

Recomendaciones de política pública para el desarrollo de un mercado de amoníaco verde en Chile

INVESTIGADORES¹

ENZO SAUMA

Facultad de Ingeniería UC e Instituto Milenio en Amoníaco Verde como Vector Energético – MIGA

MAURICIO ISAACS

Facultad de Química y de Farmacia UC e Instituto Milenio en Amoníaco Verde como Vector Energético - MIGA

PAMELA DELGADO

Instituto Milenio en Amoníaco Verde como Vector Energético – MIGA

Resumen²

En 2020, Chile lanzó una estrategia nacional para impulsar la industria del hidrógeno verde, sin embargo, para el éxito de esta estrategia es fundamental definir el vector energético a utilizar para el transporte del hidrógeno verde a grandes distancias. El amoníaco verde se presenta como una alternativa sustentable y costo-efectiva para el almacenamiento y transporte de energía, por lo que este trabajo busca desarrollar un conjunto de recomendaciones de política pública para el desarrollo de su mercado en el país. La principal propuesta de política pública consiste en incorporar el Análisis Cuantitativo de Riesgos como herramienta elemental para determinar si una infraestructura puede o no emplazarse en un territorio. Otra sugerencia importante es evaluar la regulación del amoníaco como combustible.

La implementación del amoníaco como combustible y su integración en la planificación territorial representan oportunidades significativas para el desarrollo sostenible y la transición energética de Chile. Sin embargo, para aprovechar plenamente estos beneficios, es esencial abordar los desafíos técnicos, de seguridad y regulatorios identificados. La adopción del Análisis

1 Los investigadores agradecen el trabajo de la ayudante de investigación Francisca Meriño, alumna de postgrado de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

2 Esta propuesta fue presentada en un seminario organizado por el Centro de Políticas Públicas UC el 26 de noviembre de 2024, en el que participaron Silvia Díaz, presidenta del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Conocimiento e Innovación para el Desarrollo, Álex Santander, jefe de División de Planificación Estratégica y Desarrollo Sostenible del Ministerio de Energía, y Pablo Hojman, vicepresidente de Desarrollo de Negocios de Mejillones Ammonia Energy.

Cuantitativo de Riesgos como herramienta para la planificación territorial permite evaluar de manera objetiva y estandarizada los riesgos asociados con instalaciones industriales peligrosas, como las plantas de amoníaco, independientemente de su ubicación o uso final. Esto no solo mejora la seguridad pública y ambiental, sino que también proporciona claridad regulatoria.

Por otra parte, el fomento de la investigación y desarrollo a través de un Consorcio Tecnológico especializado en el uso del amoníaco como combustible es clave. Esta estructura permitiría coordinar esfuerzos entre instituciones, empresas y el sector público para superar los desafíos técnicos y fortalecería la formación de capital humano especializado en el manejo del amoníaco.

Adicionalmente, una política integral que apoye y acelere la transición energética debe contemplar tanto los aspectos técnicos como los sociales que influyen en su desarrollo y aceptación, incluyendo la sensibilización de las comunidades y la capacitación de quienes estarán involucrados en su manejo.

1. Introducción

El hidrógeno verde, producido exclusivamente a partir de fuentes de energía renovable, se está consolidando como un elemento clave en la transición hacia una economía global con cero emisiones netas de gases de efecto invernadero. Este recurso energético representa una solución viable para descarbonizar sectores donde el uso directo de electricidad renovable en reemplazo de combustibles convencionales resulta técnicamente inviable o económicamente poco rentable, tales como la industria de transporte pesado, el transporte marítimo, la aviación y el almacenamiento estacional de energía.

Además, el hidrógeno verde y sus derivados, como el amoníaco verde, facilitan el transporte de energía generada en regiones con un alto potencial de recursos renovables hacia áreas que demandan significativas cantidades de ella, pero que enfrentan limitaciones en el suministro o altos costos de producción. En este contexto, el comercio internacional puede desempeñar un papel crucial al equilibrar la oferta y la demanda, mediante el transporte de hidrógeno verde y sus derivados. La capacidad de producción de algunas economías y regiones puede no ser suficiente para satisfacer su demanda interna, lo que puede generar que la importación de hidrógeno verde desde lugares con costos de producción más bajos sea una opción más económica (Irena WTO OMC, 2023).

En 2020, Chile lanzó una estrategia nacional para impulsar la industria del hidrógeno verde, con el objetivo de convertirse en uno de los principales productores mundiales para el año 2040. Esta estrategia se centra en tres metas: desarrollar cinco GW de capacidad de electrólisis para el 2025, producir el hidrógeno verde más barato del mundo para el 2030 y estar entre

los tres principales exportadores para el 2040. Estas iniciativas buscan posicionar al país como líder en producción y exportación de hidrógeno verde, aprovechando sus recursos renovables y fomentando la inversión en este sector emergente, que podría tener un impacto significativo en la economía y la transición energética del país (Ministerio de Energía, 2020).

Para operativizar la exportación de energía en el marco de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, es fundamental definir el vector energético a utilizar. Aunque el transporte de hidrógeno es tecnológicamente viable, resulta costoso y poco eficiente. Además, el hidrógeno es altamente volátil y presenta una baja densidad energética por unidad de volumen, lo que implica que su almacenamiento en forma gaseosa requiere un espacio considerable. Por esta razón, se prefiere guardarlo en estado líquido; sin embargo, esto demanda altas presiones y temperaturas extremadamente bajas, lo que plantea desafíos económicos significativos.

Transformar el hidrógeno en amoníaco (NH_3) al momento de su producción, se presenta como una alternativa prometedora para el almacenamiento y transporte de energía. El amoníaco se considera “verde” cuando se produce utilizando energía renovable para la electrólisis del agua y la síntesis de amoníaco, evitando así emisiones de CO_2 (Giddey et al., 2020). A diferencia del amoníaco convencional, que utiliza hidrógeno derivado de gas natural, el amoníaco verde minimiza la huella de carbono (International Energy Agency, 2021). Además, el amoníaco no contiene carbono en su estructura molecular, lo que lo convierte en un verdadero vector de hidrógeno, con cero emisiones de dióxido de carbono cuando se genera de forma renovable.

Comparado con otros vectores energéticos del hidrógeno, como el hidrógeno líquido o gaseoso, el amoníaco presenta ventajas significativas en términos de almacenamiento y transporte. Permite almacenar entre 1,7 y 3,1 veces más hidrógeno que el hidrógeno puro en forma líquida o gaseosa, respectivamente (Cheddie, 2022). Estas características lo posicionan como una opción costo-efectiva para la transición hacia una economía de energía limpia.

