2.3 Descarga de salmuera

Luego de realizado el proceso de desalinización del agua por osmosis inversa se

obtienen dos productos, el agua desalinizada y la salmuera, donde esta última generalmente es devuelta al mar. Los sistemas convencionales de descarga de concentrado se pueden establecer a través de una cañería abierta al fondo marino, una cañería de descarga provista de difusores o al mezclarlos con flujos mucho mayores provenientes de las aguas de enfriamiento en plantas de energía nuclear. A continuación, se presenta una lista con los principales impactos ambientales asociados a las descargas de salmuera de una planta desalinizadora (Missimer & Maliva, 2018):

- Incremento en la salinidad de los cuerpos de agua que reciben la descarga, particularmente las de circulación restringida.
- Impactos locales de salmueras hipersalinas en comunidades marinas bentónicas, tanto en el punto de descarga como en las proximidades.
- Descarga de químicos usados para el pretratamiento del agua capturada y para la limpieza de membranas.
- Descarga de metales debido a corrosión, tales como cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni), molibdeno (Mo) y cromo (Cr).
- Impacto en acuíferos por fugas en las cañerías de salmuera.
- Daño temporal tanto en la construcción como en la mantención.
- Daño permanente por las estructuras construidas.
- Contaminación visual.

Por su parte, Fajardo (2018) destaca que la descarga de salmuera puede generar graves desequilibrios en entorno marino debido al aumento del material particulado del agua en adición a los químicos adheridos en los procesos de pretratamiento del agua extraída. Como la salmuera tiene mayores concentraciones que el agua de mar y, por lo tanto, mayor densidad, es posible que quede depositada en la misma zona de descarga,

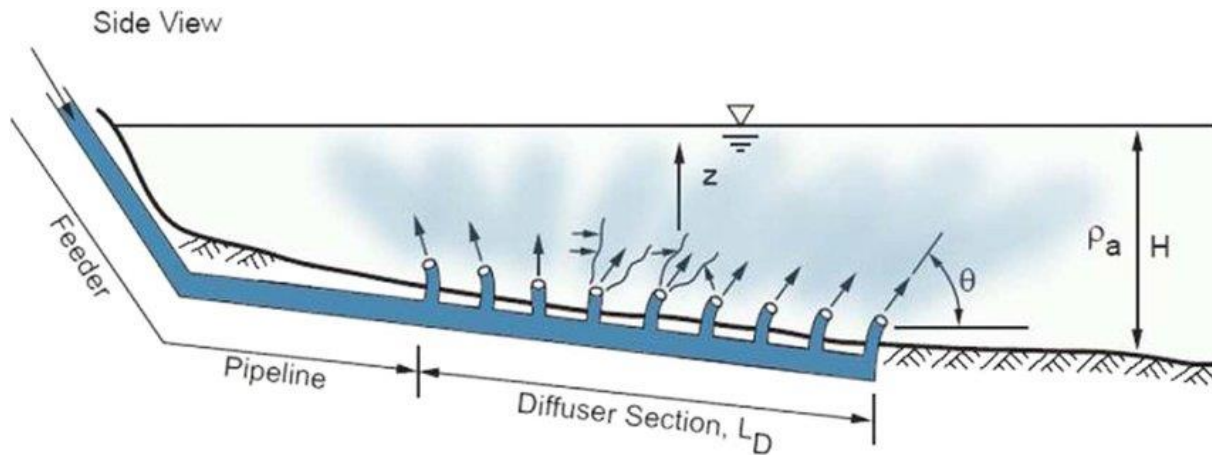
provocando la “muerte” de la flora y fauna del lugar. Además, en los procesos de desalación térmica, la temperatura de la salmuera suele ser mucho mayor que la temperatura del mar cuando no se aplica ningún tipo de mitigación.

Roberts et al. (2010) en su análisis de los impactos fisicoquímico de las descargas de plantas desalinizadoras hablan sobre la salinidad, contaminantes y temperatura. Plantean que, según variados estudios, los impactos ecológicos de las variaciones térmicas de las descargas típicamente se encuentran asociados a las plantas que funcionan bajo la desalación térmica MSF, las cuales pueden liberar salmuera 10-15°C más caliente que la temperatura a la que se capturo el agua, destacando que los procesos por osmosis inversa tienden a descargar a temperatura ambiente, siendo una mejor alternativa en este tópico. Con respecto a los contaminantes, mencionan que el agua alrededor de las plantas desalinizadoras contiene grandes concentraciones de metales, hidrocarburos, fluidos antiincrustantes y anti-suciedad, estos últimos usados generalmente para limpiar las membranas en sistemas de osmosis inversa y para reducir la suciedad de las tuberías. Finalmente plantean que la exposición a descargas de salmuera ha mostrado impactos ecológicos detectables en hábitats de hierbas marinas, fitoplancton, invertebrados y comunidades de peces.

Las descargas más comunes usadas en el fondo marino, y uno de los principales métodos de mitigación, son las tuberías con difusores multipuerto o “rossette” (Ver **Figura 7**). Los difusores son esencialmente una serie de boquillas que ayudan a aumentar la mezcla de los concentrados vertidos previniendo la acumulación en el fondo marino. Sin embargo, es importante destacar que es necesaria un área de mezclado entre el punto de descarga y un radio definido que permita la correcta mezcla. Esta área debe ser definida según ciencia e investigaciones certeras de la localización donde se está implementando y no en bases

arbitrarias (Missimer & Maliva, 2018).

Figura 7. Diagrama de una tubería de descarga con un sistema de difusores multipuerto.



Fuente: Bleninger y Jirka (2008)

En base a esto, las descargas de concentrados pueden ser amistosas con el medio ambiente si se realizan investigaciones prediseñadas que incluyan el stock vivo de organismos marinos, teniendo especial cuidado en considerar las variaciones naturales de temporada y los posibles cambios que genera la descarga de concentrados. De la misma manera, es importante que después de la instalación de la planta desaladora, y durante su operación, se continúe con las investigaciones de recolección de data que demuestre si reales impactos están ocurriendo, y de ser así, tomar medidas correspondientes. Los costos asociados a monitoreos durante la operación varían según las características de cada planta, por ejemplo, para una planta desaladora de capacidad de 1000 L/s ubicada en la región de Coquimbo en Chile, los costos del plan de vigilancia ambiental se estiman en 405.000 dólares al año, lo que corresponde al 16% de los costos fijos, y 1.9% de los costos totales (Corporación Región Coquimbo & Aqua Advice, 2014). Al igual que en el caso de las capturas de agua, el reabastecimiento de especies marinas críticas puede ser una alternativa

para reducir los impactos producidos por la descarga de salmuera (Missimer & Maliva, 2018).

Kress (2019) en el capítulo 6 de su libro “*Marine Impacts of Seawater Desalination*” analizo 50 estudios originados en 13 países y 40 locaciones, entre ellas Chile (La Chimba, Antofagasta), que se realizaron entre los años 2001 y 2017, donde su conclusión se enfoca también en la salinidad, temperatura y sedimentos. Con respecto a la salinidad, los aumentos en el ambiente son generalmente de 1% a 7%, pero se llegaron a medir algunos llegan incluso al 15% y 30%. Solo en uno de los 34 estudios se detectó que no había aumento en la salinidad del ambiente, pero los resultados fueron inconclusos porque la planta operaba a baja capacidad y usando difusores en la descarga. Aumentos en la salinidad fueron encontrados a más de 5 km de la zona de descarga, pero en general la mayoría de los estudios reportan efectos entre decenas y algunos cientos de metros. Se destaca nuevamente la importancia de los difusores donde, por ejemplo, en la planta desaladora por osmosis inversa de San Pedro del Pinatar en España se detectó hipersalinidad a pocos kilómetros de la descarga, y luego de la incorporación de difusores, ya no se detectaron aumentos en la salinidad. De 21 estudios, 12 detectaron efectos asociados a la hipersalinidad por las descargas, donde dentro de los efectos se incluye la reducción de la abundancia y diversidad de las comunidades marinas, aparte de cambios en sus estructuras, manteniéndose organismos tolerantes a la salinidad. Se encontró recuperación de comunidades bentónicas una vez que se eliminó el estrés salino. Cabe destacar que los que no encontraron efectos negativos se pueden considerar inconclusos por cómo se desarrollaron los estudios, dentro de las falencias se encuentran cortos periodos de estudio, que no permiten dilucidar si los efectos corresponden a descargas o a cambios naturales del ambiente, áreas de estudio muy alejadas de las descargas y estudio de

organismos que pueden ser menos sensibles a la salinidad que otra flora y fauna.

En las conclusiones de Kress (2019) con respecto a la temperatura, hay concordancia con lo que plantea Missimer y Maliva, donde los mayores aumentos de temperatura están relacionados a plantas que funcionan con desalación térmica llegando a aumentar 10°C. Sin embargo, del análisis de los estudios plantea que no existen posibles efectos del aumento de temperatura, principalmente porque los estudios se hicieron en planta de desalación por osmosis inversa, donde las descargas de salmuera solo están 0,5 a 1 °C sobre la temperatura del ambiente. Con respecto sedimentos y metales, nuevamente se atribuyen en su mayoría a descargas de plantas térmicas MSF, destacando el cobre (Cu) que probablemente se debe a la corrosión de la planta. Finalmente, presenta una recomendación de los ítems que debe contener un estudio para analizarlo correctamente:

- Planta desalinizadora: localización de procesos, pretratamientos y postratamientos, fecha de inicio de las operaciones, capacidad total, capacidad actual durante el estudio, sistemas de captura y de descarga, composición de las salmueras y cualquier cambio que se haya ejecutado durante el proceso o periodos de inactividad de la planta ocurridos durante los años de operación.
- Localización de sistemas de capturas y descargas: Deben poseer toda la data disponible del ambiente natural relevante para el estudio, para presentar valor en cuanto a las referencias.
- Estudio: Fecha del estudio, las operaciones de la planta durante el estudio, procedimiento de muestras detallado, incluyendo la estación local, distancia de la zona de descarga, rango de exposición al factor estresante específico y estaciones de referencia.

Por su parte Ihsanullah et al. (2021) como parte de las estrategias de mitigación en la descarga de salmuera, al igual que otros autores destaca la importancia de las investigaciones específicas de cada lugar y el uso de difusores en el punto de descarga que debe estar ubicado lejos de áreas productivas y ecológicas sensibles, agregando como otra reducción de impactos el adoptar tecnologías con un uso mínimo de químicos o la aplicación de químicos biodegradables y menos tóxicos en las plantas desalinizadoras. Además, y haciendo alusión a la economía circular, el reúso y reciclabilidad de los materiales extraídos de la salmuera puede minimizar los impactos negativos de la misma. Entre las opciones para reducir el volumen de las descargas de salmuera y además obtener otros productos de ella podemos encontrar:

Recuperación de agua: la descarga de líquido cero (ZLD por sus siglas en inglés) es uno de los mejores métodos para disminuir la descarga de salmuera, ya que teóricamente elimina los vertidos de concentrado. El ZLD tiene la ventaja de recuperar la sal y el agua fresca de la salmuera, minimizando su concentración, y es aplicable en la mayoría de las tecnologías térmicas y basadas en membranas. Los procesos como cristalizadores térmicos y mecánicos de vaporación, estanques de evaporación, secadores por aspersión, la evaporación intensiva asistida por el viento, la solidificación y captura de sales, la precipitación de lodos, el reciclaje de osmosis inversa y cristalización por circulación forzada pueden separar el agua y las sales de la salmuera de descarga (Ihsanullah et al., 2021). Sin embargo, si bien estas tecnologías son eficientes al momento de reducir la concentración de la descarga, pueden llevar impactos ambientales no intencionales debido a su alto uso de energía y actualmente no son viables debido a su alto costo, por ejemplo, los costos de recuperación de agua desde estanques de evaporación son aproximadamente 1.11 USD\$/m³ y desde cristalizadores son 1.22 USD\$/m³. Se espera que investigaciones futuras

en tecnología, como materiales novedosos con propiedades avanzadas a bajo precio y costo eficientes y configuraciones avanzadas del sistema, además del uso de energías renovables, permitan impulsar la sostenibilidad de los sistemas ZLD para el tratamiento de salmuera. (Panagopoulos et al., 2019).

Recuperación de energía: Debido a que la salmuera tiene presión de osmosis alta, debido a su alta salinidad, la salmuera puede ser usada como una fuente de energía del gradiente de salinidad al mezclarla con agua dulce. Las aguas residuales pueden utilizarse para recuperar el gradiente de salinidad de energía de la salmuera, recuperando así una cantidad suficiente de energía que puede ser convertida a electricidad o energía mecánica desarrollando un sistema adecuado. (Ihsanullah et al., 2021)

Extracción de metales preciosos: el agua de mar contiene la mayoría de los elementos de la tabla periódica, los cuales son dejados en la salmuera luego del proceso de desalinización. Históricamente, la sal ha sido uno de los principales componentes recuperados del agua de mar, pero con el paso de los años se han explorado diversos caminos para extraer metales preciosos como el magnesio, oro, uranio, bromo, potasio, cesio, rubidio y litio, además de otros minerales y químicos usando distintas tecnologías. Esta recuperación de materiales no solo reduce los impactos ambientales, si no que podría reducir los costos de desalinización, sin embargo, a pesar de los estudios que reportan la exitosa extracción de materiales preciosos, el proceso actualmente no es rentable.

Uso beneficio de salmuera: Sánchez et al. (2015) investigó sobre el uso potencial de las descargas de salmuera en el riego de arbustos forrajeros, el cultivo de espirulina (suplemento alimenticio) y la piscicultura de peces específicos que se adaptan a las aguas con altas concentraciones de sal. Sin embargo, aún falta más investigaciones que determinen si es un proceso sustentable para aplicaciones específicas por la necesidad de

pretratamiento.

Captura y utilización de dióxido de carbono (CO₂): Mustafa et al. (2020) demuestra que la salmuera obtenida de los procesos de desalinización puede ser usada para la captura y utilización de dióxido de carbono. En el proceso de captura de CO₂ el cloruro de la salmuera es removido usando un óxido metálico mixto y la salmuera alcalina resultante es transformada en hidrotalcita en forma de cloruro. La salmuera se usa para la absorción de CO₂, para precipitar el NaHCO₃ que resulta de la eliminación del Na⁺ de la salmuera, haciéndola más segura para su vertido al medio ambiente. El absorbente puede usarse en muchos ciclos para la absorción de CO₂ y la eliminación de cloruros (Ihsanullah et al., 2021).

Todas estas medidas si bien son eficientes al momento de reducir los volúmenes de concentración de salmuera presentan problemas económicos de implementación o de falta de investigación para certificar que son sostenibles, por lo que es necesario la participación de más estudios y avance tecnológico para poder incluirlas en medidas de mitigación aplicables.

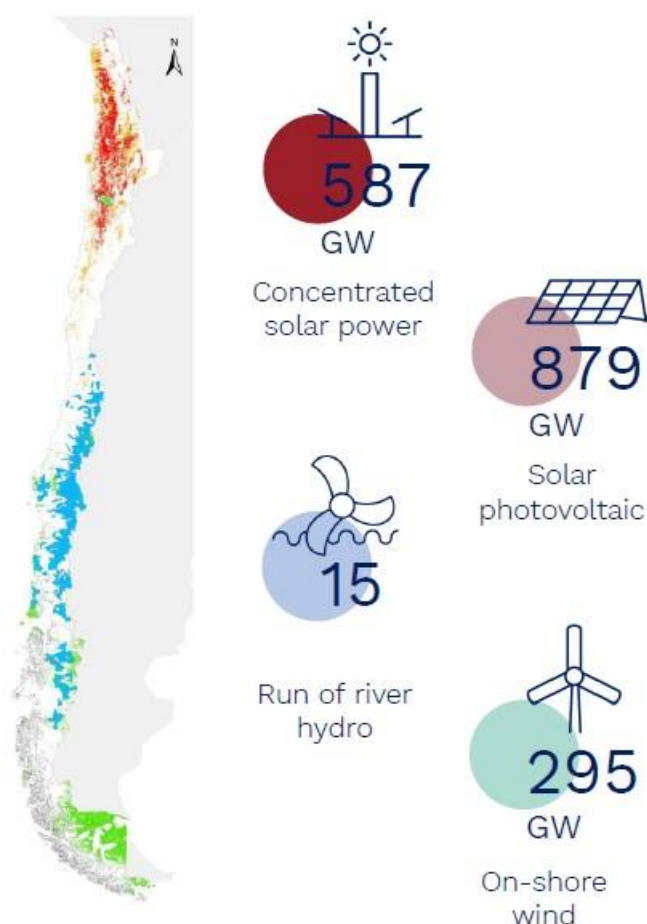
5.3. Energía

Chile ha sido destacado varias veces por ser un país con un alto potencial para la implementación de energías renovables, entre ellas, las energías fotovoltaicas y eólicas. De hecho, en el estudio *ClimateScope 2021*, realizado por Bloomberg New Energy Finance de forma anual, el país se ubicó como la mejor plaza en toda América, incluso sobre Brasil, Canadá y Estados Unidos, quedando en segundo puesto a nivel mundial. Con esto ya se completan 4 años consecutivos entre los que Chile se encuentre entre los dos primeros puestos de este ranking a nivel mundial (Induambiente, 2021).

Chile por su parte ha destacado en su estrategia nacional de hidrógeno verde este

potencial de energías renovables (Ver **Figura 8**), llegando a casi 1800 GW de producción potencial en conjunto. Esto gracias a que en el norte del país se encuentra la radiación solar más poderosa del planeta, con factores de capacidad que pueden superar el 37% en plantas fotovoltaicas mono faciales con un eje de seguimiento, que la generación solar en el centro de Chile es más competitiva que las plantas generadoras de electricidad en base a combustibles fósiles, y a que los vientos del sur extremo son tan fuertes como los son fuera de la costa, donde turbinas eólicas a 120 metros de altura son capaces de tener factores de capacidad arriba del 75% en la costa. (Ministerio de Energía & Ministerio de Minería, 2021).

Figura 8. Potencial de energías renovables a lo largo de Chile, en GW.



Fuente: Ministerio de Energía y Ministerio de Minería (2021)

Sin embargo, a través de los años se ha ido desmitificando la idea de que al ser energías renovables y que en su generación eléctrica no producen gases de efecto invernadero, estas no generan contaminación, ya que de igual manera presentan otros impactos ambientales que bajo el planteamiento de no usar centrales de energía en base a combustibles fósiles en la cadena de valor del hidrógeno verde, hace necesario su estudio para identificar los principales impactos y las formas de mitigación. De esta manera, y siguiendo la línea planteada, es que se investiga respecto de las plantas fotovoltaicas de energía solar y las plantas de energía eólica.

5.3.1 Plantas Fotovoltaicas de Energía Solar

Las plantas fotovoltaicas están conformadas generalmente por ciertos elementos para asegurar su correcto funcionamiento, los cuales se comentan a continuación. En primer lugar, están los paneles fotovoltaicos, que estarán montados en estructuras que pueden ser fijas, a un eje o a dos ejes. Las estructuras de dos ejes permiten cambiar la inclinación del panel solar manualmente durante el año para ajustarlo a la posición del sol. Las estructuras a dos ejes son automáticas y van moviéndose durante el día para captar la mayor radiación. Luego se tienen los inversores que transforman la corriente continua proveniente de los paneles en corriente alterna para poder usarla. Si se está conectado al sistema eléctrico, es necesario un transformador y un contador, donde el transformador sirve para elevar el voltaje que posee en el inversor hasta el que tienen las redes de distribución eléctrica. El contador es en el caso que se quiera inyectar la energía al sistema eléctrico, el cual puede ser bidireccional para suplir las demandas de las locaciones en caso de que no se pueda satisfacer con lo generado por los paneles. Finalmente se tienen todas las conexiones y medidores que permiten un buen funcionamiento de la instalación solar (Renovetec [Renovetec], 2018).