Así, en la última década, el amoníaco verde se ha visualizado como una forma de almacenar energía renovable de manera simple, segura y económica, y como un transportador de hidrógeno verde. La economía del amoníaco verde se basa en el alto potencial del amoníaco para reemplazar los combustibles fósiles en muchas aplicaciones, puesto que actúa como un vector energético, igual que el hidrógeno. También, como el hidrógeno, puede usarse directamente en vehículos pesados, buques, equipamiento pesado de minería, etc. (Sauma, 2023).

Sin embargo, aunque la cadena de valor del amoníaco es bien conocida a nivel mundial, en Chile no existe experiencia práctica a gran escala en este ámbito, ya que todo el amoníaco utilizado en el país es importado exclusiva-

mente por Enaex (Empresa Nacional de Explosivos) desde Estados Unidos (Banco Central de Chile, 2024). Además, el uso del amoníaco como vector energético y/o como combustible presenta desafíos adicionales en términos de su integración en el sistema energético nacional. El desarrollo de un mercado de amoníaco verde, tanto a nivel mundial como nacional, enfrenta desafíos significativos debido a las características inherentes del amoníaco, como la toxicidad, corrosividad y olor desagradable (Zhao, Zhang y Yang, 2021). Estos factores pueden influir en la aceptación social y técnica del amoníaco verde, limitando su adopción y desarrollo (International Energy Agency, 2021). Para superar estos retos y consolidar la industria en Chile, es fundamental implementar políticas públicas robustas y oportunas que faciliten el desarrollo de proyectos relacionados con el amoníaco verde, considerando adecuadamente el nivel de riesgo asociado. La identificación y gestión de ellos son esenciales para garantizar la viabilidad y sostenibilidad del mercado.

La implementación del amoníaco como combustible y su integración en la planificación territorial representan oportunidades importantes para el desarrollo sostenible y la transición energética de Chile. Para aprovechar estos beneficios, es esencial adoptar un enfoque integral que contemple tanto los aspectos técnicos como los sociales, incluyendo la sensibilización de las comunidades y la capacitación de quienes estarán involucrados en su manejo.

El problema de estudio que se aborda en este trabajo procura analizar y proponer recomendaciones de política pública en torno a los siguientes antecedentes clave:

- En Chile el amoníaco está regulado como sustancia peligrosa y dicha regulación no necesariamente es adecuada o suficiente para el uso del amoníaco como vector energético y/o como combustible.
- Para desarrollar un mercado del amoníaco verde como vector energético y/o combustible, se requiere estudiar la regulación asociada al manejo seguro, la salud de los trabajadores, su transporte y almacenamiento, su producción, y en general todas las actividades que se derivan del desarrollo de esta industria, incluyendo una adecuada gestión del riesgo.
- Dado el gran número de proyectos de producción de amoníaco verde que se están desarrollando actualmente, resulta fundamental que se establezca una normativa robusta específica para el amoníaco, la cual permita definir los lineamientos necesarios para manejar de manera segura este producto en cualquiera de las etapas de su cadena de valor.

La experiencia internacional en el manejo del amoníaco y la implementación de estrategias de hidrógeno limpio proporciona valiosas lecciones para el desarrollo de políticas públicas en Chile (Zhao, Zhang y Yang, 2021). Destacan que las políticas públicas juegan un papel crucial en la promoción de tecnologías verdes, subrayando la importancia de un enfoque integral para abordar

los obstáculos técnicos y sociales, lo que facilitará la consolidación de la industria del amoníaco verde en Chile y contribuirá a una transición energética alineada con el respeto al medioambiente y la seguridad de las personas.

2. Objetivos y metodología

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un conjunto de recomendaciones de política pública para el desarrollo de un mercado de amoníaco verde en Chile.

Los objetivos específicos incluyen:

- Recopilar y analizar experiencia internacional de países clave con relación a la regulación del amoníaco.
- Identificar las regulaciones y políticas públicas en Chile que tienen incidencia en el desarrollo de proyectos de producción, almacenamiento, transporte y uso de amoníaco.
- Desarrollar un análisis que incorpore la visión de los actores relevantes, públicos y privados, de los pilares regulatorios que permitan establecer la industria del amoníaco que se desea construir en Chile.
- Plantear medidas concretas de política pública para alcanzar la visión integral construida.

La metodología utilizada tiene tres etapas principales. La primera es el análisis bibliográfico, donde se recopila información sobre experiencias regulatorias internacionales y se mapea el marco normativo chileno en torno al amoníaco verde. En la segunda etapa, se identifican brechas regulatorias y se desarrollan propuestas conceptuales mediante reuniones con actores clave de los sectores público, privado y académico, buscando una visión compartida sobre sostenibilidad, seguridad y competitividad. Finalmente, la tercera etapa se enfoca en la creación de medidas de política pública, incluyendo incentivos, normativas específicas y colaboraciones, para promover un desarrollo sostenible de la industria del amoníaco verde en el país.

3. Antecedentes y diagnóstico

3.1 Mercado actual del amoniaco en Chile

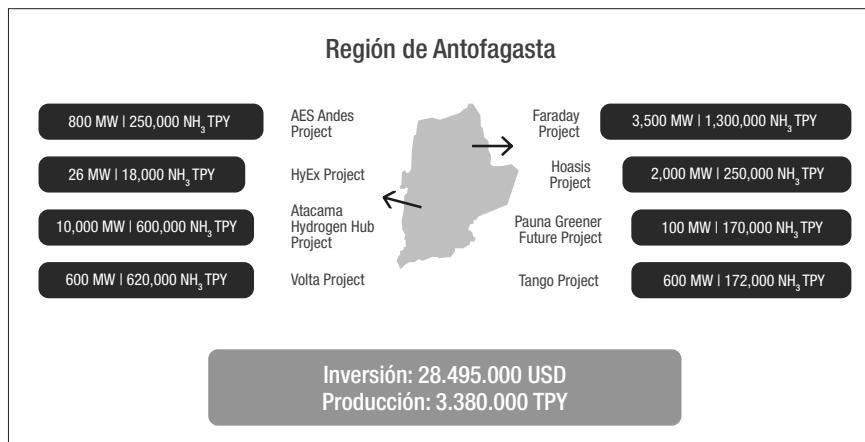
Actualmente todo el amoníaco que se utiliza en el país está asociado a las operaciones de la empresa Enaex, la cual importa este insumo principalmente para la producción de nitrato de amonio (como explosivo para minería) en su planta Prillex de Mejillones (Fuster, Arteaga y Fariás, 2022). Este complejo cuenta con una capacidad de producción nominal de 850.000 toneladas anuales de nitrato de amonio (Feller-Rate, 2023). El amoníaco llega en su totalidad a un terminal marítimo, propiedad de Enaex, ubicado en la misma localidad de

Mejillones, con una capacidad de recepción de 326 ton/hora. La importación anual de este producto alcanza aproximadamente 350 kton en forma de amoníaco líquido (refrigerado) (Superintendencia de Medioambiente, 2019).

Actualmente, se están desarrollando 16 proyectos de producción de amoníaco verde a gran escala en Chile, tanto para exportación como para uso doméstico. Dentro de los posibles usos domésticos se encuentra la fabricación de fertilizantes nitrogenados, fundamentales para mejorar la calidad del suelo y aumentar los rendimientos agrícolas (International Fertilizer Association, 2022). Además, el amoníaco se incorpora en productos de limpieza domésticos por sus propiedades desinfectantes, ofreciendo una alternativa más sostenible a los productos químicos convencionales (EPA, 2021). También puede usarse en la industria alimentaria como refrigerante y aditivo, contribuyendo a la seguridad alimentaria (FDA, 2020). Asimismo, su potencial como portador de hidrógeno podría facilitar la transición hacia energías más limpias en los hogares chilenos (International Energy Agency, 2021).

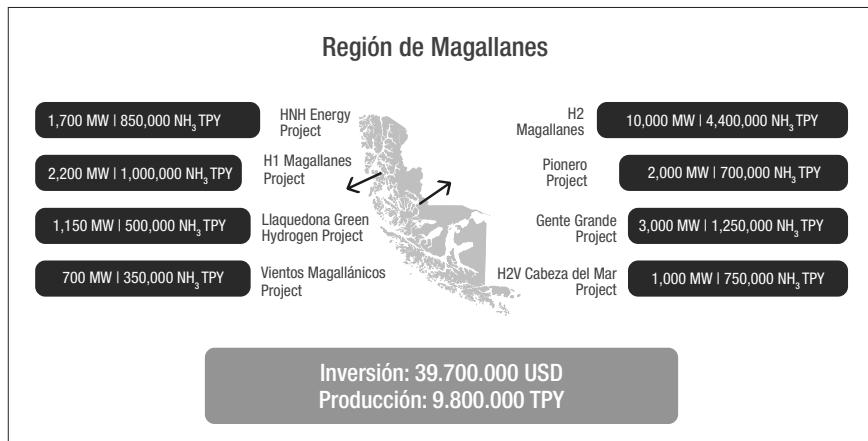
La mayoría de estos proyectos se concentran en las regiones de Antofagasta y Magallanes, donde el potencial de energía solar y eólica se encuentra entre los más grandes a nivel mundial (ver figuras 1 y 2).

Figura 1. Proyectos informados de amoníaco verde en la Región de Antofagasta con potencia (MW) y producción (TPY-Tons per year)



Fuente: elaboración propia con base en mapa de proyectos publicado por H2 Chile e información pública de los proyectos (H2 Chile, 2024).

Figura 2. Proyectos informados de amoníaco verde en la Región de Magallanes con potencia (MW) y producción (TPY-Tons per year)



Fuente: elaboración propia con base en mapa de proyectos publicado por H2 Chile e información pública de los proyectos (H2 Chile, 2024).

La cadena de valor del amoníaco abarca todas las etapas desde su producción hasta su consumo, integrando aspectos clave que garantizan su manejo eficiente y seguro. Esta comienza con la producción en la planta Haber-Bosch, donde se sintetiza amoníaco a partir de nitrógeno e hidrógeno, lo cual es fundamental para la calidad del producto (International Energy Agency, 2021). A continuación, el amoníaco es transportado mediante infraestructuras marítimas y terrestres, que incluyen terminales marítimos, buques, camiones y amoniaductos. Esta logística es crucial para asegurar que el producto llegue a los puntos de almacenamiento y distribución de manera oportuna (EPA, 2021).

Una vez en el mercado, el amoníaco es almacenado en plantas diseñadas para mantener su seguridad y eficiencia. Su consumo se diversifica en aplicaciones que incluyen la fabricación de fertilizantes, productos de limpieza y su uso en la generación eléctrica. Esta versatilidad subraya la importancia del amoníaco en la economía circular y la transición energética, donde se busca integrar fuentes renovables y reducir la huella de carbono (International Fertilizer Association, 2022). Así, la cadena de valor del amoníaco no solo optimiza su producción y distribución, sino que también potencia su relevancia en un contexto de sostenibilidad y desarrollo industrial (International Energy Agency, 2021).

Respecto al alcance de este estudio, en relación con las políticas públicas asociadas al desarrollo de un mercado de amoníaco verde en Chile, es necesario definir qué instrumentos de política pública se considerarán en el

análisis, debido a que los proyectos de amoníaco, en general, contemplan las siguientes etapas de la cadena de valor (ver Figura 3):

- Producción: puede incluir desde el proyecto de generación de energía renovable de gran escala, la unidad de producción de hidrógeno, la unidad de producción de nitrógeno, la planta de producción de amoníaco y otros procesos anexos tales como plantas desaladoras de agua.
- Almacenamiento y transporte: estanques de almacenamiento de amoníaco, amoniaductos³, transporte terrestre y transporte marítimo.
- Exportación o consumo local: la exportación se prevé que sea realizada vía marítima con destino a Europa o Asia, principalmente. El consumo local puede incluir el uso para fabricación de fertilizantes, explosivos o uso directo como combustible.

Figura 3. **Cadena de valor del amoníaco**



Fuente: elaboración propia.

Estas etapas de la cadena de valor se ven afectadas por planes, incentivos y regulaciones asociadas al amoníaco de manera transversal. Se revisaron las regulaciones relativas a salud ocupacional⁴, seguridad⁵, transporte⁶ y medioambiente⁷. Posteriormente, y a partir de las entrevistas con actores clave, se identificó que las principales problemáticas regulatorias y de política que inciden en el desarrollo o aceleración del mercado del amoníaco verde en Chile se asociaban a temáticas como la planificación territorial, cuya regulación no fue identificada inicialmente, pero que fue incluida en el análisis. A continuación, se presenta una revisión consolidada de las regulaciones y políticas investigadas, tanto a nivel nacional como internacional.

³ Cabe mencionar que el único ducto de amoníaco existente en Chile es de propiedad privada de Enaex y se usa solo para descarga del amoníaco desde los buques que lo traen al país. La norma que rige el diseño de este ducto se basa en la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). En Chile, actualmente no existe una regulación sobre los ductos de amoníaco como medio de transporte interno.

⁴ Se incluyen todas aquellas regulaciones que buscan proteger la salud de los trabajadores que interactúan con el amoníaco en alguna etapa de la cadena de valor.

⁵ Se incluyen las regulaciones que buscan prevenir daños de posibles accidentes que afecten a terceros o al medioambiente.