Los paneles solares pueden estar conformados por distintos tipos de celdas, las cuales se ha ido desarrollando conforme avanza la tecnología. Sierra Céspedes et al. (2020) comentan que los paneles en la industria han sido principalmente de silicio, abarcando un 92% del mercado global, mientras que un 7% corresponde a paneles de película delgada y el 1 % a tecnologías de concentración solar. Así, en su análisis de los componentes de los distintos tipos de paneles solares, llegaron a los siguientes impactos:

- Paneles de películas delgadas presentan metales como el cadmio en sus celdas fotovoltaicas, los cuales son metales pesados altamente tóxicos para el ser humano y el medio ambiente.
- Los paneles de silicio policristalino usan plomo, metal que presenta una alta toxicidad que puede afectar la salud de las personas y el medio ambiente. Este no se puede recuperar y debe ser tratado como material altamente peligroso.
- Los procesos fisio-químicos que se realizan posterior al desensamble de los paneles (pirolisis en continuo con gasificación, lixiviación ácida y electrólisis) pueden presentar afecciones al medio ambiente. Sin embargo, en el caso de la lixiviación, que se usa para separar las cenizas de silicio cristalino, aun no existen estudios claros que confirmen los impactos al medio ambiente y al ser humano, pero se puede deducir ya que en la metalurgia este proceso puede contaminar cuerpos de agua.
- Finalizada la vida útil del panel, algunas sustancias que se encuentran en él pueden degradarse al punto de ser tóxicas y corrosivas, pudiendo degenerar el panel hasta un punto en el que ya no se puede reciclar y se debe clasificar como un residuo de carácter tóxico.

Podemos observar que la mayoría de los problemas e impactos que los paneles solares pueden generar en el medio ambiente se deben a los materiales de los que están fabricados. Sierra Céspedes et al. (2020) recalcan la importancia de la reciclabilidad de los paneles y, además, entregan otras ventajas de estos, las cuales se mencionan continuación:

- Se puede reciclar el 98% de los materiales de paneles de película delgada y un 96% de los materiales de paneles de silicio policristalino.
- Debido a que la vida útil de un panel es de aproximadamente 30 años, es que se posee un plazo extenso para que los países logren incorporar la infraestructura suficiente para su reciclaje y reutilización.
- El procedimiento de reciclaje de paneles delgados es más corto en número de etapas que el de silicio policristalino, reduciendo tiempo y energía. Sin embargo, la separación de los materiales de los paneles de silicio no demanda muchas fases, comenzando con la separación mecánica y manual, seguida de separación por altas temperaturas, terminando con lixiviación y/o electrólisis.
- Reciclar materiales como el galio o indio pueden ser favorables para la industria fotovoltaica, ya que su extracción es muy costosa. Asimismo, implementar los materiales reciclados en un panel solar ayuda a disminuir el consumo de energía en la manufactura en un 50%.

Sierra Céspedes et al. (2020) en sus conclusiones destacan que la comunidad europea es líder en políticas RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) inculcando el reciclaje y reintegración de paneles solares, motivando a generar modelos de post consumo que involucren las fases de ciclo de vida de un panel, y de esta forma garantizar que la mayor parte del material quede dispuesta para su reutilización.

E2BIZ consultores (2019) entregan una tabla comparativa entre los tratamientos de RAEE disponibles en Chile y la Unión Europea (ver **Tabla 2**), de la cual se observa que aún existe una brecha importante en los tratamientos de fundición, pretratamiento e incineración, siendo más similares en la disposición final, pero todavía con cosas por mejorar. Es importante que Chile avance en este tópico para poder lograr una correcta disposición de materiales peligrosos y así también disminuir el porcentaje de no reciclados.

Tabla 2. Tratamientos disponibles en Chile v/s Unión Europea

Tratamiento	Disponibilidad en Chile	Disponibilidad en Europa
Pretratamiento	Principalmente manual	Trituración y separación utilizando equipos industriales.
Fundición	Existe la opción de enviar a fundición para piezas metálicas extraídas de los equipos electrónicos, tales como carcasas, engranajes, etc.	Existen opciones para recibir constituyentes complejos de los equipos electrónicos, tales como placas electrónicas.
Incineración	Existen instalaciones que permiten la incineración de residuos peligrosos, pero no se utilizan para dar disposición final a residuos electrónicos.	Existen instalaciones que aceptan residuos electrónicos peligrosos, tales como pantallas CRT, que permiten recuperar en las cenizas los metales pesados y la obtención de energía.
Disposición final	Existen rellenos sanitarios que reciben parte de los residuos electrónicos generados, no estando adaptados para este fin. También existen rellenos de seguridad que permite la disposición final de residuos electrónicos peligrosos.	Existen rellenos Sanitarios que reciben una mínima cantidad de e-waste. Existen rellenos de seguridad para residuos peligrosos y se utiliza la incineración para dar disposición final a los residuos electrónicos peligrosos.

Fuente: E2BIZ consultores (2019).

Tawalbeh et al. (2021) realizaron una revisión general de los distintos impactos que presentan las plantas solares fotovoltaicas, enfocándose en 5 tópicos específicos: uso de tierra, contaminación del aire y cambio climático, emisiones de materiales peligrosos, uso de agua e impactos visuales y acústicos. Respecto del uso de la tierra, en primer lugar, destaca que las plantas fotovoltaicas y plantas de concentración solar son las que mejor

aprovechan el suelo en términos de generación de energía, donde, por ejemplo, una planta generadora de energía en base a carbón ocupa de 5 a 13 veces más terreno que una planta fotovoltaica, llegando incluso a ser más eficiente que la generación eólica. Por ejemplo, para una instalación fotovoltaica menor a 10 kW de potencia, se necesitan 3,2 hectáreas por MW, mientras que, para una generadora eólica menor a 10 kW de potencia, se necesita 30 hectáreas por MW. Otros valores se pueden observar en el **Anexo 1**.

Tawalbeh et al. (2021) destacan que el mayor impacto ambiental en la tierra y hábitat ocurre en la etapa de construcción, principalmente por el uso de concreto y de maquinaria pesada, instalación de estructuras, excavación de zanjas para cableado y la conexión de infraestructura. Por su parte Turney y Fthenakis (2011) también explican que el mayor impacto en la vida salvaje y el hábitat es debido a la localización de la planta fotovoltaica. Esta generalmente tiene una cerca que limita el movimiento de animales, pero que a veces tienen pequeñas aperturas que dejan entrar animales pequeños. Con o sin aperturas, el hábitat cambia significativamente, donde lugares de escondite, estrategias de caza y disponibilidad de alimentos se verán afectados. El suelo generalmente es raspado en los procesos de construcción, dejándolo libre de vegetación, o en otros casos, se mantiene la vegetación, pero solo a algunos pies de altura. Los mismos paneles generan sombras que pueden alterar microclimas, causando efectos en la vegetación que aún no son estudiados.

A pesar de lo mencionado en el párrafo anterior Turney y Fthenakis (2011) destacan que es posible que existan efectos positivos en los ecosistemas con la instalación de una planta fotovoltaica, esto ligado a que, en muchos casos, una planta solar de gran escala provee financiamiento para acciones de mitigación durante su periodo de vida. Algunos ejemplos de estos beneficios son la eliminación de especies sobrepobladas e invasivas, construcciones de hábitats adecuados para especies endémicas, la exclusión de vehículos

recreativos en la zona o aumentar el monitoreo de un ecosistema. Luego de un estudio realizado entre los años 2013 y 2021, Universidad de Castilla-La Mancha et al. (2021) presentan un informe con distintos impactos positivos en el suelo, cubierta vegetal y fauna de una instalación fotovoltaica en La Mancha, España. Dentro de sus conclusiones destacan que después de la instalación de la planta fotovoltaica, el suelo recupera su actividad y por tanto el equilibrio entre organismos vivos, materia orgánica y materia mineral. Luego de 5 años de funcionamiento de la planta el suelo muestra una evolución favorable en calidad acercándose a un ecotono (sector de transición entre dos o más comunidades ecológicas). Asimismo, la cubierta vegetal presente en la instalación se asemeja a la vegetación existente en los alrededores aumentando significativamente la diversidad constituyendo una zona de transición cuya composición permite determinar el aprovechamiento secundario de cada instalación, como la apicultura, plantas medicinales y pastos. Finalmente, comparten que aproximadamente 90% del suelo queda libre de instalaciones lo que permite mantener la vegetación autóctona y ser hábitat y refugio de diversas especies de animales.

Cabe destacar que para que lo anteriormente mencionado se cumpla, es necesario la implementación de diversos tipos de mitigaciones, los cuales son descritos en el informe. Entre ellos se encuentra reducción de fitosanitarios, control de residuos, creación de pantallas vegetales y mini bosques, uso del ganado para control de vegetación, instalación de cajas nido para aves, colocación de posaderos, entre otros (Universidad de Castilla-La Mancha et al., 2021).

Otras medidas de mitigación del uso de suelo son mencionadas por Tawalbeh et al. (2021) entre ellas el uso de plantas fotovoltaicas flotantes (FPV en inglés), las cuales son dispuestas en cuerpos de agua y que generalmente son más eficientes debido al sistema de enfriamiento natural que entrega el agua, y el uso de sistemas híbridos entre fotovoltaico y

eólico, que puede reducir los requerimientos de tierra de 4 hectáreas por MW a 1.06 hectáreas por MW.

La mayoría de los impactos en el suelo se debe a la irrupción en los ecosistemas existentes, los cual en Chile específicamente se ven reducidos al hacer las instalaciones en zonas desérticas. Pero que se minimicen no es equivalente a eliminar, por lo que aún se debe tomar en consideración.

El uso de suelo no es el único impacto importante, ya que la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero en una planta fotovoltaica se encuentran en la fabricación de los componentes, la cual representa un 71,3% de las emisiones, versus un 19% en construcción y 13% en operaciones (-3.3% en desmantelamiento) para un total de 34,1 gramos de CO₂ equivalente por kWh (Nugent & Sovacool, 2014). Tawalbeh et al. (2021) describe que las emisiones en la manufactura de paneles son principalmente durante la fabricación de acero y aluminio para la construcción de estructuras y marcos, durante la producción de vidrio y durante la reducción de sílice a silicio para las células solares de silicio, pero que la magnitud de las emisiones se debe principalmente al combustible que se esté usando para estos procesos.

Una de las motivaciones que siempre ha destacado en la implementación de la energía solar es para reducir las emisiones de CO₂ de las plantas tradicionales para combatir el cambio climático, pero se debe tener especial cuidado cuando estos proyectos se disponen en regiones boscosas, ya que árboles y arbustos deben ser removidos para evitar que haya sombras en los paneles solares. Generalmente cualquier planta que sea más alta de 0,5 metros es cortada y removida, la cual puede terminar convertida en mantillo (material de descomposición en el suelo), quemada, o usada como material de construcción u otros productos de madera. Esto genera problemas tanto en la reducción de la captura de CO₂,

como en la generación de más emisiones según el destino que tenga la madera, donde según diversos estudios se puede estimar que entre el 25% y 50% de carbono desforestado es capturado y respectivamente entre el 75% y 50% se convierte en una nueva emisión. Al final de la vida útil de la planta solar es posible hacer una reforestación, pero es a muy largo plazo (Turney & Fthenakis, 2011). Este problema nuevamente se puede minimizar en el caso de Chile al construir las plantas fotovoltaicas en zonas desérticas, pero cuidando de igual manera las distintas especies que se pueden encontrar en la zona.

Tawalbeh et al. (2021) comentan que se puede reducir la huella de carbono de los paneles solares investigando y diseñando fases que mejoren el rendimiento de los paneles. Algunos de estos atributos pueden ser aumentar la vida útil, aumentar la capacidad del sistema de montaje en el suelo, elegir zonas con mayor irradiancia y usar mezclas de energías renovables y película delgada (CdTe) o seleniuro de cadmio (CdSe). También hablan de que se ha estudiado el “Efecto Albedo”, que se refiere al calor generado por los paneles solares, pero que se ha demostrado con estudios que este efecto es insignificante comparado con la reducción de gases de efecto invernadero que generan las plantas fotovoltaicas.

Al igual que Sierra, Tawalbeh et al. (2021) destacan el uso de materiales peligrosos para la creación de paneles solares, los cuales generalmente son extraídos de la minería y algunos que son bastante raros y difíciles de conseguir, como el telurio, usado para la creación de paneles CdTe. Destacan que la principal mitigación para reducir el impacto ambiental de estos materiales es el reciclaje. Muchos estudios se han realizado y se ha avanzado bastante respecto a establecer estos procesos de reciclaje, pero aún se requieren más investigaciones y mejoras ya que los procesos siguen siendo intensivos en el uso de energía, generalmente complejos y con un alto uso de químicos. A pesar de lo compleja que

puede ser la ruta de reciclaje, sigue siendo una de las mejores formas de mitigar las emisiones de gas de efecto invernadero de las plantas fotovoltaicas, donde estudios reportan que se puede recuperar hasta el 90% de los materiales.

Se presentan otros impactos que son menos relevantes que los ya mencionados, pero que de igual manera se deben prestar atención. En primer lugar, está el uso del agua, que durante la operación generalmente se usa para enfriar y limpiar los paneles solares, el cual representa un consumo insignificante de agua. A pesar de esto, existen formas de reducir más el consumo, y es que la frecuencia de limpieza de los paneles depende de muchas variables ambientales de la zona, como polvo, velocidad del viento, precipitaciones, polución del aire, humedad, entre otras, y entre ellas está el recircular el agua de enfriamiento de paneles o implementar esquemas de refrigeración seca o híbrida, que enfrían mediante ventilación. Sin embargo, se destaca que el mayor consumo de agua es durante la manufactura y los procesos de reciclaje de los paneles solares, pero que aun así sigue siendo la mejor alternativa. (Tawalbeh et al., 2021). Jin et al. (2019) en su análisis de uso de agua en tecnologías eléctricas muestra como en promedio el menor consumo de agua está dado por las plantas fotovoltaicas (330 L/MWh) y eólicas (43 L/MWh), versus otras 8 tecnologías que incluyen tanto energías renovables como en base a combustibles fósiles. Así mismo Tawalbeh et al, (2021) menciona otros estudios que plantean que la fotovoltaica es la mejor tecnología para reducir consumo de agua, tanto por si sola, como en combinación con otros medios. Por ejemplo, se reduce más el consumo de agua si se generan sistemas mixtos eólico-fotovoltaico y que estos se pueden aplicar en plantas desalinizadoras o en lugares de extracción de agua en tierra.

En segundo lugar, encontramos los impactos visuales y sonoros. Con respecto al impacto sonoro, se destaca que estos se encuentran principalmente en la fase de

construcción de la planta fotovoltaica, siendo insignificantes en la etapa de operación, y que es necesario que en la fase de construcción se mantenga un monitoreo constante del ruido según la regulación local correspondiente para así no afectar tanto al hábitat como a las personas. Con respecto a los impactos visuales, estos están más relacionados a las personas y a la localización de la planta, que puede generar molestia en las comunidades y hace necesaria las consultas públicas sobre todo en lugares que tienen una gran diversidad biológica o son zonas de recreación. Se plantean muchas mitigaciones respecto del impacto visual, entre ellas planear y seleccionar de forma apropiada la zona de instalación de la planta, adopción de normas y políticas ambientales pertinentes, usar las fachadas de edificios para poner paneles, evitar poner paneles en edificios con valor histórico y cultural o en áreas de conservación y finalmente incluir la participación ciudadana en el proceso de planeación de las instalaciones para que sea públicamente aceptada.

5.3.2 Plantas de Energía Eólica

Ya se mencionó en el apartado anterior que, junto con la energía solar, la energía eólica viene siendo una de las más convenientes y menos impactantes en diversos aspectos. Si bien Chile tiene un potencial solar enorme en uno de los focos de producción de hidrógeno en el norte, existe también otro foco de producción en el extremo sur, donde la energía renovable que destaca es la eólica. Es por esto, que de igual manera que con las plantas de energía solar, es necesario ver los impactos ambientales que presentan las generadoras eólicas y cuáles son las principales acciones de mitigación frente a ellos.

Nazir et al. (2020) en su análisis sobre los impactos ambientales de las generadoras eólicas, empieza aclarando que la generación eólica es una de las energías renovables más *eco-friendly* y es también asumida como la más compatible con animales y humanos. Sin embargo, esto no implica que no tenga impactos en el ambiente. Uno de ellos es la

mortalidad de aves, la cual generalmente es mayor durante el proceso de construcción de los parques eólicos, pero se destaca que la mortalidad a causa de aerogeneradores es mucho menor que otras causas de muerte de pájaros por acción humana, por ejemplo, un estudio dice que solo 1 de 250 muertes de aves se deben a energías en base a viento. Otro estudio dice que en un año solo 20 pájaros mueren por turbinas eólicas, habiendo otros 1500 que mueren por cazadores y 2000 que mueren por vehículos o torres de transmisión eléctrica. Aparte de la construcción, la mayor mortalidad de fauna ocurre en mal clima o noches con neblina, donde los pájaros se ven atraídos por la luz de los aerogeneradores. Ante esto, las principales formas de mitigación tienen que ver con el correcto estudio de la fauna de la zona de instalación de la planta, y la instalación de luces que cumplan su objetivo pero que no atraigan a las aves.

Dai et al. (2015) plantean que a pesar de que hay mucha mortalidad por parte de otras fuentes relacionadas al humano, no hay que pasar por alto la mortalidad relacionada a parques eólicos. Algunos estudios estiman que 234.000 pájaros en promedio mueren anualmente por colisiones con torres de turbinas eólicas en Estados Unidos, y que en diferentes regiones se tiene un promedio de 2.3 muertes por turbina. Destacan que los promedios de muerte varían según la localización, además que hay muchos factores que incrementan la mortalidad, como el diseño y disposición de la turbina, las especies de pájaros y variaciones climáticas, por ejemplo, hay una gran correlación entre la probabilidad de colisión según la orientación de la turbina y hay un incremento de mortalidad si las turbinas se encuentran en cimas, laderas contra el viento o en las rutas de migración de aves. Wang y Wang (2015) concuerdan con estos factores y plantean que la mortalidad también varía según las especies donde, por ejemplo, las aves rapaces son más susceptibles, mostrando los niveles más altos de mortalidad en distintas locaciones del

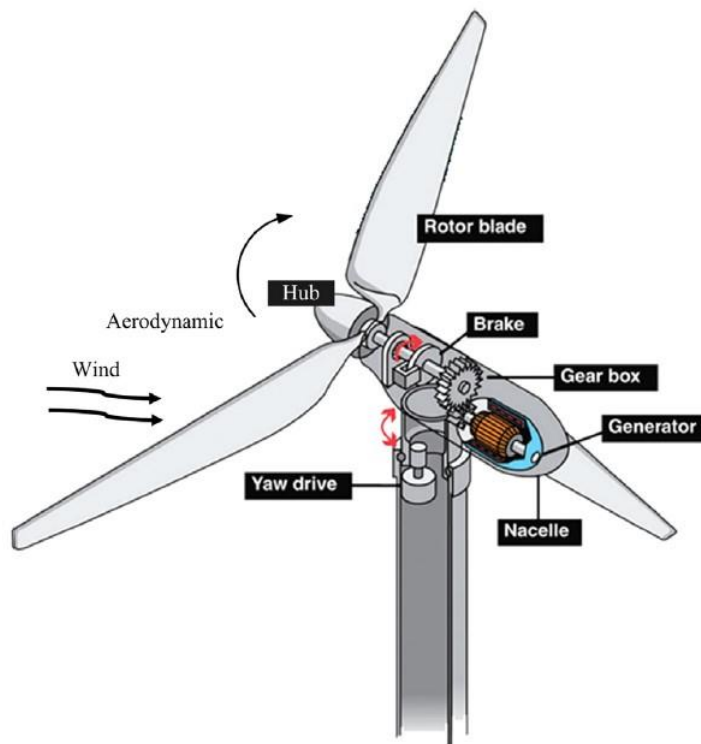
mundo, que esta principalmente relacionado a que estas aves dependen de las corrientes de aire para ganar altitud, moverse entre locaciones y cazar. Los murciélagos también presentan una mayor sensibilidad debido a sus características fisiológicas, sufriendo barotraumas, que son afecciones cardiovasculares y pulmonares por los cambios de presión atmosférica cerca de la turbina.