⁶ Se refiere a las normas específicas aplicables al transporte terrestre o marítimo.

⁷ Se refiere a las regulaciones que buscan limitar daños potenciales directos del amoníaco, producidos por emisiones al aire o descargas a cuerpos de agua. No se incluye aquí el análisis de los impactos ambientales potenciales de otros componentes de los proyectos industriales.

3.2 Análisis de políticas y regulaciones nacionales e internacionales

La experiencia internacional en el manejo del amoníaco proporciona valiosas lecciones para el desarrollo de políticas públicas en Chile. Se eligió revisar las políticas y regulaciones de Estados Unidos, la Unión Europea, China y Japón. Estos actores clave son líderes en la producción y/o consumo de amoníaco y son referentes avanzados en el desarrollo del mercado de amoníaco verde. Esto se debe a sus inversiones en tecnologías limpias, la integración del compuesto en sus estrategias energéticas y el impulso de la innovación en sus procesos industriales. Además, son países a los cuales Chile apunta como destinos para las potenciales exportaciones futuras de amoníaco renovable. También, se incluyó el caso específico de Países Bajos en cuanto a la planificación territorial basada en riesgos, un enfoque que ha sido pionero en la integración de políticas ambientales y de seguridad industrial en la gestión del amoníaco.

El amoníaco, como sustancia química clave en diversas industrias, está sujeto a rigurosas normativas en varias regiones del mundo. Cada territorio aborda la gestión, el transporte y la regulación ambiental del amoníaco desde perspectivas que reflejan tanto sus prioridades industriales como sus preocupaciones de salud pública, seguridad y sostenibilidad.

a) Estados Unidos

En Estados Unidos, la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) es la entidad encargada de establecer regulaciones para proteger a los trabajadores expuestos a sustancias peligrosas. Las normativas de OSHA abarcan varios aspectos esenciales de la gestión segura de procesos y se enfocan en estándares dentro de las instalaciones. Por un lado, la OSHA 1910.111 (OSHA, 2024a) regula el diseño, la construcción y la operación de sistemas de amoníaco anhidro, estableciendo criterios técnicos que garantizan la integridad de los equipos y la seguridad durante su uso. En paralelo, la OSHA 1910.119 (OSHA, 2024b) se enfoca en evitar fugas catastróficas de sustancias químicas mediante la gestión de riesgos y la implementación de planes de respuesta ante emergencias. Esta normativa obliga a las empresas a llevar a cabo análisis de riesgos detallados, permitiéndoles anticipar y prevenir incidentes antes de que ocurran.

Otra normativa relevante es la OSHA 1910.1000 (OSHA, 2024c), que establece los límites de exposición permitida para los trabajadores, fijando un máximo de 50 ppm (partes por millón) en jornadas de ocho horas semanales. Esto protege a los empleados de los efectos nocivos de una exposición prolongada al amoníaco. Además, la OSHA 1910.1200 (OSHA, 2024d) exige que las sustancias peligrosas estén adecuadamente etiquetadas y acompañadas de hojas de datos de seguridad, garantizando que los empleados tengan acceso a la información necesaria para su protección.

Las normativas en Estados Unidos que abarcan la seguridad técnica incluyen Códigos como el ASME B31.4 y B31.3 que aseguran que las tuberías y sistemas de proceso utilizados en el transporte de amoníaco cumplan con altos estándares de seguridad. De forma complementaria, la normativa ISO 5771:2024 se enfoca en las mangueras de caucho utilizadas para transferir amoníaco, garantizando su seguridad bajo distintas condiciones operativas (Valera-Medina y Banares-Alcantara, 2021).

El transporte de amoníaco en Estados Unidos también está estrictamente regulado. Las normas federales cubren todos los aspectos del manejo de materiales peligrosos, desde el embalaje y etiquetado hasta la documentación y los procedimientos de emergencia. Además, el Programa de Seguridad de Nitrato de Amonio busca minimizar la posibilidad de que este compuesto sea utilizado con fines terroristas, reforzando la seguridad en su transporte y almacenamiento. Por otro lado, la protección del medioambiente es gestionada a través de la Environmental Protection Agency (EPA), que, mediante la Ley Epcra⁸ (EPA, 2024), exige que las empresas reporten cualquier incidente relacionado con sustancias peligrosas y mantengan hojas de datos de seguridad disponibles para las autoridades locales.

En el ámbito de la política pública, Estados Unidos ha identificado al hidrógeno como un pilar estratégico en la descarbonización, con un enfoque significativo en la producción de amoníaco, que en 2021 consumió el 35% del hidrógeno generado en el país. La iniciativa *Hydrogen Shot* (US Government, 2024) tiene como objetivo alcanzar un costo de un dólar por kilogramo de hidrógeno limpio para el 2030, lo que podría impulsar la transición hacia un modelo más sostenible. Además, la creación de *hubs* de hidrógeno busca conectar productores y consumidores, fomentando redes regionales que aceleren la adopción del hidrógeno y su aplicación en la industria del amoníaco.

b) Unión Europea

En la Unión Europea, la salud y la seguridad de los trabajadores también son una prioridad en la regulación del amoníaco. La Directiva 2000/39/EC establece límites de exposición permitida, con un máximo de 20 ppm para jornadas laborales estándar y 50 ppm para exposiciones de corto plazo. Estas normativas, conocidas como Límites de Exposición Ocupacional (OELs), garantizan que los empleados trabajen en entornos seguros, minimizando los riesgos para su salud. Además, la Directiva de Equipos a Presión regula el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas que operan con amoníaco, asegurando que cumplan con los estándares de seguridad exigidos por la Unión Europea (Valera-Medina y Banares-Alcantara, 2021).

8 Emergency Planning and Community Right-to-Know Act.

El transporte seguro del amoníaco dentro de la Unión Europea se rige por la Directiva 2008/68/CE, que regula el movimiento de mercancías peligrosas tanto por carretera como por vías navegables. Los acuerdos internacionales, como el ADR⁹ y el ADN¹⁰, complementan estas regulaciones, asegurando que los estándares se mantengan consistentes en toda Europa. El Reglamento (CE) Nº 1272/2008 también juega un papel importante al definir pautas claras para la clasificación y etiquetado de sustancias peligrosas, promoviendo la transparencia y la comunicación eficaz de riesgos.

En cuanto a las políticas públicas, la Unión Europea ha adoptado una visión estratégica para promover el hidrógeno verde y el amoníaco renovable en su transición hacia la carbono-neutralidad para el 2050. La Estrategia de Hidrógeno de la UE busca fomentar la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, promoviendo la instalación de 40 GW de capacidad de electrólisis para el 2030. Gran parte del hidrógeno producido se destinará a la fabricación de amoníaco verde, contribuyendo a la descarbonización de sectores industriales difíciles de electrificar.

Un caso particular que se analizó en la UE debido a su relevancia en las propuestas que se realizan en este estudio es el de la planificación territorial basada en riesgos de Países Bajos. Para ello, se requiere una evaluación cuantitativa de riesgos (QRA) como parte de los procedimientos de autorización para instalaciones que manejan amoníaco. Con el fin de llevar a cabo estas evaluaciones (QRA), se utiliza el software Safetnl, que realiza cálculos de dispersión y determina las curvas de iso-riesgo de 10^{-6} . Las distancias de seguridad se representan mediante los conceptos de “*invloedsgebied*” y “*Gifwolkaandachtsgebied*” (GAG) (Institute for Sustainable Process Technology, 2024).

El “*invloedsgebied*” se refiere a la distancia que conduce a una tasa de letalidad del 1%, basada en funciones del tipo probit, que consideran los gradientes de concentración y el tiempo de exposición a la nube tóxica. Por su parte, el GAG se define como la distancia en la que la concentración es 2,54 veces mayor que los valores considerados amenazantes para la vida, tras una exposición de 30 minutos. El GAG depende principalmente de la liberación inicial (*flash*), mientras que el “*invloedsgebied*” también está influenciado por el tamaño de la fuente de amoníaco. Es importante considerar los diferentes escenarios, las tasas de fallo y las condiciones específicas en cada caso.

La serie de directrices PGS (*Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen*), actualizada en julio de 2024, regula la producción, almacenamiento, transporte y uso seguro de productos químicos peligrosos. La PGS 12 (PGS Program Office,

9 Acuerdo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera.

10 Acuerdo Europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por vías de navegación interior.

2024) es la directriz específica para el almacenamiento y carga seguros de amoníaco, y su objetivo es establecer las medidas necesarias para controlar los riesgos asociados. Estas medidas están basadas en un enfoque de riesgo que considera los escenarios posibles. A partir de ellos, se formulan objetivos que buscan crear un nivel aceptable de seguridad. Las medidas propuestas reducen la probabilidad de un incidente o mitigan las consecuencias adversas en caso de que ocurra (PGS Program Office, 2017).

c) China

China ha desarrollado un marco regulatorio específico para la gestión del amoníaco, dirigido por la Administración Estatal de Seguridad Laboral (SAWS). Esta entidad es responsable de supervisar la seguridad laboral y garantizar que las operaciones industriales cumplan con las normativas vigentes. En el ámbito de la salud ocupacional, el estándar GBZ 2.1-2007 establece que la concentración permitida de amoníaco en el aire laboral no debe superar los 20 mg/m³ (~29 ppm) como promedio ponderado en el tiempo (PC-TWA) y 30 mg/m³ (~43 ppm) para exposiciones de corto plazo (PC-STEL). Las empresas están obligadas a implementar controles periódicos del aire y proporcionar equipo de protección adecuado a sus empleados (Fecke, Garner y Cox, 2016).

Por otra parte, las empresas que manejan amoníaco, para poder operar, deben obtener licencias específicas, ya sea para su producción, importación, distribución o almacenamiento. Estos permisos se gestionan mediante el Centro Nacional de Registro de Productos Químicos de la SAWS, que emite certificados con una vigencia de tres años. Además, las instalaciones industriales deben cumplir con estándares técnicos detallados para garantizar la seguridad de sus operaciones. El Código GB 50016 de Diseño de Protección contra Incendios en Edificios define las distancias mínimas de separación entre las áreas de almacenamiento de amoníaco y otras estructuras, y la Regulación de Supervisión Técnica TSG R0004-2009 para Recipientes a Presión Estacionarios establece las características técnicas que deben cumplir los cilindros de amoníaco líquido. El manejo de tanques y cilindros de amoníaco está normado por la Regulación de Supervisión TSG RF001 sobre Tecnología de Seguridad para Accesorios de Cilindros de Gas, que especifica la necesidad de almacenar los recipientes en áreas ventiladas, alejadas de fuentes de calor, con conexión a tierra adecuada para evitar accidentes.

El transporte del amoníaco se encuentra bajo las Regulaciones JT/T 617-2018, que estipulan procedimientos específicos para su traslado seguro por carretera, incluyendo requisitos para el embalaje, etiquetado y la preparación de documentos que permitan una respuesta adecuada en caso de emergencia.

En cuanto a la protección ambiental, el GB 13458-2013 Norma de Descarga de Contaminantes del Agua para la Industria del Amoníaco regula

las emisiones líquidas de las instalaciones que manejan esta sustancia. Esta normativa impone límites a las descargas de nitrógeno en cuerpos de agua, con el objetivo de controlar la contaminación y evitar la eutrofización en ríos y lagos. Además, se promueve el uso de tecnologías de tratamiento de aguas residuales para mitigar los impactos ambientales de las plantas industriales.

Desde sus políticas públicas, China está impulsando la transición hacia el uso de hidrógeno verde en la producción de amoníaco. Como parte de este cambio, se han desarrollado proyectos piloto en regiones con recursos renovables abundantes, como Mongolia Interior. Estos proyectos utilizan fuentes de energía solar y eólica para generar hidrógeno mediante electrolizadores, que luego se emplea en la síntesis de amoníaco sin emisiones de carbono.

El gobierno también ha comenzado a implementar estrategias de cocombustión de amoníaco en plantas de carbón, con el objetivo de reducir las emisiones sin desmantelar la infraestructura existente. La Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma (NDRC) ha fijado un objetivo de reducir las emisiones de dióxido de carbono en 13 millones de toneladas para el año 2025, lo que incluye la modernización de las instalaciones existentes y la construcción de nuevas plantas capaces de producir amoníaco verde. Además, China ha invertido en la expansión de su capacidad de generación de energías renovables y en la producción de electrolizadores, buscando reducir los costos asociados al amoníaco renovable a largo plazo (Valera-Medina y Banares-Alcantara, 2021).

d) Japón

Japón regula la gestión del amoníaco a través de un marco normativo que abarca la seguridad laboral, el transporte, el almacenamiento y la protección ambiental. El Acta de Seguridad e Higiene Industrial establece los estándares para garantizar que los trabajadores operen en entornos seguros y saludables. Esta ley obliga a las empresas a implementar medidas de seguridad para prevenir accidentes laborales y a proporcionar equipos de protección personal (EPP) adecuados. Además, se realizan inspecciones periódicas para asegurar el cumplimiento de las normativas. El Acta de Marineros cubre a los trabajadores del sector marítimo, regulando las condiciones de trabajo y los protocolos de seguridad relacionados con el manejo de sustancias peligrosas, incluyendo el amoníaco, a bordo de embarcaciones (Otsuki, 2024).