También se destaca que el mal tiempo y la noche pueden resultar en más colisiones, pero que no está claramente identificado porque es difícil la observación en esas condiciones. Otro impacto destacado sobre las aves es la perturbación del hábitat natural, donde las plantas eólicas se convierten en barreras que afectan directamente los comportamientos de caza y cría de pájaros. Varios estudios demuestran que las aves pueden variar sus rutas para esquivar los parques eólicos de 200 hasta 1000 metros de distancia (Dai et al., 2015).

Algunas de las mitigaciones propuestas por Dai et al. (2015) son restringir la construcción a periodos que no sean los de cría, alargar las aspas y de esta forma disminuir la velocidad de rotación de la turbina para hacerla más visible a los pájaros y aplicar un sistema de detención de las turbinas cuando se acerquen pájaros, lo cual puede disminuir un 50% la mortalidad a costa de solo un 0.07% de producción. También destaca la importancia de la localización de los parques eólicos, que se encuentren lejos de rutas de aves y hábitats importantes, a 300 metros de cualquier área conservada y realizando estudios de monitoreo en áreas desde 200 a 500 metros lejos del parque. Finalmente, un correcto diseño de como estarán dispuestas las turbinas eólicas en el parque puede ayudar a reducir la mortalidad, monitoreando los comportamientos a corto y largo plazo de los posibles impactos, además de que durante la operación se agreguen distintos tipos de sensores sonoros e infrarrojos para recopilar información importante para hacer evaluaciones ambientales.

Otro de los impactos es el sonido, que viene siendo uno de los más importantes en las turbinas eólicas. La mitigación general siempre es que estas se encuentren instaladas lejos de zonas residenciales y de terrenos colindantes de otros propietarios. Hay dos tipos de ruidos generados por turbinas, uno es el aerodinámico, provocado por el viento que circula en las aspas, y el otro es el mecánico, relacionado con los rotores y engranajes (Ver **Figura 9**). El ruido mecánico se puede minimizar en las etapas previas de diseño del rotor o haciendo a prueba de sonido el recubrimiento de la turbina. Dependiendo del viento, las aspas pueden generar ruidos parecidos a una turbina, y una forma de mitigación también va en el diseño minucioso de las mismas aspas. Hay que destacar que el ruido mecánico del aerogenerador es imperceptible a más de 350 metros de donde está ubicado (Nazir et al., 2020).

Figura 9. Fuentes de generación de ruido en un aerogenerador.



Fuente: Wang y Wang (2015)

Sin embargo, Wang y Wang (2015) comentan que debido al desarrollo de diseños mecánicos avanzados (aislamiento apropiado) el ruido mecánico ha dejado de ser tan importante, y es el ruido aerodinámico el que genera más impacto. Para medir los ruidos se puede hacer mediante modelos teóricos, que muchas veces son muy simples o usan solucionadores computacionales complejos de fluidos dinámicos, que para aplicarlos requieren de mucho tiempo, o mediante las guías y estándar internacionales y/o las recomendaciones de la Agencia Internacional Ambiental (IEA en inglés). Estas guías se han desarrollado para la industria y son difíciles de aplicar en turbinas eólicas, principalmente porque hay intervención de otros ruidos, como tráfico vehicular o trenes. El mismo viento dificulta las mediciones cuando está a más de 8 m/s ya que el ruido generado por este suele ocultar el generado por el aerogenerador. A velocidades de 4 a 6 m/s el ruido de la turbina empieza a notarse y se ha estudiado que pueden llegar a 48 decibeles aproximadamente, aumentando 9 decibeles el sonido ambiente.

Dai et al. (2015) destacan que el ruido aerodinámico generado por la turbina crece mientras más grande es la turbina y que se genera independiente de la dirección en la que circula el viento, generando distintos niveles de ruido con los cambios que este tenga. También comenta la importancia de la absorción de ruido de los materiales aislantes de la turbina no solo para el ruido mecánico. Dentro de los factores que aumentan el impacto se encuentra el ruido ambiente, ya que, en noches tranquilas, una persona a 1.5 kilómetros puede percibir el ruido de la turbina. Se vuelve a destacar que para controlar el nivel de ruido es necesario una separación mínima entre las plantas eólicas y zonas residenciales, que generalmente son recomendadas por el gobierno o instituciones médicas, variando entre regiones y países. En la **Tabla 3** se puede ver un resumen de regiones y las distancias mínimas recomendadas.

Tabla 3. Distancias mínimas recomendadas para instalación de parques eólicos en distintos países y regiones.

Region	Distance (m)
England (U.K.)	350
Scotland (U.K.)	2000
Wales (U.K.)	500
Belgium	350 in theory (developers making it no closer than 500)
Denmark	$4 \times$ the total height
France	1500 (in practice 500 seems minimum observed)
Germany	Between 300 and 1500
Italy	Between $5 \times$ the height or $20 \times$ the height (not specified if mast or total height)
Netherlands	$4 \times$ the height of the mast
Northern Ireland	$10 \times$ rotor diameter (with a minimum distance of 500)
Romania	$3 \times$ height of the mast
Spain	Between 500 and 1000
Switzerland	300
Sweden	500 (in practice)
Western Australia	1000
Manitoba (Canada)	500–550
Ontario (Canada)	550
Prince Edward Island (Canada)	$3 \times$ the total height
Illinois (U.S.)	$3 \times$ the total height of the tower + the length of one blade
Kansas, Butler County (U.S.)	304.8
Kansas, Geary County (U.S.)	457.2
Massachusetts (U.S.)	$1.5 \times$ total height
Minnesota (U.S.)	At least 152.4 and sufficient distance to meet state noise standard
New York (U.S.)	$1.5 \times$ total height or 457.2 m
Oregon (U.S.)	1000
Door County, Wisconsin (U.S.)	$2 \times$ total height and no less than 304.8
Portland, Michigan (U.S.)	$2 \times$ total height and no less than 304.8
North Carolina (U.S.)	$2.5 \times$ total height
Dixmont, Maine (U.S.)	1609
China	200 for a single wind turbine, 500 for a large wind farm

Fuente: Dai et al. (2015).

El ruido puede inducir perturbación en el sueño y ocasionar problemas de salud como dolores de cabeza, irritabilidad y fatiga, por lo que impacta directamente en la molestia e insatisfacción de las personas. Sin embargo, debido a la escasez de literatura y que la molestia puede ser generada por otros factores, es necesario más estudios que logren mostrar una asociación clara entre el ruido de las turbinas eólicas y la molestia en humanos (Dai et al., 2015).

El impacto visual que genere un aerogenerador depende de muchas cosas, entre

ellas el contraste de color, el tamaño, la distancia de zonas residenciales, las sombras generadas, entre otros. Las evaluaciones basadas en sistemas de información geográfica son muy usadas para medir el impacto visual, ayudando a determinar la extensión del área afectada. Una de las variables que afecta considerablemente el aumento del impacto visual es el contraste del lugar donde se dispone la planta eólica, donde algunos diseñadores tienden a sintonizar el aerogenerador aplicando pixeles que ayuden a mezclarlo con los alrededores. Finalmente, muchos países han adoptado distancias mínimas a las que las instalaciones deben localizarse, alejadas de zonas residenciales y de granjas. Mientras más alejadas se encuentren, menos será el impacto visual (Nazir et al., 2020).

Dai et al. (2015) por su parte comentan que los impactos visuales son subjetivos y dependen de la actitud que tengan las personas con respecto a temas ambientales, sus sentimientos respecto de cómo afectan las turbinas a los paisajes y la actitud general con la industria de los generadores eólicos. Esto provoca que evaluar el impacto visual sea una tarea muy difícil. Algunos estudios muestran que las personas tienen una idea positiva respecto de instalar plantas eólicas pero que muestran oposición cuando se ubicara cerca de su residencia, lo cual se describe como el síndrome de “No en mi patio trasero” (NIMBY en inglés). Sin embargo, esta oposición se reduce cuando las personas están más preocupadas de los problemas ambientales. Algunas de las mitigaciones mencionadas son, que, al momento de seleccionar el lugar de la instalación, sea elegir lugares que no presenten un alto nivel de paisajismo, sobre todo si es en la costa. Además, las turbinas deberían tener 3 aspas, ya que, según un estudio, impacta menos a las personas que una con 2 aspas.

Otro de los impactos importantes es el llamado “parpadeo de la sombra” que se puede generar de dos formas. Una es las sombras móviles que se generan por el

movimiento de las aspas, que puede perturbar a los residentes que viven en el área, y la otra, es mediante el reflejo de la luz solar sobre el aerogenerador, causando “flashes” periódicos. Una forma de disminuir estos destellos es mediante el uso de materiales menos reflectivos en la turbina.

Cuando una planta eólica está dispuesta en el mar, esta genera turbiedad en el agua, además de introducir otros objetos en el suelo marino y de bloquear la luz solar en el agua, lo que puede dañar ciertas comunidades como los protozoos, que muestran menos crecimiento que otras comunidades bentónicas en los alrededores de la base de la turbina. En estos casos también se ven los impactos sonoros y visuales, que suelen ser más perjudiciales que en tierra, ya que presentan efectos negativos en los peces y otras especies marinas como delfines y ballenas, sobre todo durante la construcción y en menor medida durante la operación. Esto hace nuevamente necesario que se hagan los estudios correspondientes del lugar donde se va a disponer las plantas eólicas para minimizar el impacto en las especies marinas (Nazir et al., 2020). Mendecka y Lombardi (2019) en su revisión de 148 estudios sobre turbinas eólicas y aplicando un modelo de evaluación del ciclo de vida (LCA en inglés) para turbinas eólicas que permite hacer una buena estimación de los impactos ambientales que puede tener un aerogenerador en ciertas condiciones ambientales, destacan que las plantas eólicas dispuestas en el mar presentan un impacto general más grande que las que se encuentran en la tierra, esto principalmente porque las instalaciones en el mar requieren de una estructura más compleja, donde estas deben ser conectadas a sistemas de transmisión en tierra y además la construcción de la instalación presenta mayores complejidades operacionales y desafíos tecnológicos.

Finalmente, encontramos el impacto en el suelo y flora terrestre. En la construcción hay muchas actividades, como la excavación para las fundaciones de los aerogeneradores y

caminos, que afectan el sistema biológico local. La extracción de plantas puede generar que frente a lluvias irregulares se erosione el piso, además durante la construcción aguas residuales y aceites se filtren en la tierra generando problemas ambientales. Es importante que durante la construcción se traten de mitigar todas estas acciones, por ejemplo, en la guía de construcción de turbinas eólicas China sugieren que en las excavaciones se aplique el mayor esfuerzo posible para minimizar la intervención de maquinaria pesada que afecta directamente el balance ecológico local. Es importante también que, lo antes posible después de la construcción, se reforeste (Nazir et al., 2020).

5.4. Producción de Hidrógeno

Como ya se mencionó en el marco teórico, hoy las dos formas más comunes producción de hidrógeno es a través de la electrolisis del agua y el reformado de gas natural. Dentro de toda la retórica que hemos seguido en esta tesis sobre disminución de gases de efecto invernadero, es que se estudia la producción de hidrógeno a través de electrolisis y los posibles impactos ambientales asociados.

Debido a las distintas características de una planta de producción de hidrógeno por electrolisis, es que estas no presentan un gran potencial de impactos ambientales por si solas, si no que generalmente están asociadas a la forma de obtención de energía y a la forma de producción. Ozbilen et al. (2013) comenta que el 78% del impacto ambiental de la producción de hidrógeno mediante electrolisis en base a energía eólica corresponden a emisiones GWP (Potencial de Calentamiento Global en español) asociado con la producción y operación de la turbina eólica.

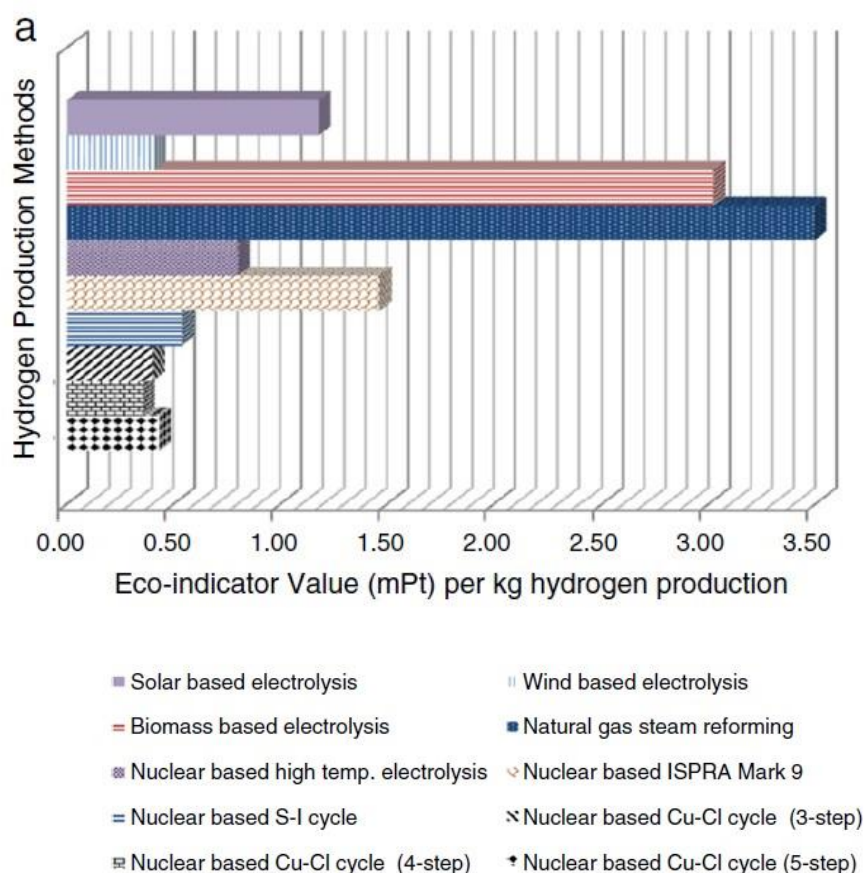
Ozbilen et al. (2013) hace una comparación de distintos métodos de producción de hidrógeno y su potencial de calentamiento global y acidificación. En sus resultados, las tecnologías basadas en energía nuclear son las que presentan los menores GWP junto con la

electrolisis basada en energía eólica (0.855 kg CO₂-eq por kg de hidrógeno producido). La electrolisis basada en energía solar presenta mayor valor que estos principalmente por la producción de los paneles. También se destaca que el reformado de gas natural es el que presenta mayores emisiones. Con respecto al potencial de acidificación (AP en inglés) la gasificación de biomasa es la que presenta los mayores valores y la electrolisis con energía eólica es la que presenta menor valor (2.58g SO₂-eq por kg de hidrógeno producido).

Para netear los impactos ambientales de las distintas tecnologías, Ozbilen et al. (2013) aplican el método “Eco-indicador 95”, el cual toma el valor característico (AP y GWP), la normalización y un factor de peso. Los resultados se pueden observar en la **Figura 10**, donde se concluye que el reformado del gas es el que más impactos genera y que las mejores tecnologías son las basadas en energía nuclear, sin embargo, la electrolisis en base a energía eólica se acerca bastante a los valores de estas últimas, por lo que se considera que es un método ambientalmente benigno.

Suleman et al. (2015) también hizo un estudio similar sobre las formas de producción de hidrógeno y los impactos ambientales asociados, pero se enfoca en la comparación de métodos de electrolización y el reformado de gas, además agregar otros impactos no mencionados por Ozbilen. Dentro de los métodos analizados están el reformado de gas, la electrolisis basada en combustibles fósiles con métodos de celdas de diafragma, de membrana y de mercurio y la electrolisis basada en energías renovables (solar y eólica). Cabe destacar que los autores no analizan la electrolisis del agua, si no que la electrolisis mediante salmuera.

Figura 10. Indicador ecológico en base a los impactos ambientales de las distintas tecnologías de producción de hidrógeno estudiadas.



Fuente: Ozbilen et al. (2013)

Las conclusiones del estudio demostraron que el reformado del gas es el que presenta el mayor agotamiento abiótico, es decir, el potencial de agotamiento de recursos naturales no vivos, con un 0.1309 kg Sb-eq. Los métodos de electrolisis por energía solar y eólica son los que presentan menor agotamiento abiótico con 0.0026 kg Sb-eq. y 0.0002 kg Sb-eq. respectivamente. Otra variable medida es la toxicidad en humanos, que se refiere a los efectos de sustancias toxicas en el ambiente humano. Aquí nuevamente es el reformado de gas el que presenta mayor valor, pero destaca en segundo lugar la energía solar fotovoltaica, que como se vio anteriormente, presenta materiales que pueden ser tóxicos en los paneles solares. La energía eólica es la que presenta el menor valor con 0.0782 kg

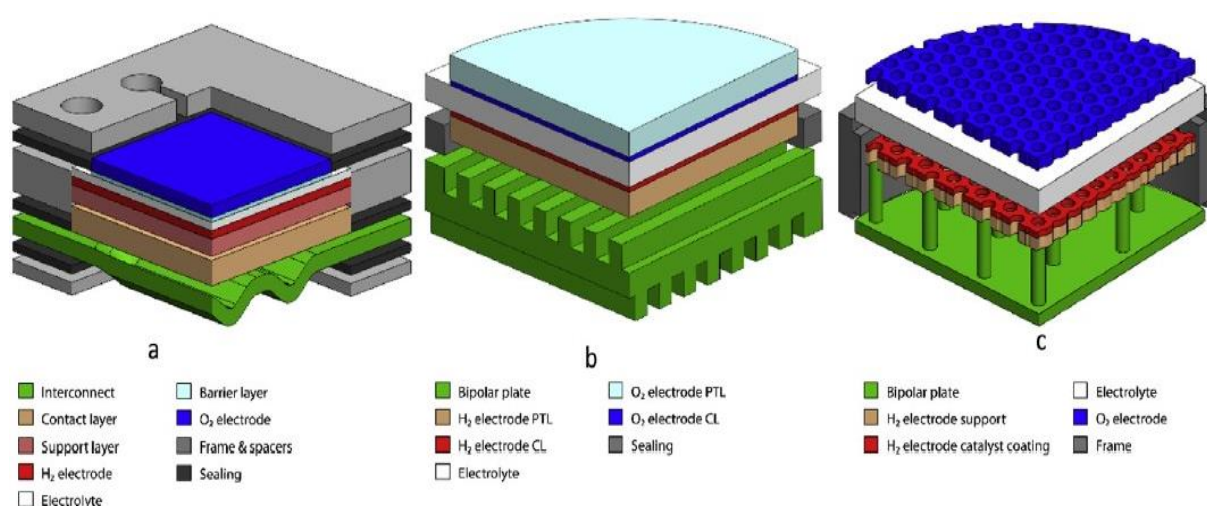
1,4DB-eq. Se concluye que las energías renovables son los que presentan los menores impactos ambientales versus los métodos que usan combustibles fósiles (Suleman et al., 2015).

Acar y Dincer (2014) hacen una comparación entre los distintos métodos de producción de hidrógeno a nivel de costos. Destacan que la producción de hidrógeno mediante electrolisis alimentada por energías renovables son las más caras comparadas con otras tecnologías como reformado de gas, termólisis por energía nuclear y biomasa con costos entre 7 y 9 USD\$/kg (Comparación en Anexo 2), sin embargo, las proyecciones del ministerio de energía (2020b) plantean que en Chile la producción tendrá un costo de 1,3 a 1,4 USD\$/kg. Además, a nivel global, se espera que la producción de hidrógeno por electrolisis disminuya sus costos en un 70% hacia la década del 2030, donde el costo nivelado de hidrógeno hoy cuesta entre USD\$4,78 y USD\$5,84 por kilogramo. Otras formas de producción también reducirán sus costos, por ejemplo, el reformado de gas podría alcanzar entre USD\$1.88 y USD\$2.3 por kg de H₂ y la gasificación de carbón entre USD\$2.02 y USD\$2.47 por kg de H₂ (Osman et al., 2021). Con respecto a los costos de capital, la electrolisis es la que necesita más financiamiento respecto de las otras tecnologías (Ver **Anexo 3**).