La seguridad en el manejo del amoníaco está regulada por varias leyes específicas. El Acta de Seguridad de Gases a Alta Presión (*HPGS Act*) controla la producción, almacenamiento, venta y transporte de gases como este. Esta normativa impone requisitos técnicos rigurosos para las instalaciones que manejan gases a alta presión y exige que las empresas obtengan permisos para operar. La Ley del Servicio de Bomberos regula el almacenamiento y transporte de grandes cantidades de amoníaco, prohibiendo el movimiento simultáneo de gas a alta presión junto con otras sustancias peligrosas. Además, esta ley es-

tablece que las instalaciones que almacenan 200 kilogramos o más de amoníaco deben contar con sistemas de seguridad específicos para evitar accidentes.

La Ley de Normas de Edificación regula la construcción de edificios industriales donde se maneja gas comprimido o licuado. Esta normativa establece que las instalaciones deben cumplir con estándares de seguridad en su diseño y construcción para prevenir fugas y explosiones. Por otro lado, la Ley para la Prevención de Desastres en Complejos Industriales de Petróleo y Otras Instalaciones de Petróleo se enfoca en la prevención de emergencias en grandes instalaciones industriales, incluyendo aquellas que manejan amoníaco, estableciendo medidas de contingencia y planes de respuesta ante desastres.

El transporte de amoníaco en Japón está regulado por varias leyes que aseguran su manejo seguro en diferentes modos de transporte. La Ley de Carreteras establece restricciones para el tránsito de vehículos que transportan sustancias peligrosas en túneles y otras infraestructuras subterráneas. El Acta de Seguridad Marítima regula el transporte de materiales peligrosos en buques, especificando los requisitos para la carga, almacenamiento y manejo seguro del amoníaco en el mar. La Ley de Regulaciones Portuarias se activa cuando un buque que transporta amoníaco o sustancias peligrosas ingresa a un puerto designado, estableciendo controles estrictos para minimizar riesgos durante las operaciones portuarias. Por su parte, el Acta de Aeronáutica Civil prohíbe que las aeronaves transporten artículos altamente combustibles o explosivos, incluyendo el amoníaco, para garantizar la seguridad aérea.

Japón también cuenta con regulaciones ambientales que controlan el impacto de las actividades industriales relacionadas con el amoníaco. El Acta de Control de la Contaminación Atmosférica establece límites para las emisiones de contaminantes al aire, donde se regula específicamente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) a la atmósfera. El Acta de Negocios de Gas regula el uso, distribución y almacenamiento de gases, incluyendo el amoníaco, y establece que las instalaciones deben implementar medidas de seguridad para prevenir fugas y accidentes. Esta ley también exige que las empresas mantengan registros detallados de sus operaciones y se adhieran a procedimientos de inspección periódica.

En términos de política energética, Japón lanzó la Estrategia Básica de Hidrógeno (BHS) en junio de 2023, con el objetivo de promover la producción y el uso de hidrógeno y amoníaco de bajas emisiones como parte de su transición hacia una economía descarbonizada para el 2050. Esta estrategia define estándares específicos para el hidrógeno y el amoníaco de baja emisión. El hidrógeno bajo en carbono se refiere a aquel con emisiones “well-to-gate” de 3,4 kg de CO_2e o menos por kilogramo producido, mientras que el amoníaco de baja emisión tiene un umbral “gate-to-gate” de 0,84 kg de CO_2e por kilogramo de amoníaco. Estos estándares permiten orientar la

producción hacia tecnologías que minimicen las emisiones de gases de efecto invernadero (Ministry of Economy, 2022).

Japón también busca fomentar el uso del hidrógeno verde producido a partir de fuentes renovables como la energía solar y eólica, y está desarrollando la infraestructura necesaria para su producción, almacenamiento y distribución. La estrategia incluye la creación de *hubs* de hidrógeno y amoníaco, no solo para satisfacer la demanda interna, sino también para posicionarse como un exportador clave en el mercado internacional. El país ha establecido colaboraciones estratégicas con socios como Australia, que tiene la capacidad de producir hidrógeno verde y exportarlo a Japón.

Japón planea aprovechar estos *hubs* para optimizar la cadena de suministro y facilitar la integración del hidrógeno y el amoníaco en sectores como la industria pesada y el transporte. La inversión en innovación tecnológica es otro componente central de esta estrategia, con el objetivo de mejorar la eficiencia de los procesos de producción y reducir los costos asociados al hidrógeno y al amoníaco de bajas emisiones.

e) Chile

En Chile, la gestión del amoníaco se regula mediante un conjunto de normativas que abordan la salud ocupacional, la seguridad, el transporte, el medioambiente y las políticas públicas. Estas regulaciones buscan proteger tanto a los trabajadores como al entorno, minimizando los riesgos inherentes al manejo de esta sustancia peligrosa.

En términos de salud ocupacional, la Norma NCh1411/4/2015 establece criterios para clasificar los riesgos asociados con sustancias peligrosas en instalaciones industriales. Esta norma utiliza una escala del cero al cuatro para evaluar la peligrosidad de los materiales en función de su impacto en la salud, su inflamabilidad y reactividad, proporcionando un sistema claro de identificación para los lugares donde se fabrican, almacenan o utilizan estas sustancias. Además, el Decreto Supremo N° 594/1999 define un Límite Permisible Ponderado (LPP) de 20 ppm para proteger a los trabajadores de los efectos crónicos del amoníaco y un Límite Permisible Temporal (LPT) de 35 ppm para prevenir la irritación en casos de exposiciones breves. Estas regulaciones obligan a las empresas a monitorear la calidad del aire en los lugares de trabajo y a proporcionar equipo de protección adecuado para garantizar la seguridad de los trabajadores.

En cuanto a la seguridad, el Decreto 43/2016 del Ministerio de Salud regula el almacenamiento de sustancias peligrosas, incluido el amoníaco anhidro. Este decreto establece que el almacenamiento de amoníaco debe realizarse en áreas exclusivas con techos livianos, equipadas con sistemas automáticos de detección de fugas y acciones de control inmediato en caso de emergencia.

Además, se exige el uso de equipos de protección personal y la disponibilidad de al menos dos equipos de respiración autónoma para situaciones de emergencia cuando se almacenen más de cinco cilindros de amoníaco. Este decreto también establece distancias mínimas de seguridad para el almacenamiento a granel, así como sistemas de detección temprana de fugas.

Por su parte, la Resolución 96/11 del Ministerio de Salud regula la manipulación y el almacenamiento de sustancias peligrosas en los puertos del país, incluyendo la clasificación, etiquetado y medidas de seguridad necesarias para minimizar riesgos durante las operaciones de carga y descarga.