Enfocándose más específicamente en la electrólisis del agua, Zhao et al. (2020) hicieron un estudio y análisis de los principales impactos ambientales de 3 métodos de electrolisis de agua, caracterizados por el tipo de celda utilizada, siendo estas tecnologías la celda de electrólisis de óxido sólido (SOEC en inglés), la celda de electrólisis de membrana de electrolito de polímero (PEMEC en inglés) y celda de electrólisis alcalina (AEC en inglés). Estas tecnologías son muy diferentes en concepto y materiales, incluidas las diferencias en las especies iónicas conducidas y, por ende, en las reacciones específicas. Sin

embargo, las 3 presentan los componentes básicos principales, que son un electrolito responsable de la conductividad iónica, un electrodo de oxígeno, responsable de la reacción de evolución de oxígeno y un electrodo de hidrógeno responsable por la reacción de evolución de hidrógeno. En la **Figura 11** se puede visualizar la disposición de los principales componentes en cada tecnología.

Figura 11. Configuración simplificada de una unidad única de repetición de electrolisis usada en el análisis.



Nota: a) SOEC. b) PEMEC. c) AEC. Fuente Zhao et al. (2020)

Además de los componentes ya mencionados, se enlistan otros en el inventario de materiales usados para producir una unidad única de repetición, como son los interconectores y marcos, que, si bien se encuentran en los 3 tipos de células de electrolisis, son formados por distinta cantidad y tipos de materiales. Es importante destacar que el estudio de Zhao et al. (2020) se enfocan principalmente en analizar los impactos ambientales de este “stack” de componentes, y que otros componentes auxiliares como cañerías, acondicionamiento de combustibles y purificación son parte del balance de la planta (BOP en inglés) el cual se analiza por separado.

Zhao et al. (2020) considera 16 categorías de impacto ambiental en las cuales basan su análisis. El impacto total producido por el stack de electrolisis según cada categoría se muestra en la **Tabla 4**:

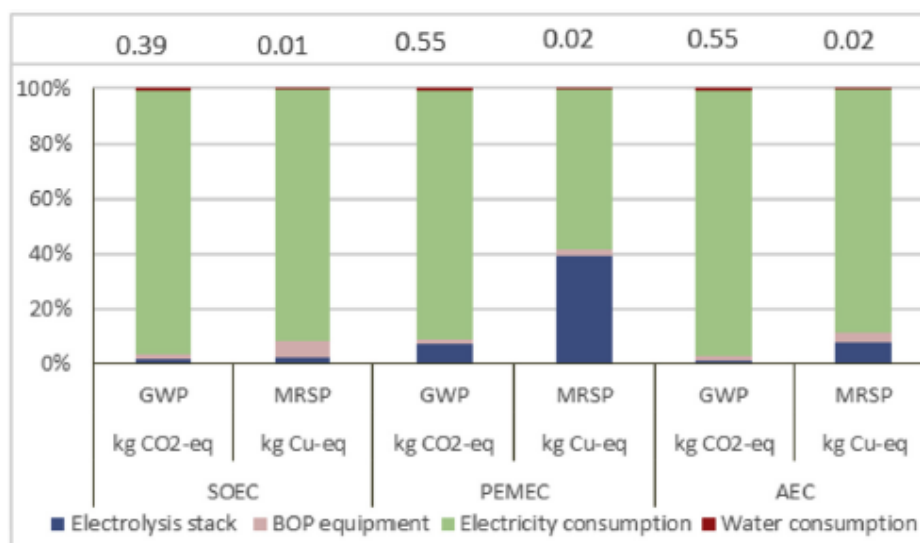
Tabla 4. Impacto total producido por el stack de electrolisis para cada categoría en las 3 tecnologías.

Impact category	Abbreviate	Unit	Functional unit (m ²)			Alternative functional unit (kg)		
			SOEC	PEMEC	AEC	SOEC	PEMEC	AEC
Climate change	GWP	kg CO ₂ -eq	1.1E2	1.8 E3	2.0E2	50.0	72	9.3
Ozone depletion	ODP	kg CFC11-eq	1.0E-4	2.0E-3	1.0E-4	3.0E-05	8.0E-05	8.0E-06
Ionizing radiation	IRP	kBq Co-60-eq	8.3	85	6.6	2.9	3.5	0.5
Ozone formation, human health	HOFp	kg NO _x	0.6	6.7	0.5	0.2	0.3	0.0
Ozone formation, terrestrial ecosystem	TOFP	kg NO _x	6.9	38	5.3	2.4	1.5	0.4
Particulate matter formation	PMFP	kg PM _{2.5} -eq	0.7	6.7	0.5	0.2	0.3	0.0
Terrestrial acidification	TAP	kg SO ₂ -eq	23	1.3E2	18	8.1	5.2	1.4
Freshwater eutrophication	FEP	kg P-eq	0.3	4.6	0.2	0.1	0.2	0.0
Marine eutrophication	MEP	kg N-eq	0.03	0.1	0.01	0.0	0.0	0.0
Terrestrial ecotoxicity	TETP	kg 1,4-DCB-eq	5.4E3	8.2E3	4.1E3	1.9E3	3.3E2	3.3E2
Freshwater ecotoxicity	FETP	kg 1,4-DCB-eq	55	8.8E2	40	19	36	3.3
Marine ecotoxicity	METP	kg 1,4-DCB-eq	77	1.2E3	57	27	49	4.7
Human carcinogenic toxicity	HTPc	kg 1,4-DCB-eq	21	2.3E2	16	7.3	9.2	1.3
Human non-carcinogenic toxicity	HTPnc	kg 1,4-DCB-eq	1.8E3	2.9E4	1.3E3	6.2E2	1.2E3	1.1E2
Mineral resource scarcity	MRSP	kg Cu-eq	6.5	4.6E2	23	11	21	1.9
Fossil resource scarcity	FRSP	kg oil-eq]	35	4.3E2	29	12	17	2.4

Fuente: Zhao et al. (2020)

En primer lugar, Zhao et al. (2020) hacen un análisis sobre los impactos generales en la producción de hidrógeno, lo cual incluye el equipamiento BOP, el consumo de energía y de agua, además del stack de electrolisis. De este análisis se concluye que, para los 3 tipos de tecnología, SOEC, PEMEC y AEC, el consumo de electricidad es el que más contribuye a los impactos generales, aportando 95%, 90% y 96% de los impactos de GWP y 92%, 58% y 88% de los impactos de escasez de fuentes minerales (MRSP en inglés) respectivamente. Estos resultados se pueden ver en la **Figura 12** y es importante destacar que en este caso se consideró que la electricidad proviene de un aerogenerador de 3 MW.

Figura 12. Porcentaje de aporte a las emisiones generales de GWP y MRSP de la electrolisis para cada tecnología.



Fuente: Zhao et al. (2020)

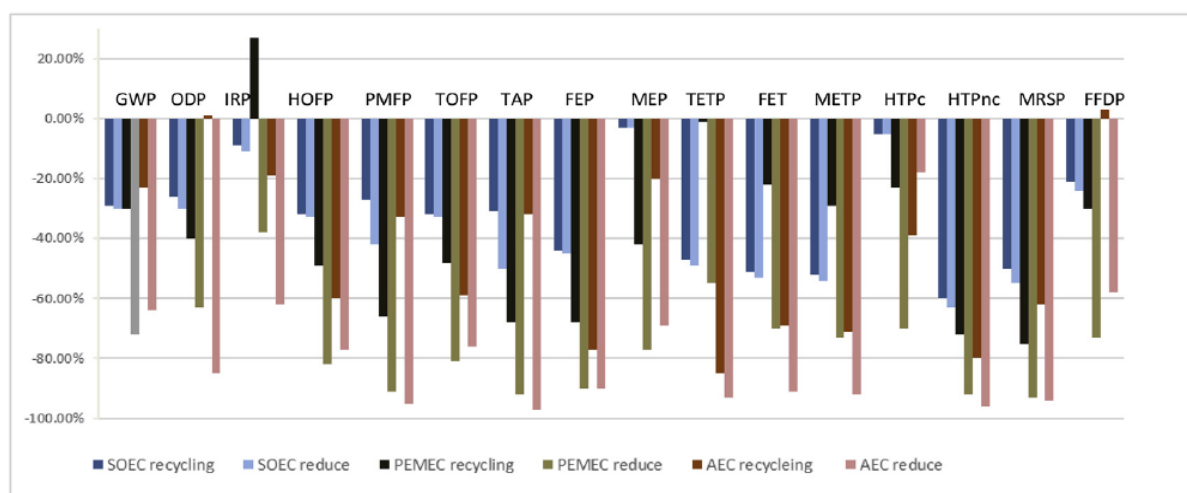
Con respecto al stack de electrolisis se concluye que los resultados entregados en evaluación de los impactos del ciclo de vida muestran que la tecnología PEMEC tiene el mayor potencial de impacto ambiental en las 16 categorías investigadas. Para el GWP, los impactos del PEMEC son alrededor de 16 veces más altos que el de SOEC y 15 veces más altos que el de AEC. Para MRSP, los impactos de PEMEC son alrededor de 76 veces más altos que los de SOEC y 22 veces más altos que los de AEC. El análisis también demostró que para el stack SOEC, los interconectores causan el mayor impacto en 16 categorías, seguidas por los electrodos de hidrógeno y de oxígeno, lo cual es principalmente debido a la gran cantidad de acero inoxidable y níquel usado en estos tres componentes. En el stack de PEMEC, el electrodo de oxígeno y el interconector representan más del 85% en 15 de las 16 categorías de impactos, principalmente debido al uso de recubrimientos de platino protector y catalizadores de iridio. La excepción fue el agotamiento de ozono, donde el electrolito de membrana fluorado contribuye sustancialmente en comparación a las otras

categorías. Para el stack de AEC, el interconector es el que más contribuye a los impactos de las 16 categorías, debido a la fracción de níquel, seguido por los electrodos de hidrógeno y oxígeno que también son hechos principalmente de níquel (Zhao et al., 2020)

Dentro de las posibles mitigaciones, Zhao et al. (2020) menciona que para reducir el impacto ambiental se puede reducir el consumo de metales claves, sea reciclando, reduciendo la cantidad usada o encontrando materiales sustitutos. Los autores realizan un caso de las potenciales reducciones de las 16 categorías de impactos al aplicar reciclaje y reducción del uso de materiales. Para simplificarlo se aplican varios supuestos, uno de ellos es el reciclaje ideal, donde para SOEC se asume un reciclaje de 100% para acero inoxidable y níquel, para PEMEC se asume un 100% de reciclaje del platino e iridio y para AEC se asume un 100% de reciclaje del níquel. Con respecto a la reducción de uso de materiales dan algunos ejemplos como que la capa de soporte en SOEC se puede reducir de 300 micrómetros a 200 micrómetros con una potencial reducción de 33% de níquel, o que para PEMEC se puede reducir de 2 mg/cm² a 0.5 mg/cm² en el electrodo de oxígeno. Estas reducciones si bien no afectan mucho la eficiencia, si pueden reducir la durabilidad y robustes a largo plazo.

De este caso se puede observar que por ejemplo para el GWP se reduce en 29%, 30% y 22% para SOEC, PEMEC y AEC respectivamente, solo considerando el reciclaje. En el mismo orden, se ve una reducción del 50%, 75% y 62% de reducción en MRSP. Con respecto a la reducción en el uso de materiales, para GWP se ve una reducción de 31%, 72% y 64% para SOEC, PEMEC y AEC, mientras que las reducciones de MRSP llegan a 55%, 93% y 94% respectivamente. Estas reducciones se pueden ver gráficamente en la **Figura 13** a continuación.

Figura 13. Reducciones en las 16 categorías de impactos ambientales al aplicar reciclaje y reducción de materiales al caso base.



Fuente: Zhao et al. (2020)

Hay que destacar que los valores de reducción conseguidos dependen fuertemente del caso que se está analizando y de los supuestos tomados. A pesar de que los procesos de reciclaje pueden disminuir considerablemente los impactos ambientales generales, el realizarlo también requiere de grandes cantidades de energía. Metales de gran valor como el platino, iridio y níquel pueden ser recuperados, pero debido a que la ruta de reciclaje a nivel industrial todavía no se ha establecido claramente, los potenciales impactos de reciclar todavía no son bastante conocidos. Además, todavía no existen sistemas de reciclaje de los metales escasos usados en la electrolisis del agua, por lo que una “economía circular” de los materiales no se puede esperar aun y hace necesario que aumenten las investigaciones y mejoras en los procesos tanto de reciclaje como en el de producción comercial de los stacks (Zhao et al., 2020).

Schmidt et al. (2017) hicieron un estudio de los futuros costos y performance de estos tres tipos de celdas de electrolisis, basado en información entregada por expertos en el área. En primer lugar, se destaca que la tecnología predominante para la década del 2020

será AEC, pero que se ira transformando hacia PEMEC para la década del 2030, donde esta última será la preferencia. Esto está restringido a que haya un desarrollo en la experiencia de operación y manufactura. En términos de costos de capital, para el 2020, AEC varía entre 800 y 1300 euros por kW instalado. Para PEMEC varía entre 1000 y 1950 euros por kW instalado y para SOEC varía entre 3000 y 5000 euros por kW instalado. Para el año 2030 se estima que los costos de capital para AEC varíen entre 700 a 1000 euro/kW, para PEMEC varíen entre 850 y 1650 euros/kW y para SOEC varíen entre 1050 y 4250 euros/kW. Esta disminución aumenta si además de los avances en I+D se considera un aumento en economías de escala, donde para las tres tecnologías se pueden ver disminuciones entre 23% y 27% para el año 2030.

5.5. Almacenamiento y Distribución

Como se vio en el marco teórico, existen varios métodos para almacenar el hidrógeno, y dependiendo de este método es el tipo de transporte y distribución que tendrá. Al ser dos tópicos directamente relacionados, es necesario hacer un análisis conjunto. Como se ha visto en puntos anteriores, no son muchos los impactos directos que presentan las formas de almacenaje y transporte del hidrógeno, y se pueden ligar más que nada al uso de energía en los procesos.

Niermann et al. (2021) hacen un estudio energético y económico enfocado principalmente en los portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHC en inglés), pero comparándolo con otros tipos de almacenamiento y transporte para identificar la mejor opción. El estudio considera desde la generación de energía para producir el hidrógeno, hasta dejar el hidrógeno listo para su uso. Se uso una base equitativa donde la generación eléctrica está dada por energías renovables (hibrido entre solar y eólica) y la producción por electrolisis. En **Anexo 4** se puede observar las distintas cadenas de suministro de hidrógeno

que se evaluaron en el estudio.

Las principales conclusiones a las que llegaron Niermann et al. (2021) se exponen a continuación:

- Para transporte a grandes distancias, el LOHC con metanol es el que presenta más ventajas económicas y energéticas. El dibenciltolueno y el tolueno también son superiores a otros métodos en largas distancias siempre y cuando el calor necesario para la deshidrogenación sea entregado externamente.
- Para cortas distancias, el transporte de hidrógeno comprimido por tuberías y la producción/uso in situ de hidrógeno para electricidad son las más eficientes, con el supuesto de que la deshidrogenación de LOHC es generada por calor externo.
- Para largas distancias, y desde la vista de costos, el LOHC y la licuefacción del hidrógeno son las mejores alternativas gracias a que pueden ser transportados en barcos y camiones, sin embargo, la licuefacción presenta muchas pérdidas tanto en el almacenamiento (tanques criogénicos) como en el transporte debido a la ebullición, por lo que se presenta como una opción solo si estas pérdidas son reducidas considerablemente.
- El hidrógeno comprimido y transportado por cañerías es una opción válida, siempre que se combine con almacenamiento en cavernas.

De esta manera, la opción que más ventajas presenta para la exportación e importación de hidrógeno es LOHC con metanol, y bajo el supuesto de que se usa calor residual para la deshidrogenación, dibenciltolueno y tolueno también son opciones válidas. En el **Anexo 5** se pueden ver los costos asociados a cada tipo de almacenamiento y

distribución, destacando como los más bajos el hidrógeno presurizado transportado en tuberías (9.5 euros/kgH₂) y camiones (9.5 euros/kgH₂) y el hidrógeno LOHC con metanol (9.9 euros/kgH₂) (Niermann et al., 2021). Sin embargo, como ya se mencionó, este estudio está enfocado principalmente en la eficiencia económica y energética, y no presenta consideraciones ambientales.

Wulf et al. (2018) realizaron un análisis ambiental del ciclo de vida para tres opciones de almacenamiento y transporte de hidrógeno, basándose en las cadenas de suministro más costo-óptimas, siendo estas opciones:

1. Electrolisis – Hidrógeno presurizado almacenado en cavernas – transporte en cañerías. – Estación de combustible
2. Electrolisis – Hidrógeno presurizado almacenado en cavernas – transporte en camiones. – Estación de combustible
3. Electrolisis – LOHC almacenado en tanques – transporte en camiones. – Estación de combustible

En este estudio se asumió la generación de hidrógeno mediante electrolisis alcalina alimentado por energía eólica y para la evaluación ambiental del ciclo de vida se tomó como base las rutas entregadas por la ISO 14040 y 14044. En el **Anexo 6** se puede observar las categorías de los impactos ambientales considerados en el estudio.

A partir de los resultados entregados del análisis de 7 diferentes rutas agrupadas en 3 casos diferentes (10 toneladas/día – 400 km, 40 toneladas/día - 100 km y 80 toneladas/día – 400 km) se llega a las siguientes conclusiones. Cada camino presenta al menos 1 categoría en la que es peor que los otros, sin embargo, el transporte por cañerías se presenta como el más favorable mostrando mejores resultados en 11 de las 14 categorías. Se destaca que análisis económicos muestran a LOHC como una preferencia para transporte y

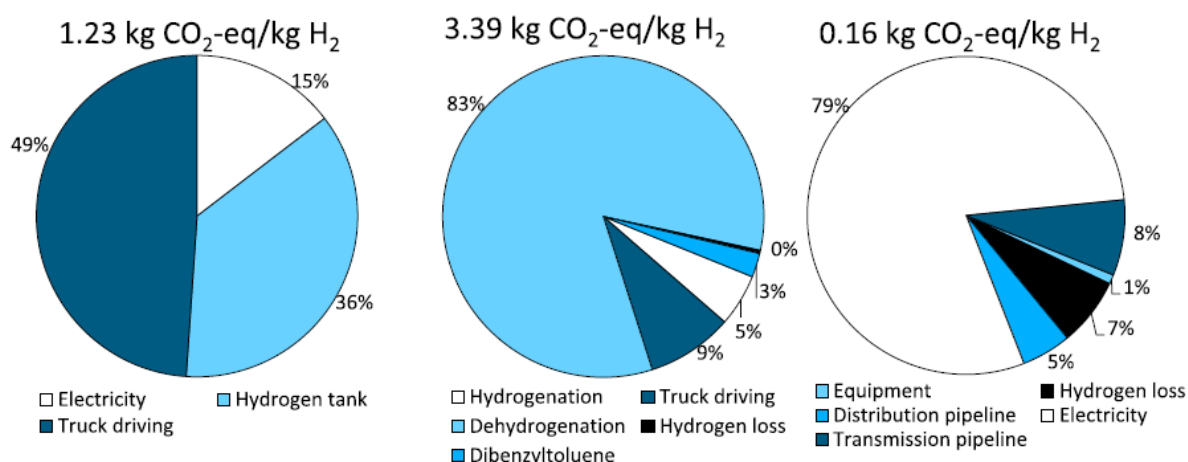
almacenamiento, sin embargo, LOHC “pierde” en 7 de los 14 impactos ambientales comparados con el transporte de hidrógeno presurizado en camiones y “gana” desde el aspecto económico cuando aumentan las distancias. Entre la comparación de los restantes, el transporte por cañerías es sin duda la ruta más favorable ambientalmente. Las cañerías, con un gran potencial de escalamiento ofrecen más compatibilidad ambiental debido al menor uso de energía (Wulf et al., 2018).

En la **Figura 14** podemos ver el porcentaje en que se reparten los impactos para cada una de las rutas analizadas. LOHC tiene el escenario más desfavorable respecto al cambio climático. Esto también se cumple para las categorías de acidificación, escases de recursos y eutroficación de agua dulce. La generación de calor para la deshidrogenación presenta una gran importancia respecto de la categoría cambio climático (83%), y en parte también para la acidificación donde este proceso representa el 49% de las emisiones. La eutroficación de agua dulce se ve afectada por la producción de dibenciltolueno y su necesidad adicional de electricidad. Algunas categorías como la “toxicidad en humanos – cáncer” presentan malos resultados para el uso de cañerías, donde la construcción es responsable del 85% de los impactos en el transporte, principalmente debido a la producción de acero de la cañería, sin embargo, para el caso de 10 t/d sigue siendo la mejor opción.

Con respecto a los casos restantes, la cañería se vuelve a consolidar como la mejor opción. En la **Figura 15** se pueden ver los impactos de algunas categorías para el caso 80 t/d. El transporte por cañerías es la mejor opción en las categorías de cambio climático, radiación ionizante en humanos y ecosistemas, eutroficación terrestre y marina, acidificación, toxicidad en humanos-no cancer, agotamiento de ozono, material particulado, creación fotoquímica de ozono y ecotoxicidad de agua dulce. LOHC, a pesar de ser la

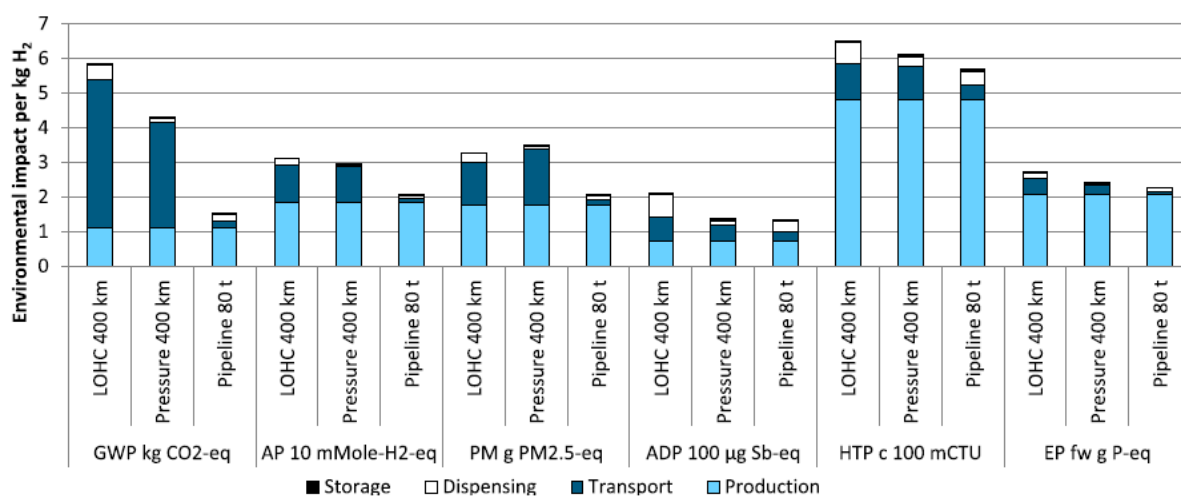
mejor opción en función de los costos, siempre es la peor opción para el transporte de hidrógeno a nivel ambiental.

Figura 14. Resultados de los impactos en la categoría “Cambio climático” para transporte sobre los 100 kilómetros.



Nota: A la izquierda para tanques presurizados, al centro para LOHC y a la derecha para cañerías. Fuente: Wulf et al. (2018)

Figura 15. Impactos ambientales de 6 categorías para una producción de 80 toneladas y 400 kilómetros de distancia de transporte.



Fuente: Wulf et al. (2018)

5.6. Uso del hidrógeno

El hidrógeno hoy se usa principalmente en el refinado del petróleo, producción de amoníaco y en menor medida en refinado de metales como níquel, tungsteno, molibdeno, cobre, zinc, uranio y plomo. Sin embargo, se espera que en el futuro se extienda su uso a muchas aplicaciones, tanto industriales como domésticas y también como remplazo en casi todas las aplicaciones donde se usan combustibles fósiles. Algunas de estas aplicaciones son para generación eléctrica, combustible para automóviles, industrias generadoras de hidrógeno, aviones, y calefacción doméstica. (Sharma & Ghoshal, 2015).

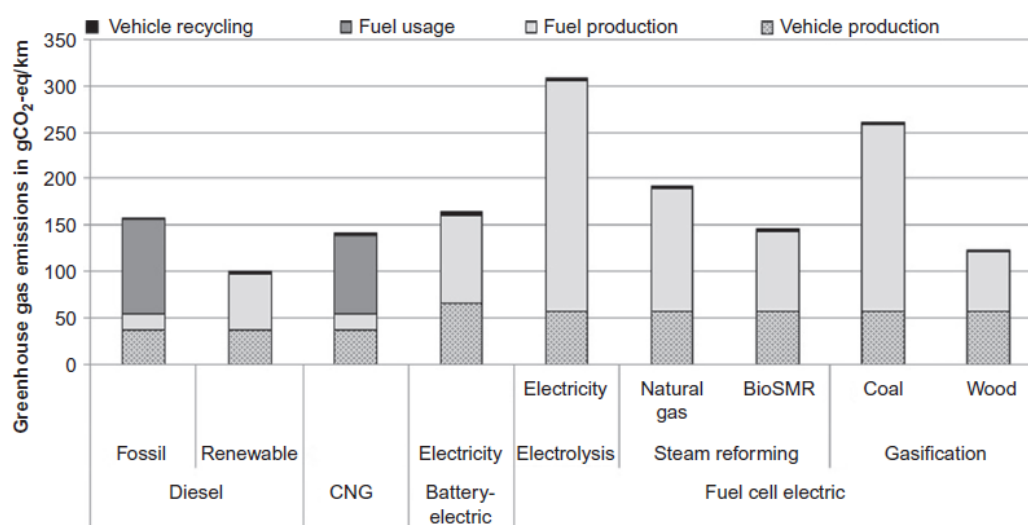
El Ministerio de Energía (2020b) en la estrategia nacional de hidrógeno verde de Chile expone que desde el 2030 en adelante empezara a crecer el mercado de hidrógeno para las nuevas aplicaciones, donde los primeros pasos se verán en la producción local de amoníaco y en el reemplazo del hidrógeno gris utilizado en las refinerías del país, para luego en los años siguientes expandirse al transporte y otros usos. Es debido a esto que todavía no existe una gran cantidad de estudios en los que se exprese los impactos ambientales de los usos de hidrógeno y las que hay son generalmente teóricos, pero de todas formas es importante analizarlos.

Wulf y Kaltschmitt (2016) hicieron un análisis de los impactos ambientales del ciclo de vida para distintos vehículos, incluyendo vehículos en base a hidrógeno, electricidad, diésel, biodiesel y gas natural. Como es un análisis del ciclo de vida, se considera desde los materiales necesarios para la construcción del vehículo hasta su uso con los combustibles mencionados. En el estudio se consideró los impactos ambientales a nivel de acidificación y emisiones de gases de efecto invernadero (GHG en inglés).

En primer lugar y con respecto a los GHG se obtuvieron los resultados expuestos en la **Figura 16**. Se observa que el biodiesel es el que presenta las menores emisiones, pero

este se debe principalmente a que la producción de un vehículo con celdas de combustible presenta más emisiones que la producción de un vehículo convencional. Los vehículos eléctricos y de celdas de combustible requieren materiales que usan mucha energía en su producción. La electrolisis es el que presenta mayores emisiones de GHG, que están ligadas principalmente a los requerimientos energéticos para hacer funcionar el electrolizador. A pesar de las altas emisiones generales de los vehículos con celdas de combustible y baterías, se observa que en cuanto al uso del combustible las emisiones son casi insignificantes (Wulf & Kaltschmitt, 2016).

Figura 16. Emisiones GHG para los distintos vehículos analizados.

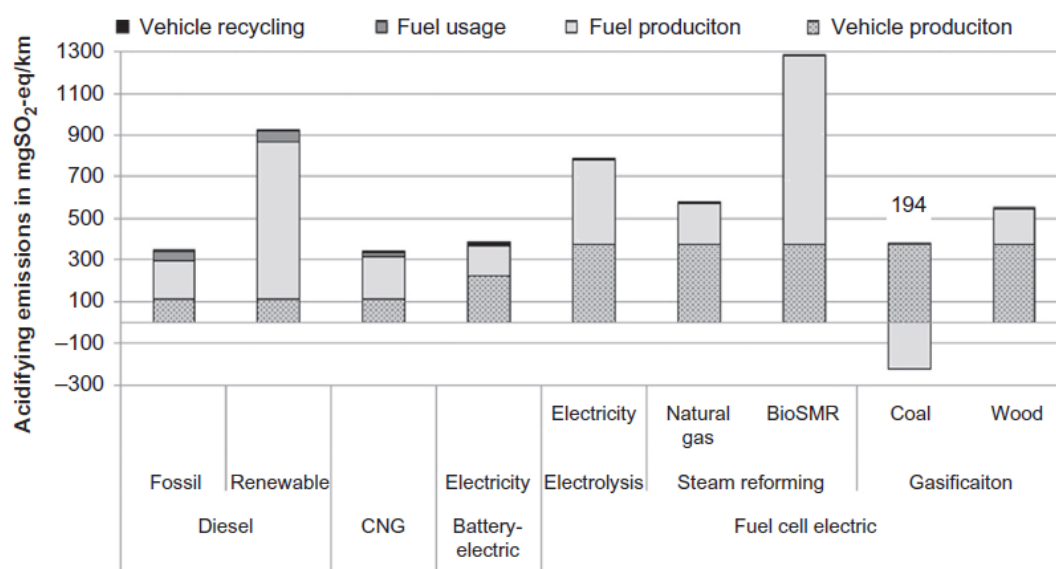


Fuente Wulf y Kaltschmitt (2016)

Con respecto a la acidificación se obtuvieron los resultados expuestos en la **Figura 17**. Se observa que para los vehículos con celdas de combustible nuevamente poseen altas emisiones de acidificación, excepto la gasificación de carbón que presenta un sistema de captura de azufre, que se debe principalmente a la minería del platino necesario para la producción de celdas de combustible. La electrolisis nuevamente depende sus emisiones principalmente de la producción de energía y del uso de níquel en el electrolizador.

Es importante destacar que en este estudio se utilizó como base las proporciones de la matriz energética de la unión europea del año 2011, donde solo un 21% corresponden a energías renovables, lo que explica en mayor medida el alto nivel de impactos ambientales de la electrolisis debido al uso intensivo de energía para la producción del combustible y que debería reducir considerablemente sus emisiones al aumentar este porcentaje de energías renovables o al dedicarlas solo a la producción de hidrógeno por electrolisis (Wulf & Kaltschmitt, 2016).

Figura 17. Emisiones de acidificación para los distintos vehículos analizados.



Fuente Wulf y Kaltschmitt (2016)

Osman et al. (2021) hacen una revisión general de los distintos usos y potenciales usos que tiene el hidrógeno en distintas industrias. Las mayores emisiones de dióxido de carbono globalmente son debido al consumo de energía, dado principalmente por la quema de combustibles fósiles. El hidrógeno se presenta como una alternativa válida en el remplazo del gas natural, participando directamente en la descarbonización debido a la naturaleza de su reacción (no genera polución) siempre que su producción venga de

energías renovables (hoy cerca del 96% del hidrógeno es producido por carbón, aceites pesados y gas natural). El hidrógeno se ve como una opción válida como remplazo del gas natural en las turbinas de gas, donde su uso en sistemas de calefacción central presenta varias ventajas, como una actividad operacional similar y mayores rangos de generación de calor con mínimas emisiones dañinas. Una consideración que se debe tomar en cuenta del hidrógeno es que debido a su velocidad de combustión hay más riesgos de combustión incompleta y sobrecalentamiento del quemador, por lo que las tecnologías del quemador deben ser especializadas para evitar estos problemas.

Con respecto a la generación eléctrica, el hidrógeno se presenta como una buena opción de balance entre la demanda y producción que puedan generar las energías renovables. Estas últimas suelen ser más estacionales y presentar variaciones que el hidrógeno puede cubrir. Los problemas de almacenamiento de las energías renovables se pueden traspasar a la producción de hidrógeno por electrolisis para así poder almacenarlas de manera eficiente, ya que las baterías generalmente tienen menor capacidad y tiempo de almacenamiento. Hay varias plantas de energías renovables que están aplicando este sistema, tanto para generar hidrógeno con la energía residual de las generaciones renovables o para directamente almacenarla en hidrógeno. Otra opción que se ha aplicado en algunas plantas es la de producir el hidrógeno y convertirlo en metano mediante el proceso de metanización para luego inyectarlas en los sistemas de distribución de gas (Osman et al., 2021).

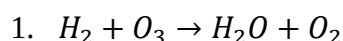
Las celdas de combustible se han destacado por su generación de energía, pero también se ha avanzado su uso como portadores de energía. Hay varios tipos de celdas de combustible, como la alcalina, carbón directo, metanol directo, entre otros, y su uso principal está en vehículos. Se espera que a nivel global el aumento en ventas de vehículos

con celda de combustible para hidrógeno sea de 3% para el 2030 y de 36% para el 2050. Los vehículos de hidrógeno pueden ser conducidos con hidrógeno líquido o presurizado, siendo este último el más común. Hay varias marcas como Toyota, Hyundai y Honda que ya se han aventurado con vehículos en base a celdas de hidrógeno. Con respecto a otros vehículos, se espera que el 30% de las flotas de trenes en base a diésel se transformen a celdas de hidrógeno en el mediano plazo y que el petróleo (kerosene) usado en aviones puede ser reemplazado por hidrógeno líquido, ya que, además de la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero, los aviones en base a hidrógeno presentan menores costos de mantención, mayor vida útil de los motores, mayor contenido de energía y mejor combustión. Esto último siempre y cuando se tenga la tecnología correcta y los cuidados especiales para atender la alta inflamabilidad y la combustión incompleta. El hidrógeno también se presenta como un remplazo de los combustibles fósiles utilizados en barcos, entre otras opciones como propano o biocombustible, que puede ser usado directamente en la combustión interna de motores o a través de celdas de combustible. Hay varios estudios que afirman que el uso de celdas satisface los requerimientos de transporte de los barcos en largas distancias, incluidos los requerimientos internos, a diferencia de las baterías. Además, presenta ventajas en cuanto a seguridad, durabilidad y capacidad de almacenamiento en barcos, a pesar de que algunos reportan que el gas natural es la mejor opción (Osman et al., 2021).

El hidrógeno también puede ser utilizado para la producción de combustibles e hidrocarburos y en el refinado de petróleo crudo y productos del petróleo a través del hidroprocesamiento que captura diferentes heteroátomos del petróleo como el nitrógeno, azufre, oxígeno y metales pesados. También es usado en la producción de amoníaco mediante la síntesis de amoníaco donde se realiza una reacción catalítica entre el hidrógeno y elementos

de nitrógeno mediante el proceso “Haber”. El amoniaco es usado principalmente en la industria agrícola como fertilizante, pero tiene otras aplicaciones industriales. Actualmente el hidrógeno utilizado para producir amoniaco es producido mediante la reformación del gas, por lo que tiene asociadas muchas emisiones que se pueden reducir si se obtiene mediante electrolisis y energías renovables (Osman et al., 2021).

Hay un punto importante que aún muy pocos estudios han tocado, que tiene que ver con la liberación de hidrógeno en el ambiente. Qadrdan et al. (2008) hacen una buena introducción en su estudio de las mejores rutas para el sistema de suministro de hidrógeno donde habla sobre como la molécula del hidrógeno puede influir en el agotamiento del ozono, que trae como consecuencia cambios en la temperatura de la estratosfera y cambios en los ciclos de los hidruros. Al usar hidrógeno hay fugas no intencionales, que principalmente se dan en los almacenamientos de hidrógeno líquido, en el aire de la troposfera. Una parte de este reacciona con moléculas de OH y la otra sube hasta la estratosfera, donde la oxidación del hidrógeno produce la generación de vapor de agua que humedece la estratosfera y promueve el ciclo H_2O/O_3 , el cual consiste a grandes rasgos y después de varias reacciones, en la descomposición del ozono en moléculas de oxígeno. A pesar de que el hidrógeno por sí solo no afecta al ozono, una simplificación del agotamiento de ozono debido al hidrógeno se puede expresar en la siguiente ecuación:



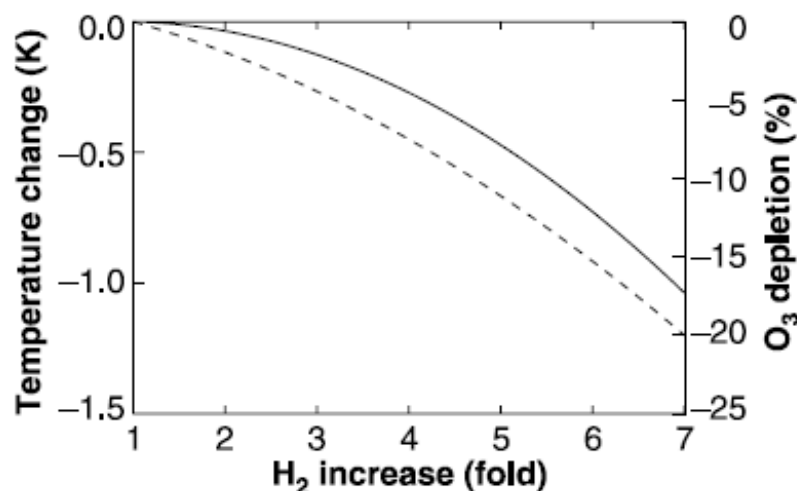
Tromp et al. (2003) hicieron un estudio específico sobre este problema. En ese momento el tópico “hidrógeno” todavía no estaba tan avanzado como hoy, por lo que parten comentando que es posible que no haya emisiones si se hacen muchos esfuerzos respecto de las fugas en distintas fases, pero lo más probable, y basándose en los casos del gas natural y otros volátiles, es que haya perdidas en la producción, almacenamiento y

transporte de entre 10 y 20%, lo cual resulta certero a los valores de hoy. Al igual que Qadrdan y otros, hace referencia a que el hidrógeno que pasa de la troposfera a la estratosfera es una fuente de vapor de agua (H_2O), que puede contribuir al enfriamiento de la estratosfera y al agotamiento del ozono.

En el estudio parten con un modelo en el que se consideran dos casos, uno con las concentraciones a esa fecha de hidrógeno y metano (CH_4) y otro donde se aumenta en 4 veces la cantidad de hidrógeno (2.3 ppm) en la superficie terrestre. Este modelo demuestra, por una parte, la relación del hidrógeno y metano para la creación de agua en la parte baja de la estratosfera, y por otra, como el H_2O aumenta a mayor altitud gracias a la oxidación del hidrógeno. Luego, basado en los resultados del modelo al aumentar las concentraciones de hidrógeno, la cantidad de agua en la estratosfera aumenta en menos de 1%. Sin embargo, y a pesar de lo baja que parece esta variación, puede traer consecuencias indirectas severas incluyendo el enfriamiento de la estratosfera. Temperaturas menores pueden incentivar la creación de más nubes estratosféricas polares, que retrasan el rompimiento de los vórtices polares que trae como consecuencia aumentar los agujeros del ozono. Esta serie de causas y efectos son explicados con un ejemplo numérico: Un incremento en 0,5 ppm en el agua estratosférica puede enfriarla en $0,5^\circ\text{C}$. Esto basado en data de reanálisis de la climatología de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental, aumentaría los vórtices polares norte y sur en 7% y 4% respectivamente, aumentando de 5 a 8 días la duración de los vórtices polares lo que trae como consecuencia final el agotamiento de ozono de 5 a 8% en la región polar norte y un 3 a 7% en la región polar sur. Las emisiones antropogénicas de H_2 según los resultados del modelo, podrían retrasar la recuperación del ozono generada por la regulación de los clorofluorocarbonos, sin embargo, este impacto se deberá paralelar dependiendo de cómo se encuentre la situación de los clorofluorocarbonos desde la fecha

del estudio (2003) hasta 20 y 50 años después (Tromp et al., 2003). En la **Figura 18** se puede observar las predicciones de agotamiento de ozono.