El transporte del amoníaco en Chile está regulado por varias normas que aplican tanto por vía terrestre como marítima. La Norma NCh2190/2003 establece los requisitos de identificación de riesgos para el transporte terrestre de amoníaco anhídrico, exigiendo que los vehículos lleven marcado claro, indicando que se trata de un gas tóxico. Esta norma se complementa con la Norma NCh2245 y el Decreto 298, que regulan el etiquetado de sustancias venenosas. El Decreto 298/2003, emitido por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, establece que los vehículos utilizados para el transporte de sustancias peligrosas deben tener una antigüedad máxima de 15 años, estar equipados con tacógrafos para medir la velocidad y contar con sistemas de comunicación por radio o teléfono celular para mantener contacto constante. Además, las normas exigen que los vehículos cumplan con los requisitos de etiquetado y marcado adecuados para garantizar la seguridad durante el transporte.

El transporte marítimo está regulado por el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (DS N° 777/78), que establece las medidas necesarias para el manejo y almacenamiento seguro de sustancias peligrosas en puertos. Asimismo, el Código Internacional para la Construcción y el Equipo de Buques que Transporten Gases Licuados a Granel (Código IGC/CIG) regula el diseño y construcción de buques especializados en el transporte de gases como el amoníaco, asegurando que cumplan con los estándares necesarios para minimizar riesgos durante el transporte marítimo.

Respecto del medioambiente, la protección contra los efectos nocivos de las sustancias peligrosas se rige por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), que es regulado por la Ley N° 19.300 y su respectivo reglamento. Este sistema exige que los proyectos que involucren el uso, almacenamiento o transporte de amoníaco sean sometidos a una evaluación detallada para identificar su impacto ambiental. Dependiendo de la magnitud del proyecto, se puede requerir un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o una Declaración de Impacto Ambiental (DIA). El EIA incluye un periodo de Participación Ciudadana (PAC) y, si corresponde, un Proceso de Consulta a Pueblos Indígenas (PCPI) para garantizar la inclusión de las comunidades afectadas en la toma

de decisiones. Por su parte, las DIA se aplican a proyectos con menor impacto y también pueden incorporar PAC si así lo solicita la ciudadanía.

En cuanto a las políticas públicas, Chile ha adoptado una Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde con el objetivo de posicionarse como líder mundial en la producción y exportación de hidrógeno verde. Esta estrategia aprovecha las ventajas del país en términos de energías renovables, como la solar y la eólica, y busca contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la descarbonización de sectores industriales. La estrategia se divide en tres fases:

- La Fase Inicial (2020-2025) se enfoca en el desarrollo de proyectos pilotos y la creación de capacidades tecnológicas. Durante esta etapa, se promueve la investigación y desarrollo (I+D) en tecnologías de hidrógeno verde para preparar al país para el escalamiento de la producción.
- En la Fase de Escalamiento (2025-2030) se espera aumentar la capacidad de producción de hidrógeno verde tanto para el mercado interno como para la exportación. Esta etapa incluye el despliegue de infraestructura de almacenamiento y transporte para facilitar la distribución del hidrógeno y sus derivados, como el amoníaco verde.
- Finalmente, la Fase de Expansión Global (2030-2040) tiene como objetivo consolidar a Chile como un actor relevante en el mercado internacional del hidrógeno verde. Durante esta fase, se promoverá la exportación de hidrógeno y amoníaco verde a mercados como Asia y Europa, posicionando al país como un proveedor clave en la transición energética global (Ministerio de Energía, 2020).

4. Principales resultados de la revisión bibliográfica

4.1 Análisis comparado

El marco político y regulatorio para la gestión del amoníaco muestra similitudes y diferencias entre Estados Unidos, China, Japón, la Unión Europea (UE), los Países Bajos y Chile. En términos de salud ocupacional, tanto Chile como estos países establecen límites de exposición al amoníaco para proteger a los trabajadores, aunque con variaciones en los valores permitidos. Por ejemplo, en Chile, el LPP es de 20 ppm, similar al límite en la UE y China, pero en Estados Unidos es más alto, con 50 ppm para exposiciones prolongadas. Las normativas de todos estos países coinciden en la obligatoriedad del uso de equipos de protección personal y controles de calidad del aire en el lugar de trabajo.

En cuanto a seguridad, se observa una tendencia compartida hacia la prevención de accidentes mediante normativas que regulan el diseño y operación de instalaciones que manejan amoníaco. Chile, al igual que la UE y Estados Unidos, exige sistemas de detección de fugas y equipos de emergencia.

Sin embargo, algunos países como Japón y China cuentan con regulaciones más específicas para instalaciones industriales de alta presión, reflejando su enfoque en tecnologías complejas.

En el transporte, todos los países aplican estrictas normativas para el traslado de sustancias peligrosas, aunque con matices en los detalles. Mientras que Chile, Estados Unidos y la UE imponen límites de antigüedad y etiquetado en vehículos, Japón y los Países Bajos se centran en protocolos específicos para transporte marítimo. El enfoque de los Países Bajos destaca por su sistema de evaluación de riesgos sofisticado para el manejo de productos químicos.

En términos de protección ambiental, existe un esfuerzo común en todos los países para minimizar los impactos del amoníaco. Tanto Chile como la UE, China y Japón imponen evaluaciones de impacto ambiental, aunque el SEIA de Chile enfatiza la participación ciudadana, lo cual no es tan prominente en otros países. La normativa neerlandesa, en particular, sobresale por su enfoque basado en análisis cuantitativos de riesgo.

En las políticas públicas, Chile destaca por su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, alineada con iniciativas similares en Japón, la UE y China, donde se fomenta la producción de amoníaco verde como parte de la transición energética. Sin embargo, mientras que Japón y la UE se enfocan en la creación de *hubs* de hidrógeno para consolidar mercados internacionales, Chile aún está en etapas tempranas de desarrollo y escalamiento.

En conclusión, aunque todos los países comparten el objetivo de garantizar la seguridad y sostenibilidad en el manejo del amoníaco, las diferencias radican en la especificidad y sofisticación de las regulaciones. Las normativas en Chile están alineadas con estándares internacionales, pero algunos países como Japón y los Países Bajos presentan marcos más avanzados en términos tecnológicos y de gestión de riesgos. Esto refleja las diferencias en capacidades industriales y contextos económicos, aunque el interés común por la transición hacia energías limpias y sostenibles se mantiene como un eje central.