Figura 18. Agotamiento de ozono para el modelo estudiado según el hidrógeno emitido.



Nota: La línea sólida corresponde a los cambios de temperatura en la estratosfera baja y la línea punteada corresponde al máximo agotamiento de ozono causado por el aumento de H_2O . Fuente: Tromp et al. (2003)

Dentro de las conclusiones de Tromp et al. (2003) se encuentra que, a la fecha de este, todavía hay muchas incertezas de las tecnologías que se usaran para la cadena del hidrógeno, por lo que hace falta más investigaciones al respecto. Además, enumeran otros impactos que estaban fuera del foco del estudio, pero que son importantes de destacar

- El modelo predice que un aumento de hidrógeno en la superficie hará que la concentración de OH en la troposfera disminuya en 7% y aumente en 10% en la estratosfera. Estos cambios afectarán los ciclos de vida de otros gases residuales como metano y monóxido de carbono.
- Un aumento del H_2O en la mesosfera, derivado del hidrógeno, puede incurrir en aumentos de nubes noctiluentes, que tiene potenciales impactos en el

albedo de la tierra (porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella) y en la química de la mesosfera.

- Debido a que el hidrógeno es nutriente de microbios, el aumento de H₂ en los suelos naturales pueden tener efectos imprevistos en las comunidades microbianas.

5.7. Clasificación de Impactos y Mitigaciones

A continuación, se presenta una tabla que sintetiza y clasifica los impactos y mitigaciones estudiados, dando un grado de importancia a la mitigación en cuanto a su capacidad de disminuir el impacto y las posibles barreras que se pueden presentar para su implementación.

Tabla 5. Resumen de los impactos y mitigaciones estudiados en esta investigación.

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Desalinización	Sistema de captación de agua	Atrapamiento y arrastre de organismos "grandes"	Tecnológica	Instalación de mallas o pantallas de alambre en la captura de agua.	Medio. Evita el ingreso de organismos grandes al sistema, pero puede incurrir en el atrapamiento de organismos de menor tamaño en la malla.	Sin barreras considerables

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Desalinización	Sistema de captación de agua	Atrapamiento y arrastre de organismos "grandes"	Tecnológica	Luces estroboscópicas, generadores de sonido o cortinas de burbujas para advertir a los organismos.	Bajo. Estos 3 métodos son efectivos solo para algunos tipos de especies.	Luces y generadores de sonido requieren instalación eléctrica y cortinas de burbujas un sistema de bombeo de aire hasta la zona de captura
		Atrapamiento y arrastre de organismos "pequeños"	Tecnológica	Instalación de capturas de velocidad, que presentan una menor velocidad de absorción de agua.	Medio. Disminuye el atrapamiento y arrastre de organismos que presentan poca movilidad.	Prediseño específico del sistema de captura.
		Absorción general	Tecnológica	Instalación de sistemas de colección y retorno para las especies marinas que hayan logrado pasar las barreras de la captura.	Bajo. Permite la devolución de especies absorbidas, pero no asegura que estos no mueran en la captura	Intervención directa en el sistema de captura y necesita una instalación extra para devolver los organismos al mar.
			Investigación	Estudios ecológicos de la zona potencial de instalación. Deben ser a largo plazo para identificar la variabilidad de las comunidades marinas por temporadas.	Alto. La correcta selección de zonas de extracción puede disminuir considerablemente los efectos de arrastre y atrapamiento.	Aumenta el valor de inversión inicial del proyecto debido a la extensión de las investigaciones necesarias.

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Desalinización	Sistema de captación de agua	Absorción general	I+D	Estudios de instalación de sistemas de captación de subsuperficie.	Alto. Este sistema elimina por completo los efectos de atrapamiento y arrastre.	Estos sistemas dependen mucho de la ubicación de la planta desalinizadora y de la geología del lugar.
		Reducción de biomas marinos	Tecnológica	Creación de hábitats y restauración y reabastecimiento de especies marinas críticas.	Medio. Ayuda a recuperar los biomas marinos que se han perdido a causa de la operación de la planta.	Requiere de un sistema de monitoreo constante.
	Operación	Uso de energía	Tecnológica	Uso de osmosis inversa para obtener el agua desalada.	Alto. La osmosis inversa es la que presenta el menor requerimiento energético de las tecnologías actuales y tiene asociados menos impactos ambientales.	Requiere una gran cantidad de energía eléctrica que debe provenir de energías renovables para que sea amigable ambientalmente.
	Descarga de salmuera	Aumento de salinidad en la zona de descarga	Tecnológica	Instalación de difusores multipuerto que ayudan a disolver la salmuera.	Alto. Los difusores ayudan a que los vertidos de salmuera no queden depositados en el fondo marino y tengan una mayor mezcla con el agua de mar	Sin barreras considerables

Etapas	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Desalinización	Descarga de salmuera	Aumento de salinidad en la zona de descarga	Investigación	Estudios ecológicos en la potencial zona de descarga a largo plazo, considerando variaciones de temporadas, priorizando lugares alejados de comunidades biológicas y considerando un área de mezcla entre la salmuera y el agua de mar.	Alto. El tomar todas estas consideraciones al momento de localizar la zona de descarga puede disminuir considerablemente los efectos negativos en comunidades biológicas.	Aumenta el valor de inversión inicial del proyecto debido a la extensión de las investigaciones necesarias.
			I+D	Estudios biológicos en la zona de descarga durante la operación de la planta.	Medio. Sirve para medir cambios reales en la zona y aplicar medidas de ser necesario. También ayuda a recopilar data para futuras plantas.	Requiere un monitoreo y estudios constantes durante la operación en la zona de descarga.
		Descarga de químicos	Tecnológica	Uso de químicos biodegradables y menos tóxicos para la limpieza de membranas.	Medio: Ayuda a disminuir la cantidad de componentes tóxicos en la salmuera.	Es necesario un aumento del mercado de estos productos.
		Descarga de salmuera general	I+D	Investigación y desarrollo de métodos de reducción del volumen de descarga como la descarga cero líquido (ZLD), recuperación de energía, extracción de metales preciosos y captura de CO ₂ .	Alto. Algunos de estos procedimientos pueden disminuir de gran manera la cantidad de salmuera vertida, incluso llegando a cero, además de entregar más ganancias que pueden financiar mitigaciones.	Mayor avance tecnológico e investigación, ya que actualmente no son rentables, las rutas a seguir no están aún definidas o no se ha comprobado que efectivamente son sostenibles.

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Energía	Energía Fotovoltaica	Deposición de los materiales de los paneles	Tecnológica	Reciclaje al final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos.	Alto. Los paneles de película delgada y los de silicio se pueden reciclar hasta un 98% y 96% de sus materiales respectivamente. Esto reduce considerablemente los nuevos materiales para crear un panel, ayudando a reducir las emisiones generadas por la extracción de materiales.	Las rutas de reciclaje para paneles fotovoltaicos no han sido creadas aun, además se necesita más investigaciones para mejorar sus procesos, que son intensivos en el uso de energía y productos químicos.
			Regulación	Desarrollo de políticas de tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, tomando como base el estándar europeo, para depositar los elementos tóxicos no reciclables de los paneles.	Medio. Ayuda a disminuir la toxicidad liberada al ambiente al depositar correctamente los materiales tóxicos no reciclables.	Una mejor política de tratamiento de residuos tóxicos requiere proyectos de ley que surjan desde el congreso o desde el Gobierno, lo cual puede tardar años en ejecutarse e implementarse.
			I+D	Avance de tecnologías que aumenten la eficiencia de los paneles tanto en composición como diseño. Por ejemplo, mayor vida útil, aumentar capacidades de sistemas y mejoras en los paneles de película delgada.	Medio. Mejorar la eficiencia de los paneles incurre a una disminución general de las emisiones en su ciclo de vida.	Inversiones en investigación y desarrollo de eficiencia de paneles a nivel nacional e internacional.

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Energía	Energía Fotovoltaica	Instalación fotovoltaica	Investigación	Realizar estudios de los ecosistemas presentes en las zonas propuestas de instalación	Alto. Estos estudios ayudan a minimizar los efectos negativos de las instalaciones e identificar posibles efectos positivos, como construcción de hábitats, eliminación de especies invasivas, exclusión de vehículos recreativos y mayor monitoreo de ecosistemas.	Mayor inversión en los proyectos para realizar las investigaciones correspondientes.
			I+D	instalación de plantas fotovoltaicas flotantes.	Medio. Estas plantas son más eficientes operacionalmente y reducen el uso de tierra.	Se necesita más investigación para clarificar los reales impactos ambientales que generan estas plantas fotovoltaicas.
		Uso de agua	Tecnológica	Reducción de uso de agua para limpieza y enfriamiento de paneles mediante procesos de refrigeración seca y recirculación del agua de enfriamiento.	Baja. Disminuye el consumo de agua en la operación.	Los volúmenes de agua usada en paneles se consideran bajos y sin mayores impactos.
		Contaminación acústica	Regulación	Seguir las normativas locales sobre los límites de ruido durante la construcción de los proyectos fotovoltaicos con un monitoreo constante.	Medio. Ayuda a prevenir perturbaciones tanto en el ambiente como en las personas.	Son necesarios instrumentos de medición y monitoreo constante.

Etapas	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Energía	Energía Fotovoltaica	Contaminación visual	Investigación	Importancia de las consultas ciudadanas respecto a la disposición de las plantas fotovoltaicas en zonas de alta biodiversas biológica y de recreación.	Alto. Ayuda a prevenir problemas políticos con la ciudadanía y aumenta la confianza entre proyectos energéticos.	En la Declaración de Impacto Ambiental no es obligatorio hacer consultas ciudadanas a menos que sea solicitada por cargas ambientales.
	Energía eólica	Mortalidad de aves	Investigación	Estudios de la fauna en la zona de instalación de la planta, que considere temporadas, rutas de migración, zonas de cría y caza, incluyendo un monitoreo en zonas contiguas al parque de entre 200 y 500 metros, tanto previo a la instalación, como durante la operación.	Alto. La selección de localización tomando todas estas consideraciones ayuda a disminuir considerablemente los efectos de mortalidad y perturbación de hábitats de aves.	Necesidad de instrumentos de medición y monitoreo durante la operación.
			Tecnológica	Instalación de luces de precaución que no atraigan a las aves, disminución de la velocidad de las aspas (mediante su alargamiento) y aplicar sistemas de detención frente a aproximación de aves.	Medio. Disminuyen la mortalidad general de las aves.	Implementar estos sistemas puede disminuir la eficiencia de los aerogeneradores.
		Contaminación acústica	Tecnológica	Diseño de rotores y aspas con bajo nivel de ruido y recubrimiento acústico de la turbina.	Medio. Ayuda a disminuir las perturbaciones en hábitats y en humanos.	Debe ser considerado en las etapas de diseño de los aerogeneradores, generalmente entregados por terceros.

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Energía	Energía eólica	Contaminación acústica	Investigación	Estudios sobre la distancia correcta de las instalaciones de zonas residenciales, considerando las variaciones de ruido ambiente presentes en la zona.	Alto. Un estudio completo, con las consideraciones correspondientes, puede disminuir de gran manera las perturbaciones a zonas residenciales.	Requiere de un monitoreo extenso de las variaciones de ruido en la zona de instalación.
		Contaminación visual	Tecnológica	Uso de materiales no reflectivos en la turbina para evitar “flashes” de luces debido al parpadeo. Mimetización de los aerogeneradores con pixeles de colores.	Medio. Otorgan una disminución a las perturbaciones sobre las personas.	Mayor inversión por aspectos visuales que pueden ser considerados como "no relevantes".
			Investigación	Estudio de la distancia adecuada a zonas residenciales considerando factores de contraste de color, tamaño y sombras, priorizando zonas alejadas de lugares con alto nivel de paisajismo.	Alto. Al igual que la contaminación acústica, el correcto estudio de la localización considerando factores visuales, puede disminuir de gran manera los efectos negativos en las personas.	Requiere consulta ciudadana, la cual no es obligatoria en la Declaración de Impacto Ambiental.
		Instalación general	Investigación	Priorizar localizaciones en tierra frente a las dispuestas en el mar, que presentan mayores impactos generales.	Medio. Las localizaciones en tierra tienen menos efectos negativos en la flora y fauna que las ubicadas en el mar	Dependiendo de la geografía del lugar se puede priorizar una dispuesta en el mar.

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Energía	Energía eólica	Instalación general	Tecnológica	Minimizar el uso de maquinaria pesada lo mayor posible durante la construcción.	Bajo. Ayuda a disminuir la destrucción de suelo debido a la maquinaria.	Las máquinas pesadas son necesarias en las obras de construcción, y los trabajos en los que se pueden evitar necesitan mayor recurso humano.
Producción de Hidrógeno	Electrolisis del agua	Emisiones en la producción	Tecnológica	Priorizar el uso de electrolisis para la producción de hidrogeno mediante energías renovables. Además, se debe priorizar el uso de celdas SOEC o AEC.	Alto. La electrolisis alimentada desde energías renovables es la que presenta la menor cantidad de impactos ambientales frente a otras tecnologías. Las celdas recomendadas son las que presentan las menores emisiones respecto de su composición.	Celdas SOEC necesitan mayor desarrollo tecnológico y de su industria.
		Materiales del electrolizador	Tecnológica	Reducción del uso de metales claves a través de reciclaje, reducción de cantidad usada o materiales substitutos.	Medio. Ayuda a disminuir las emisiones generadas por los materiales de cada stack de electrolizador.	Falta investigación y desarrollo en las tecnologías de reciclaje para los metales de los electrolizadores, donde las rutas de reciclaje a nivel industrial no se han establecido y son procesos con gran consumo de energía
Almacenamiento y Transporte	Almacenamiento y transporte del hidrogeno	Impactos ambientales generales	Tecnológica	Priorizar el transporte de hidrogeno presurizado a través de cañerías.	Alto. Este transporte es el que presenta los menores impactos ambientales asociados.	Es necesario un sistema de cañerías para transportar el hidrogeno, que debe ser construido o tomado de los existentes.

Etapas	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Almacenamiento y transporte	Almacenamiento y transporte del hidrogeno	Impactos ambientales generales	I+D	El transporte y almacenamiento mediante LOHC es la mejor opción en términos económicos y energéticos para grandes distancias. La licuefacción también es una opción destacada, pero se necesita un mayor desarrollo para reducir las pérdidas en el almacenamiento y transporte.	Medio: LOHC permite transportar más hidrogeno a menor costo a largas distancias. Licuefacción es una buena opción para largas distancias.	Con las tecnologías actuales, el proceso de LOHC todavía tiene muchas emisiones asociadas, principalmente por el consumo de energía, por lo que necesario mayor investigación y avance tecnológico. La licuefacción tiene problemas de pérdida de energía. Es necesario avance tecnológico en el almacenamiento que reduzca estas pérdidas.
		Emisiones de vehículos	I+D	Uso de hidrogeno en vehículos con celdas de combustible	Medio. Las celdas de combustible de hidrogeno son las que presentan menores emisiones en su uso.	Los procesos de creación de celdas son muy intensivos en el uso de energía, siendo la principal fuente de emisión, por lo que es necesario avanzar en tecnologías que reduzcan este consumo.
Uso	Uso de hidrogeno como combustible	Fugas, agotamiento de ozono y combustión incompleta	I+D	Uso de hidrógeno comprimido o liquido en vehículos.	Medio. El hidrogeno puede reemplazar los combustibles fósiles usados en automóviles, aviones, trenes y barcos.	La velocidad de combustión del hidrogeno facilita combustiones incompletas. Los almacenamientos de hidrogeno liquido presentan 17% en fugas. Se necesitan avances tecnológicos en ambos casos.

Etapa	Proceso asociado al impacto	Impacto	Tipo de mitigación	Descripción de mitigación	Grado de disminución al impacto	Barreras de implementación
Uso	Uso de hidrogeno como combustible	Fugas, agotamiento de ozono y combustión incompleta	I+D	Investigación en los impactos de la liberación de hidrogeno a la atmosfera.	Alto. La liberación de hidrógeno en la estratosfera, y por consecuencia, el aumento de humedad en ella puede generar la disociación del ozono en moléculas de oxígeno.	Existen aún muy pocos estudios que certifiquen los reales impactos que puede tener el hidrogeno en la atmosfera y que se puede hacer al respecto.
					Alto. La liberación de hidrogeno a la atmosfera puede aumentar la concentración de OH en la estratosfera y disminuirla en la tropósfera, afectando ciclos del metano y monóxido de carbono. El aumento de agua en la mesósfera incurre en aumento de nubes noctilucientes que afectan el albedo de la tierra.	Se necesitan más estudios sobre los reales impactos asociados al aumento de hidrogeno en la atmosfera y las formas de disminuirlos.
			I+D	Hidrogeno en uso doméstico e industrial	Medio. El hidrogeno puede reemplazar al gas natural de uso industrial y doméstico.	Se necesitan avances tecnológicos que permitan una combustión correcta y segura.
		Implantación general	Tecnológica	Uso de hidrogeno como almacenamiento y/o producción de energía eléctrica.	Alto. El hidrogeno puede evitar la variabilidad y perdidas relacionadas a energías renovables al ser un vector energético, supliendo demanda insatisfecha o almacenando energía.	Para plantas de energías renovables existentes es necesario modificar el sistema para que funcione en conjunto con el almacenamiento y producción de hidrogeno.

Fuente: Elaboración propia

5.8. Propuesta de Hoja de Ruta

Al inicio de esta investigación se planteó una ruta a analizar en las distintas alternativas que posee la cadena de valor del hidrógeno verde, basado principalmente en las propuestas que muestra la estrategia nacional de H₂V, pero a lo largo del estudio se analizaron otras opciones para comparar su nivel de impacto en cada categoría. De esta manera, una vez analizados los distintos impactos y mitigaciones se establece una hoja de ruta para una correcta implementación de una economía de hidrógeno respetando el medio ambiente y los compromisos adoptados por el país.

El insumo principal para la producción de hidrógeno es el agua, que como ya se ha establecido, debe ser obtenida desde el mar. Existen dos métodos de obtención de agua “pura” principales, la termólisis del agua y la osmosis inversa, siendo esta última la que debe adoptarse y potenciarse debido a su menor rango de emisiones que afectan al medio ambiente. Es importante que por parte del Estado se propongan los incentivos para priorizar las desalinizadoras con tecnología de osmosis inversa. La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) hoy solo puede entregar recomendaciones y proponer un método de desalinización ajustado a requisitos específicos para entregar agua desalinizada de manera sustentable. El Ministerio de obras públicas (MOP) no puede construir plantas desalinizadoras y esto se intenta cambiar con un proyecto de ley que mediante una nueva Dirección de Infraestructura Hidráulica (en remplazo de la DOH) y una subsecretaría de recursos hídricos permitirá realizar estudios, construir, operar y dar mantenimiento a estas instalaciones, ya sea con fondos públicos o en conjunto con privados. Esto también permitiría al MOP entregar concesiones de desalinización. Sin embargo, este proyecto aún está en tramitación en el legislativo y no presenta carácter de urgencia. Es importante que esta ley sea promulgada y que el MOP priorice la osmosis inversa como tecnología de

generación en las plantas desalinizadoras. Otra forma de incentivar la osmosis inversa es que el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) sea más exigente con los requisitos que se les piden a los proyectos de plantas desalinizadoras con otras tecnologías de producción que presentan mayores impactos, por ejemplo, que las desaladoras térmicas deban tener captura de CO₂ y sistemas de enfriamiento de agua residual, lo que aumenta los costos y provoca un desincentivo.

Dentro de los sistemas de captura de agua de mar en las plantas desalinizadoras se destaca como mejor opción a nivel nacional los ubicados en el fondo marino, pero que deben tener varias consideraciones para ser amigables con el medio ambiente. En primer lugar, se hace necesario que posean métodos que reduzcan la absorción y atrapamiento de las especies marinas como instalación de rejillas en la toma de agua, velocidades bajas de absorción y luces estroboscópicas o cortinas de burbujas para advertir a los animales. En segundo lugar, es necesario el estudio certero de la zona de instalación de la captura de agua, que considere los cambios estacionales de la flora y fauna marina y de esta manera identificar la variabilidad natural del ecosistema. Estos estudios ecológicos también deben ser efectuados para la zona de instalación de descarga de salmuera obtenida del proceso, la cual además debe considerar el área de zona de mezclado con el agua de mar y monitoreos constantes durante la operación para dilucidar si reales efectos se están provocando en la zona con tal de obtener data y aplicar medidas de reconstrucción de ser necesario. Se insta a las empresas encargadas de llevar a cabo los proyectos de plantas desaladoras a aplicar la mayor cantidad de medidas de mitigación posibles en su planificación de construcción, además de los monitoreos durante la operación. Esto se plantea como una recomendación ya que en la actualidad no hay un marco jurídico regulatorio sobre la actividad de las plantas desalinizadoras, donde se dispone el agua de mar como un bien nacional de uso

público y para su utilización se debe poseer un título de autorización regulado por la Ley de Concesiones Marítimas. Según el artículo 10 de la ley 19.300, las plantas de tratamientos de agua deben someterse al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), pero debido a la falta de la regulación en la materia de desalación, el carácter obligatorio de la evaluación ambiental puede ser ambiguo llegando incluso a que la evaluación ambiental de las plantas desaladoras no sea considerado necesario. Las empresas pueden someterse voluntariamente al SEIA mediante una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) y ser aprobadas, evitando el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) que es más restrictivo con los contenidos mínimos necesarios, que incluyen entre ellos planes de medidas de mitigación, reparación y compensación. Es importante que el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) y/o el Congreso planteen proyectos de ley sobre las actividades de una planta desaladora, de manera que se hagan correctamente los EIA, o incluso haciéndolos más estrictos, y la aplicación de medidas de mitigación deje de ser una recomendación. Hoy existen dos proyectos de ley en el congreso sobre esta materia, uno sobre el uso de agua de mar para la desalinización (en tramitación) y otro sobre las concesiones marítimas y la regulación de extracción de agua de mar (archivado), donde el primero busca que los proyectos de desaladoras siempre se sometan al SEA y el segundo que se obligue a concesionarios a preservar el medio ambiente marino. Se recomienda al ejecutivo el dar el carácter de urgencia para que sean prontamente despachados, dando un puntapié inicial a la regulación en materia de desalación.

Un punto clave a lo largo de toda la cadena es el uso de energía eléctrica. Es de conocimiento que el camino a seguir es mediante energías renovables, por los compromisos del país de cara al escenario de carbono neutralidad para el año 2050, donde el Ministerio de Energía debe encargarse de que la transición energética a energías renovables se lleve a

cabo. Por lo que más allá de la comparación con otros métodos de producción eléctrica, es importante destacar las mitigaciones de impactos de las plantas fotovoltaicas y eólicas.

Con respecto a las plantas fotovoltaicas uno de los mayores problemas son los materiales de los que están compuestos los paneles, que contienen metales de difícil extracción y que pueden volverse tóxicos, lo que hace necesario establecer las rutas de reciclaje de los paneles solares una vez terminada su vida útil. Diversos estudios han demostrado que se puede reciclar más del 90% de paneles de silicio y de película delgada. Siendo el reciclaje la mejor opción de mitigación, se debe avanzar en la investigación y desarrollo de tecnologías que ayuden a disminuir el uso intensivo de energía y químicos en sus procesos, donde la función de innovar en estos apartados recae principalmente en investigadores tanto internacionales como nacionales, como, por ejemplo, la Fundación Chile (FCH). De la misma forma, se deben mejorar los sistemas de tratamiento de residuos de aparatos electrónicos y eléctricos (RAEE) del país, para dar un correcto tratamiento de los materiales tóxicos que no pueden ser reciclados. Es importante que el Ministerio de Medio Ambiente desarrolle políticas y planes tanto para el correcto tratamiento de los materiales como para generar las rutas de reciclaje, donde bajo la ley REP (ley 20.920) que establece la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento del reciclaje, y con el apoyo del SEA, se pueda avanzar hacia el estándar europeo, que es líder en materia de RAEE, atacando las falencias que presenta el tratamiento actual chileno. Bajo esta ley también se destaca la responsabilidad de los productores de paneles fotovoltaicos en el desarrollo de las rutas de reciclaje y deposición, por lo que se espera un trabajo conjunto entre privados y Gobierno.

Para la correcta ubicación de la instalación fotovoltaica, las empresas encargadas del proyecto deben hacer estudios de los ecosistemas de la zona propuesta, priorizando

locaciones con baja diversidad biológica, como por ejemplo desiertos, e identificando posibles aspectos positivos que la instalación pueda significar para la flora y fauna. Es importante que la comunidad científica realice mayores estudios respecto de las plantas fotovoltaicas flotantes, que pueden presentar mayores eficiencias operacionales, pero que no se comprueba con certeza que disminuyan los efectos negativos en el medio ambiente, más allá de la disminución en el uso de suelo. Es importante que se realicen encuestas ciudadanas de percepción de la instalación fotovoltaica cuando está planeada en zonas de alta diversidad biológica y de recreación, relacionado con el tópico de contaminación visual, y que, durante las fases de construcción de la planta, la empresa encargada mantenga un monitoreo constante del ruido para estar dentro de las normativas legales y no se presenten efectos adversos en la población. Estos dos últimos puntos deben realizarse bajo el apoyo y fiscalización de la SEA, sometiéndose al servicio de evaluación de impacto ambiental (SEIA) que incluye la participación ciudadana en estos proyectos.

Con respecto a las plantas de energía eólica, es crítico establecer medidas para la mortalidad de aves debido a las turbinas eólicas, lo que parte con estudios de la fauna de la zona potencial de instalación, en los que se consideren los cambios estacionales, las rutas de migración de aves y sus zonas de cría y caza. Estos estudios iniciales deben ir acompañados de un monitoreo constante luego de instalada la planta eólica, para obtener data de los posibles efectos adversos que se estén teniendo con las aves. Otras mitigaciones tecnológicas como la instalación de luces de precaución que no atraigan a las aves, disminución de las velocidades de las aspas y aplicación de sistemas de detención ante aproximamiento de aves también deben considerarse en las plantas eólicas. Se insta a las empresas a cargo de los proyectos eólicos a incluir las mitigaciones mencionadas en la planificación del proyecto, donde tanto estas como los estudios previos de la zona y los

estudios de monitoreo deben estar incluidos en la evaluación de impacto ambiental sometido por el SEIA. Las instalaciones en mar son una alternativa para la disminución del uso de tierra, pero en términos generales presentan más afecciones al medio ambiente, por lo que se debe priorizar las instalaciones en tierra.

Para reducir tanto de contaminación visual como acústica, son necesarios estudios de la distancia apropiada entre la zona de instalación del parque y las zonas residenciales, donde para el primer caso se debe considerar los contrastes de color, el tamaño de los aerogeneradores y la biodiversidad del lugar, y para el segundo caso se deben considerar las variaciones de ruido ambiente de la zona. Este punto también se incluye en la EIA para asegurar que cumpla con las normativas vigentes de la localización elegida, sujetas a los Instrumentos de Planificación Territorial donde en caso de zonas urbanas, dependen del Plan Regulador Comunal y en el caso de zonas rurales, del Plan Regular Intercomunal o Metropolitano. Como medidas de mitigación tecnológicas, para reducir la contaminación acústica es necesario que los rotores y las aspas vengán diseñadas para minimizar el ruido, además de presentar un recubrimiento acústico en la turbina, por lo que es necesario que estas características de los aerogeneradores sean previamente discutidas con los proveedores si es que los generadores del proyecto no son los que manufacturan las turbinas eólicas. Para reducir la contaminación visual se debe mimetizar las turbinas con el paisaje de la zona de instalación, además de usar materiales no reflectivos en la turbina para evitar “flashes” de luces que pueden perturbar a residentes, por lo que la empresa encargada del proyecto debe considerar este uso de materiales en los paquetes de trabajo del proyecto.

Tanto para las instalaciones fotovoltaicas como para plantas eólicas, es difícil que las empresas encargadas puedan presentar solo un DIA, debido a que si los proyectos presentan algunos de los efectos presentados en el artículo 11 de la Ley 19.300 (ver **Anexo**

7) el SEIA solicita el Estudio de Impacto Ambiental correspondiente, que requiere una evaluación más exhaustiva de los impactos y mitigaciones. El SEA cuenta con guías para la descripción de centrales solares y eólicas sometidos al SEIA, en la que se destacan los impactos ambientales más frecuentes asociados a estas, pero no se muestran las mitigaciones de estos ya que son específicos para los impactos que el titular haya presentado. Sin embargo, los impactos significativos encontrados según la normativa del SEA, deben presentar medidas de mitigación, reparación o compensación y un plan de seguimiento, por lo que este organismo debe velar por una mayor y correcta implementación de estas medidas.

Para la producción de hidrógeno se debe dejar de lado el reformado del gas para dar paso a la electrolisis del agua alimentada con electricidad de energías renovables, que es la tecnología que presenta menos emisiones. Existen distintos tipos de celdas para el electrolizador, y las que presentan menores emisiones respecto de su composición son las celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC) y la celda de electrólisis alcalina (AEC). Para disminuir el uso de metales en las celdas se debe recurrir a la reducción de cantidad usada (donde se puede reducir sin afectar mayormente la eficiencia) y a la reutilización mediante reciclaje. Es importante que la comunidad científica genere investigación y desarrollo de estas tecnologías para hacerlas más eficientes en los años venideros. Las rutas de reciclaje para los componentes de los electrolizadores aún no están formadas, por lo que al igual que con las rutas de reciclaje de los paneles fotovoltaicos, es necesario que el Ministerio de Medio Ambiente se encargue de generar los planes y políticas que establezcan las normas en la ruta de reciclaje de estos componentes de difícil extracción y con uso intensivo de energía de producción del electrolizador, frente a un crecimiento en las plantas de hidrógeno basadas en esta tecnología en el país.

Con respecto al almacenamiento y transporte del hidrógeno, la opción que presenta las mayores ventajas ambientales es el hidrógeno presurizado transportado por cañerías o redes de gas. Sin embargo, el transporte y almacenamiento mediante portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHC) presenta grandes ventajas en términos económicos y energéticos ligados a exportación e importación a grandes distancias, pero es de las opciones que presenta más desventajas ambientales. La licuefacción también se destaca en costos y en transporte a grandes distancias, pero tiene muchas pérdidas energéticas. Chile tiene planeado en su estrategia de hidrógeno verde llegar a un punto de producción en el que sea posible exportar hidrógeno a distintas partes del mundo, lo que puede situar a LOHC como una preferencia por sus costos, lo que hace necesario que investigadores tanto nacionales como internacionales puedan avanzar en el desarrollo de tecnologías que hagan de esta forma de almacenamiento y transporte más amigable con el medio ambiente.

En la parte final de la cadena, se han estudiado los distintos usos que puede tener el hidrógeno, como en celdas de combustibles para vehículos, sistemas de calefacción, generación y almacenamiento de energía, entre otros. Como son implementaciones que en su mayoría están en desarrollo temprano, es difícil plantear una ruta viable ambientalmente para sus usos, pero si se puede hacer hincapié en los desarrollos que se esperen de estos. Para las celdas de combustibles usadas en vehículos, por ejemplo, es necesario el desarrollo tecnológico en los procesos de producción, que son muy intensivos en uso de energía. Para los usos directos como combustible, es necesario que la industria de turbinas de gas desarrolle mejores tecnologías de quemadores, para que, debido a la velocidad de combustión del hidrógeno, no se generen combustiones incompletas que liberen hidrógeno al ambiente. De la misma forma, en los almacenamientos de hidrógeno líquido para aviones, es necesario disminuir las fugas de hidrógeno que presentan las tecnologías

actuales.

Es importante hacer un llamado a la comunidad científica para aumentar las investigaciones respecto a los verdaderos efectos que puede tener una economía de hidrógeno en el medio ambiente, ya que algunos estudios han destacado que la liberación de hidrógeno a la atmosfera por fugas puede alterar ciclos de gases e incluso causar el agotamiento del ozono, y aún se desconoce los efectos de un aumento de vapor de agua a gran escala en el ecosistema terrestre. En la medida que el hidrógeno se busque como un remplazo de los combustibles fósiles que provocan en mayor parte el cambio climático, no se debe dejar a la deriva los posibles impactos que el uso de este mismo puede generar en la atmosfera y, por consecuencia, en el planeta Tierra.

Finalmente, hay que destacar nuevamente las principales instituciones que deben tomar acción en cada materia. Con respecto al uso de osmosis inversa en la desalinización es importante que el Congreso tramite lo antes posible el proyecto de ley que permitirá que el MOP pueda tener más atribuciones sobre las plantas desalinizadoras en Chile, y de esta manera que la nueva DIH priorice el uso de esta tecnología. El SEA debe endurecer las medidas de evaluación de impacto ambiental para las tecnologías con más impactos al medio ambiente. Con respecto a la desalinización en general, es importante que el MMA y el congreso generen proyectos de ley que esclarezcan los requisitos de evaluación ambiental en plantas desalinizadoras, y que el ejecutivo pueda dar urgencia a las tramitaciones que aún no son promulgadas en esta materia. El Ministerio de Energía debe mantener sus esfuerzos en la transición energética a energías renovables. Es importante que la FCH u otros investigadores nacionales e internacionales desarrollen tecnologías para hacer más eficientes los procesos de reciclaje de paneles solares, donde el MMA debe encargarse de generar los planes y políticas de rutas de reciclaje y de la deposición de

materiales peligrosos no reciclables, en un trabajo conjunto con la responsabilidad de los productores. El SEA debe ser más exhaustivo con la evaluación ambiental para plantas eólicas y fotovoltaicas, de manera que se consideren correctamente las localizaciones, estudios y participación ciudadana correspondiente. El MMA debe generar los planes y políticas para desarrollar las rutas de reciclaje de materiales de electrolizadores en la producción de hidrógeno. La industria de turbinas de gas y de aviones en base a hidrógeno deben mejorar sus tecnologías de combustión y almacenamiento respectivamente, para disminuir las fugas de hidrógeno al ambiente. La comunidad científica debe avanzar en el desarrollo de tecnologías más eficientes para la producción electrolizadores y de vehículos en base a hidrógeno, y deben generar más investigaciones sobre las consecuencias de las fugas de hidrógeno al medio ambiente y de un aumento sustancial del vapor de agua en la superficie terrestre.

6. Conclusiones

Sin duda el hidrógeno se presenta como un combustible “del futuro” que puede atacar la crisis climática que afecta hoy al mundo entero, y es verdad que puede ser un paso importante para eliminar finalmente el uso de combustibles fósiles que son los principales causantes del cambio climático. Sin embargo, como es costumbre, nos solemos sesgar por “lo bonito” que pueden parecer las cosas comparándolo con la actualidad, dejando de lado los aspectos negativos. Hoy la cultura de la sustentabilidad ha ido cambiando poco a poco, y si bien cada vez más privados y gobiernos se suman al desarrollo de industrias verdes, queda un largo camino por recorrer.

El hidrógeno verde, como cualquier producto tecnológico, no presenta 0% de emisiones contaminantes y su cadena de valor no carece de impactos ambientales, la desalinización genera aumento de mortalidad en especies marinas y aumento de salinidad en las zonas de descarga de salmuera, los paneles fotovoltaicos presentan altas emisiones y consumo de energía en su producción y se transforman en materiales peligrosos al final de su vida útil, las plantas eólicas aumentan la mortalidad de animales aéreos y perturbación de rutas de migración, además de perturbaciones en las personas, los electrolizadores requieren de minerales de difícil extracción y sus rutas de reciclaje no han sido creadas, el transporte y almacenamiento de hidrógeno presenta muchas fugas al ambiente que pueden alterar las concentraciones de ozono, la producción de celdas de hidrógeno requiere aún mucha energía y todavía no existe claridad sobre los efectos de un aumento sustancial del vapor de agua en el ambiente.

Los impactos mencionados pueden ser eliminados o reducidos considerablemente si se aplican ciertas medidas de mitigación, pero para aplicarlas se necesita trabajo conjunto. En Chile se necesita avance legal en ciertas materias, como la regulación de la

desalinización, propuestas de planes de rutas de reciclaje en paneles fotovoltaicos y electrolizadores y mayores exigencias para las evaluaciones de impacto ambiental. Además, se necesita el desarrollo de industrias y tecnologías, como mejorar eficiencia en producción y operación de paneles fotovoltaicos y celdas de combustible de hidrógeno, mejores turbinas de gas y sistemas de almacenamiento para reducir fugas, y mayor eficiencia en la producción de vehículos con celdas de hidrógeno. También es necesario que la comunidad científica desarrolle investigaciones sobre los reales impactos de las fugas de hidrógeno en la atmósfera.

Este trabajo no solo representa a Chile con sus planes de producción de H₂V, sino que a toda la comunidad internacional que busque incorporar el uso y/o producción de este combustible. Es por esto, que además de todas las mitigaciones aplicables a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno presentadas en esta investigación, es importante que se evalúe y estudie los impactos de una economía global de hidrógeno, buscando soluciones preventivas más que correctivas, ya que como es historia, las consecuencias pueden ser más graves de lo presupuestado y su forma de corrección puede ser más lenta de lo necesario para retornar a una armonía ambiental.

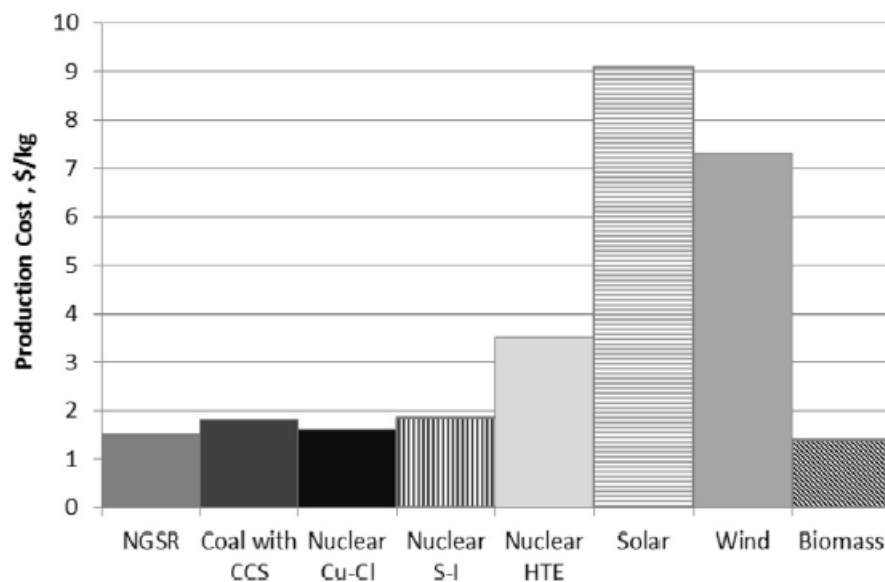
7. Anexos

Anexo 1. Requerimiento de suelo para distintas tecnologías de energía solar y eólica.

Technology type	Size (acres/MW)
PV < 10 kW	3.2
PV 10100 kW	5.5
PV 1001,000 kW	5.5
PV 110 MW	6.1
Small PV (>1 MW, <20 MW)	5.9
Fixed	5.5
1-axis	6.3
2-axis flat panel	9.4
2-axis concentrator photovoltaics (CPV)	6.9
Large PV (>20 MW)	7.9
Fixed	5.8
1-axis	9.0
2-axis flat CPV	6.1
Small and large PV installations	2.2–12.2
Small and large CSP installations	2.0–13.9
PV panels installed in parallel	6.1
PV parks	8.1
Wind <10 kW	30
Wind 10,100 kW	30
Wind 100–1000 kW	30
Wind 1 10 MW	44.7

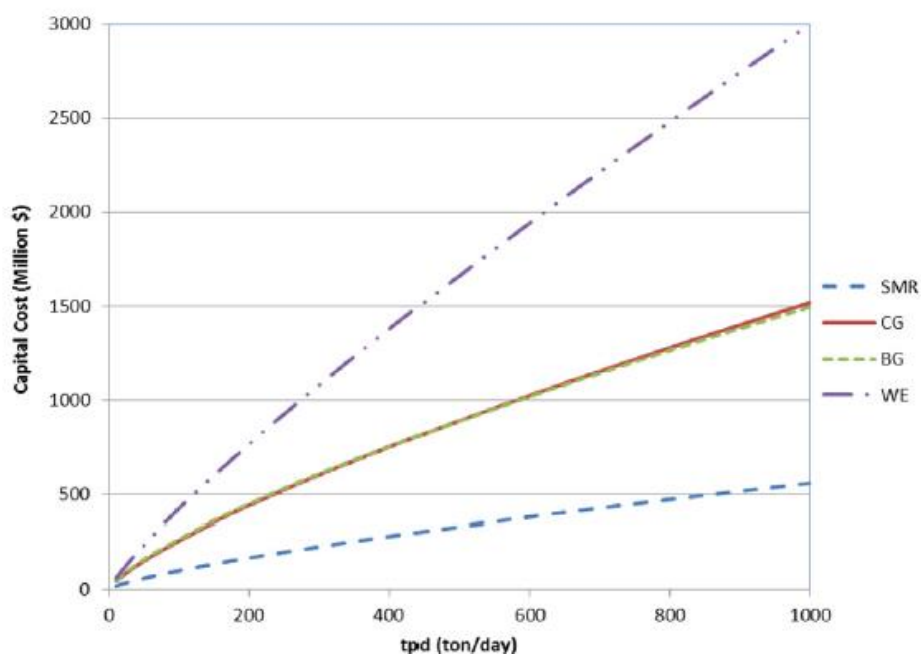
Fuente: Tawalbeh et al. (2021)

Anexo 2. Costos de producción de hidrógeno para distintas tecnologías.



Fuente: Acar y Dincer (2014)

Anexo 3. Costos de capital según la capacidad de producción de distintas tecnologías.



Nota: SMR: Reformado de gas, CG: Gasificación de carbón, BG: gasificación de biomasa.

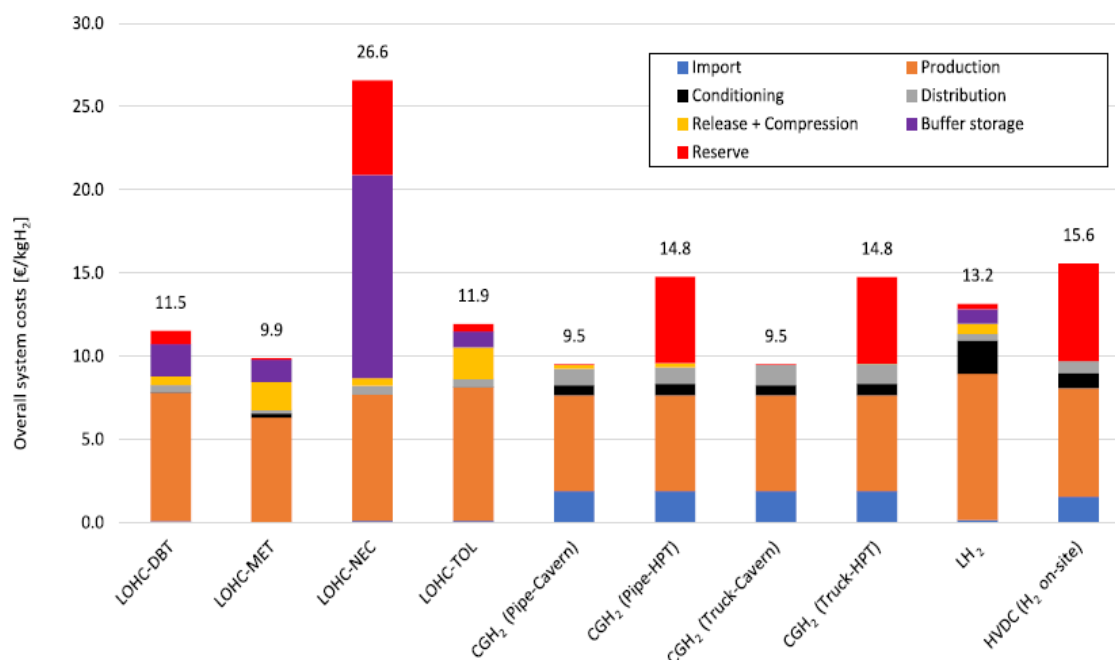
WE: Electrolisis de agua. Fuente: Acar y Dincer (2014).

Anexo 4. Cadenas de suministro de los distintos métodos de tratamiento del hidrógeno

Supply chain	Energy carrier	Import medium	Distribution medium	Buffer storage	Reserve storage	On-site storage
LOHC-DBT	DBT	Ship	Truck	MOT	MOT	-
LOHC-MET	MET	Ship	Truck	MOT	MOT	-
LOHC-NEC	NEC	Ship	Truck	MOT	MOT	-
LOHC-TOL	TOL	Ship	Truck	MOT	MOT	-
CGH ₂ (Pipe-Cavern)	CGH ₂	Pipeline	Pipeline	-	Cavern	-
CGH ₂ (Pipe-HPT)	CGH ₂	Pipeline	Pipeline	-	HPT	-
CGH ₂ (Truck-Cavern)	CGH ₂	Pipeline	Truck	-	Cavern	-
CGH ₂ (Truck-HPT)	CGH ₂	Pipeline	Truck	-	HPT	-
LH ₂	LH ₂	Ship	Truck	Cryogenic	Cryogenic	-
HVDC (H ₂ on-site)	electricity	HVDC	HVDC	-	-	HPT

Fuente Niermann et al. (2021)

Anexo 5. Costos generales de los sistemas de producción de hidrógeno.



Nota: DBT: dibenciltolueno, HPT: tanque de alta presión, HVDC: transmisión directa de alto voltaje, LH₂: Hidrógeno licuado, LOHC: Portador de hidrógeno orgánico líquido, MET: metanol, NEC: N-etilcarbazol, Tubería: Tubería, TOL: tolueno. Fuente: Niermann et al. (2021)

Anexo 6. Categorías de impactos ambientales considerados para el estudio.

Impact category	Abbreviation	Unit
Climate change	GWP	kg CO ₂ -eq
Acidification	AP	Mole H ⁺ -eq
Ozone depletion	ODP	kg CFC-11-eq
Human toxicity – non-cancer	HTP n-c	CTU _h ^a
Human toxicity - cancer	HTP c	CTU _h
Particulate matter/Respiratory inorganics	PM	kg PM _{2.5} -eq
Freshwater ecotoxicity	ETP fw	CTU _e
Freshwater eutrophication	EP fw	kg P-eq
Marine eutrophication	EP m	kg N-eq
Terrestrial eutrophication	EP ter	Mole N-eq
Ionizing radiation – human health	IR h	kg U235-eq
Ionizing radiation – ecosystems	IR e	CTU _e
Photochemical ozone formation	POCP	kg C ₂ H ₄ -eq
Resource depletion, mineral, fossils and renewables	ADP	kg Sb-eq

Fuente: Wulf et al. (2018)

Anexo 7. Artículo 11 de la ley 19.300.

Artículo 11. Los proyectos o actividades enumerados en el artículo precedente requerirán la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, si generan o presentan a lo menos uno de los siguientes efectos, características o circunstancias:

a) Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos;

b) Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire;

c) Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos;

d) Localización próxima a población, recursos y áreas protegidas susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar;

e) Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona, y

f) Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

Fuente: División Jurídica de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (2007)

8. Referencias

4eChile. (2021, 5 agosto). *Cadena de valor H2*. <https://4echile.cl/recursos/cadena-de-valor-h2/>

Acar, C., & Dincer, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.060>

Acciona. (s. f.). *¿Qué es el Cambio Climático y cómo nos afecta?* Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://www.acciona.com/es/cambio-climatico/>

Antofagasta Minerals. (2016, 2 mayo). *Planta Desalinizadora MLP | Antofagasta Minerals* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=0jaR5j0VBM&list=PLFgH4v76eJRkeveeIoFmuftqiZda1H6G7&index=2>

Arreguín, F., & Martín, A. (2000). Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*, XV(1), 27–49. <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/848>

Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007, diciembre). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>

Bleninger, T., & Jirka, G. H. (2008). Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1–3), 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.059>

Blesing, J. (s. f.). *Desalination: A sustainable solution to water shortage*. Aurecon Group. Recuperado 9 de mayo de 2022, de <https://www.aurecongroup.com/thinking/thinking-papers/desalination-a-sustainable-solution-to-water-shortage>

Cartier, G., & Corsin, P. (2007, octubre). Description of different water intakes for

SWRO plants. In *IDA World Congress-Maspalomas, Gran Canaria–Spain* (pp. 1-19).

CMNUCC. (1992, junio). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf

CMNUCC. (1997, diciembre). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Cooley, H., Ajami, N., & Heberge, M. (2013). Key Issues in Seawater Desalination in California: Marine Impacts. *Pacific Institute*. Obtenido de <https://pacinst.org/wp-content/uploads/2013/12/desal-marine-impacts-full-report.pdf>

Corporación Región Coquimbo & Aqua Advice. (2014, diciembre). *Resumen estudio técnico-económico comparativo entre la instalación de una planta desaladora y una planta de reutilización de aguas depuradas* (N.o 1). https://www.opia.cl/601/articles-75237_archivo_01.pdf

Crozzoli, P., Gullo, F., Milanesi, J., Sánchez, A., Trivellini, L. (2020). Análisis de prefactibilidad de una planta productora de hidrógeno (Trabajo de Graduación, Instituto Tecnológico de Buenos Aires). <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/3363>

Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W. N., & Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy – A review. *Renewable Energy*, 75(2015), 911–921. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>

División Jurídica de la Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2007). *Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente. Modificada por ley 20.173*. Conaf. Recuperado 19 de julio de 2022, de https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1370463346Ley19300.pdf

E2BIZ consultores. (2019). «*Antecedentes para la elaboración de análisis económicos de metas de recolección y valorización para el producto prioritario “Aparatos Eléctricos y electrónicos” contenidos en la ley 20.920*» (N.o 2). <https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/INFORME-No2-FINAL-RAEE-2019-07-04.pdf>

Econssa Chile S.A. (2018, 12 abril). *Planta desalinizadora de agua de mar Atacama* [Vídeo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=NrEbJqPOAk8&list=PLFgH4v76eJRkeveeIoFmuftqiZda1H6G7&index=1>

Fajardo Cadena, A. (2018). *Desalinización de agua: ¿Una alternativa sostenible para la potabilización del agua?* [Tesis de maestría, Fundación Universidad de América].
<http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7141>

Gobierno de Chile. (s. f.). *Qué es la COP*. cop25.mma.gob.cl. Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://cop25.mma.gob.cl/que-es-la-cop/>

Gobierno de Chile. (2019, 4 junio). *Chile avanza hacia la carbono-neutralidad y anuncia plan de cierre de todas las centrales energéticas a carbón*. cop25.mma.gob.cl.
<https://cop25.mma.gob.cl/chile-avanza-hacia-la-carbono-neutralidad-y-anuncia-plan-de-cierre-de-todas-las-centrales-energeticas-a-carbon/>

Gobierno de Chile. (2020, 9 abril). *Chile entrega la actualización de su compromiso de reducción de emisiones y medidas para enfrentar el cambio climático*. cop25.mma.gob.cl.
<https://cop25.mma.gob.cl/chile-entrega-la-actualizacion-de-su-compromiso-de-reduccion-de-emisiones-y-medidas-para-enfrentar-el-cambio-climatico/>

Greenpeace. (s. f.). *Cambio climático | Causas, consecuencias y soluciones*. Greenpeace España. Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/>

Iberdrola. (2021, 22 abril). *El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>

Ihsanullah, I., Atieh, M. A., Sajid, M., & Nazal, M. K. (2021). Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. *Science of The Total Environment*, 780, 146585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146585>

Induambiente. (2021, 21 diciembre). *Chile se consolida como el país más atractivo de América para invertir en energías renovables - Induambiente*. <https://www.induambiente.com/actualidad/noticias/chile-se-consolida-como-el-pais-mas-atractivo-de-america-para-invertir-en-energias-renovables>

Ito, Y., Hanada, S., Kitade, T., Tanaka, Y., & Kurihara, M. (2013, octubre). Clarification of impact of biofouling triggered by chemical addition for designing of Mega-Ton SWRO plant. In *Proceedings of the IDA World Congress*.

Jaber, S. (2014). Environmental Impacts of Wind Energy. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(3), 251–254. <https://doi.org/10.7763/jocet.2013.v1.57>

Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A., & Scherer, L. (2019). Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>

Kress, N. (2019). Actual Impacts of Seawater Desalination on the Marine Environment Reported Since 2001. *Marine Impacts of Seawater Desalination*, 81–133. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811953-2.00006-2>

Lacueva, N. M. (2021, 11 febrero). *LOS COLORES DEL HIDRÓGENO: VERDE, AZUL Y GRIS*. ZeroEmissionsObjective. <https://plataformazeo.com/es/colores-hidrogeno-verde-azul-gris/>

Lattemann, S., Kennedy, M. D., Schippers, J. C., & Amy, G. (2010). Chapter 2 Global Desalination Situation. *Sustainable Water for the Future: Water Recycling versus Desalination*, 7–39. [https://doi.org/10.1016/s1871-2711\(09\)00202-5](https://doi.org/10.1016/s1871-2711(09)00202-5)

Matus Bueno, C. (2020). *Desalinización sustentable del agua de mar como alternativa de progreso para el país*. [Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María].

Mendecka, B., & Lombardi, L. (2019). Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111(2019), 462–480. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.019>

Minería Chilena. (2021, 27 agosto). *La relevancia de la desalinización en el futuro de Minera Los Pelambres*. Recuperado 3 de mayo de 2022, de <https://www.mch.cl/2021/08/25/la-relevancia-de-la-desalinizacion-en-el-futuro-de-minera-los-pelambres/#>

Ministerio de Energía. (2020a). *Carbono Neutralidad en el Sector Energía; proyección de consumo energético nacional 2020*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe_resumen_cn_2019_v07.pdf

Ministerio de Energía. (2020b, noviembre). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

Ministerio de Energía & Ministerio de Minería. (2021, junio). *Chile's Green Hydrogen Strategy and investment opportunities*.

https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/green_h2_strategy_chile.pdf

Ministerio de Medio Ambiente. (s. f.). *¿Qué es el Cambio Climático? – Cambio Climático*. [cambioclimatico.mma.gob](https://cambioclimatico.mma.gob.cl/que-es-el-cambio-climatico/). Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/que-es-el-cambio-climatico/>

Ministerio de Relaciones Exteriores. (2017, 23 mayo). *Decreto 30 (23-may-2017) M. de Relaciones Exteriores | Ley Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. www.bcn.cl/leychile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1103158>

Missimer, T. M., Ghaffour, N., Dehwah, A. H., Rachman, R., Maliva, R. G., & Amy, G. (2013). Subsurface intakes for seawater reverse osmosis facilities: Capacity limitation, water quality improvement, and economics. *Desalination*, 322(2013), 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.021>

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>

Molina Ruiz, J., & Tudela Serrano, M. L. (2006). Identificación de impactos ambientales significativos en la implantación de parques eólicos: un ejemplo en el municipio de Jumilla (Murcia). *Investigaciones Geográficas*, 41, 145. <https://doi.org/10.14198/ingeo2006.41.09>

Mustafa, J., Mourad, A. A. H., Al-Marzouqi, A. H., & El-Naas, M. H. (2020). Simultaneous treatment of reject brine and capture of carbon dioxide: A comprehensive review. *Desalination*, 483. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114386>

Naciones Unidas. (s. f.). *Cambio climático* | Naciones Unidas. Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

Nazir, M. S., Ali, N., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2020). Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13(2020), 85–90.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.002>

Niermann, M., Timmerberg, S., Drünert, S., & Kaltschmitt, M. (2021). Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(2021).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110171>

Nugent, D., & Sovacool, B. K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 65(2014), 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048>

Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2021). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 153–188.
<https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>

Ozbilen, A., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods. *Environmental Impact Assessment Review*, 42(2013), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.03.003>

Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of The Total Environment*, 693(2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>

Parlamento Europeo. (2021, 28 octubre). *Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía)*. Europarl.

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>

Qadrdan, M., Saboohi, Y., & Shayegan, J. (2008). A model for investigation of optimal hydrogen pathway, and evaluation of environmental impacts of hydrogen supply system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(24), 7314–7325.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.031>

Renovetec [Reno vetec]. (2018, 13 febrero). *PLANTAS FOTOVOLTAICAS COMO SON COMO FUNCIONAN* [Vídeo]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=FbfYXcoVOXk>

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. *Water Research*, 44(18), 5117–5128. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.036>

Sánchez, A., Nogueira, I., & Kalid, R. (2015). Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops. *Desalination*, 364, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.034>

Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 470–492.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>

Sharma, S., & Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43(2015), 1151–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>

- Sierra Céspedes, M. M., Vásquez Stanescu, C. L., & Ramirez-Pisco, R. (2020). Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 14(2), 74–90. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36089.60004/1>
- Suleman, F., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2015). Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(21), 6976–6987. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.123>
- Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., & Alkasrawi, M. (2021). Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*, 759(2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>
- Tromp, T. K., Shia, R. L., Allen, M., Eiler, J. M., & Yung, Y. L. (2003). Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy on the Stratosphere. *Science*, 300(5626), 1740–1742. <https://doi.org/10.1126/science.1085169>
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261–3270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>
- United Nations Climate Change. (s. f.-a). *Contribuciones determinadas a nivel nacional (NCD)*. unfccc. Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/contribuciones-determinadas-a-nivel-nacional-ndc>
- United Nations Climate Change. (s. f.-b). *Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. unfccc. Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-convention/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>

Universidad de Castilla-La Mancha, Instituto de investigación en Energías Renovables, & Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agronomos y de Montes. (2021, junio). *Informe sobre impactos ambientales asociados a la construcción de plantas solare fotovoltaicas en La Mancha*. https://www.ier.uclm.es/en/global/promotores/otros/instituto-energias-renovables/novedades_medioamb/-/media/12922AAEE352475698AA601ED8FE03CA.ashx

Universidad de Chile. (s. f.). *¿QUÉ ES LA COP?* uchile. Recuperado 28 de julio de 2022, de <https://www.uchile.cl/noticias/156507/que-es-la-cop>

UPLA. (2021, 23 septiembre). *Las desaladoras buscan minimizar su impacto en el medio ambiente*. Noticias de la Universidad de Playa Ancha. <https://www.upla.cl/noticias/2021/09/23/las-desaladoras-buscan-minimizar-su-impacto-en-el-medio-ambiente/>

Veolia [Veolia Water Technologies]. (2016, 7 septiembre). *Desalación de agua de mar: así es como lo hacemos* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=n8t9nU7wzLw>

Wang, S., & Wang, S. (2015). Impacts of wind energy on environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49(2015), 437–443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.137>

Wulf, C., & Kaltschmitt, M. (2016). Environmental impacts of hydrogen use in vehicles. *Compendium of Hydrogen Energy*, 337–358. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-364-5.00015-4>

Wulf, C., Reuß, M., Grube, T., Zapp, P., Robinius, M., Hake, J. F., & Stolten, D. (2018). Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. *Journal of Cleaner Production*, 199(2018), 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.180>

Zeceña, D. (2020). Diseño y fabricación de un electrolizador para su aplicación en la

obtención de hidrógeno como combustible (Trabajo de Graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala). <http://www.repositorio.usac.edu.gt/15507/>

Zhao, G., Kraglund, M. R., Frandsen, H. L., Wulff, A. C., Jensen, S. H., Chen, M., & Graves, C. R. (2020). Life cycle assessment of H₂O electrolysis technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23765–23781.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.282>