4.2 Desafíos en el desarrollo del mercado de amoníaco verde en Chile

La segunda etapa del estudio consistió en entrevistas con actores clave del ecosistema de amoníaco verde a nivel nacional, incluyendo desarrolladores de proyectos y organismos gubernamentales. Los principales desafíos descubiertos, que requieren ser enfrentados lo antes posible, se enfocan en dos áreas:

- Las regulaciones que determinan los territorios en los cuales puede o no instalarse una infraestructura para la producción, almacenamiento o transporte del amoníaco.
- Las regulaciones y políticas que inciden en el uso del amoníaco como combustible.

Los puntos identificados no coinciden con la hipótesis inicial de este estudio, que plantea que las barreras para el desarrollo de este mercado se encuentran en el marco regulatorio específico relacionado con el amoníaco, analizado previamente en los ámbitos de salud ocupacional, seguridad, transporte y medioambiente. Sin embargo, según los entrevistados, aunque el marco regulatorio puede mejorarse, no constituye la principal barrera para el desarrollo de proyectos. Señalan que, si bien los estándares actuales no son óptimos, resultan suficientes para el avance de los proyectos.

Por estas razones, a continuación, se describe detalladamente los aspectos críticos identificados para el desarrollo del mercado del amoníaco verde en Chile, junto con un análisis complementario de información secundaria y la regulación pertinente a estas temáticas.

a) Planificación territorial y el emplazamiento de infraestructura para la producción, almacenamiento y transporte de amoníaco

En Chile, la planificación territorial está regulada por el decreto N° 47 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de 1992, conocido como la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). Esta normativa define los usos de suelo permitidos en cada zona según los Planes Reguladores Comunales y Metropolitanos, que especifican qué actividades, incluyendo las industriales y energéticas, son viables en cada área. La factibilidad de proyectos como la producción de amoníaco verde depende de la compatibilidad con el uso de suelo asignado. Aunque el amoníaco se regula como sustancia peligrosa debido a su uso tradicional en fertilizantes y explosivos, su empleo como vector de energía derivado del hidrógeno verde representa un desafío regulatorio, ya que las normativas actuales evalúan la viabilidad de las instalaciones industriales según el uso previsto del producto.

En el año 2021, la Ley N° 21.305 modificó el Decreto Ley N° 2.224 de 1978 del Ministerio de Energía, integrando el hidrógeno y sus combustibles derivados en el sector energético. Luego, el Decreto N° 13 de 2022 del mismo ministerio aprobó el Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno y modificó el reglamento de instaladores de gas. Estos cambios permitían interpretar el amoníaco como un derivado del hidrógeno, incluyéndolo en la regulación de infraestructura energética.

Sin embargo, en la Circular Ord. N° 0504 del 21 de noviembre de 2022, la División de Desarrollo Urbano del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (DDU N° 470) aclaró el uso de suelo para edificaciones e instalaciones relacionadas con la generación de hidrógeno. Se distinguió entre instalaciones de hidrógeno como infraestructura energética, pero especificó que si el producto obtenido no forma parte del sector energético (como el amoníaco, donde el hidrógeno es solo un insumo), se clasifica como “Actividades Productivas” según el artículo 2.1.28 de la OGUC, lo que afecta su emplazamiento según los instrumentos de planificación territorial.

Según el artículo 2.1.29 de la OGUC, las “redes y trazados” incluyen componentes como ductos, sin especificar qué sustancias transportan. La Circular Ord. N° 0295 aclara que estos ductos solo son aceptados para infraestructura energética, pero si transportan amoníaco, serían considerados parte de una capacidad productiva y estarían sujetos a restricciones de planificación territorial. Esto hace que la viabilidad de amoniaductos que atraviesen varias comunas con diferentes regulaciones sea prácticamente inviable.

Por otra parte, la Circular B32 04/2020 de la Subsecretaría de Salud establece criterios para clasificar actividades industriales en categorías como “Inofensiva”, “Molesta”, “Peligrosa” o “Contaminante”. En el caso del amoníaco, si se superan los 40.000 m³ de almacenamiento, la instalación se clasifica como “Peligrosa”. En cuanto a la evaluación de riesgos, los criterios detallados no consideran la incorporación de medidas de control o reducción. Por lo tanto, en solicitudes que incluyan tecnologías de abatimiento técnicamente fundamentadas, la Seremi de Salud puede ajustar la calificación, siempre evaluando el rendimiento y la efectividad de las medidas propuestas.

Esto, si bien abre la posibilidad de reducir la severidad de la calificación al considerar las medidas de evaluación y ponderación de los factores de riesgo, no especifica las medidas concretas que se considerarán válidas para dicha solicitud. Lo que podría generar incertidumbre sobre qué tecnologías o prácticas serán aceptadas, complicando la evaluación e implementación de mejoras.

b) Política energética y la regulación del amoníaco como combustible

El 29 de julio de 2024 comenzó la consulta pública sobre el Anteproyecto del Plan Sectorial de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático del Sector Energía. El Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del Sector Energía (en adelante, PSMyA Energía) es un instrumento de gestión climática mandatado por la Ley N° 21.455 o Ley Marco de Cambio Climático (LMCC). Este plan, que es vinculante y está a cargo del Ministerio de Energía, define acciones y medidas destinadas a adaptar el sector al cambio climático, aumentar su resiliencia y reducir o absorber los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Esto respetando presupuesto sectorial de emisiones asignado a cada autoridad en la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP), de acuerdo con el mandato establecido en la referida ley.

El plan establece metas para impulsar tecnologías como el *co-firing*, que consiste en la combustión simultánea de dos o más combustibles en una misma unidad de generación de energía, lo que podría extender la vida útil de la infraestructura existente. Sin embargo, la regulación actual no permite la combustión de amoníaco, ya que no está registrado como combustible. La empresa Guacolda ha estudiado la cocombustión de carbón con amoníaco como una medida para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) dentro de su proceso de generación. Los principales beneficios de esta tecnología son que el

amoníaco no produce CO₂ al quemarse y, además, contribuye a la reducción de las emisiones de MP (Material Particulado) y SO₂ (dióxido de azufre).

Por otro lado, el amoníaco verde puede ser producido a nivel nacional, lo que lo hace menos susceptible a las fluctuaciones de precios internacionales. La central termoeléctrica Guacolda, en Huasco, Región de Atacama, cuenta con cinco unidades generadoras de 152 MW cada una, totalizando 760 MW. Estas unidades utilizan tecnología avanzada para el control de emisiones y emplean amoníaco para reducir los NO_x, cumpliendo con la normativa ambiental.

En cuanto a los avances globales en el uso del amoníaco como combustible, estos se centran principalmente en motores marinos. En Alemania, MAN Energy Solutions está desarrollando motores para barcos que usan amoníaco, con pruebas iniciadas en 2019. La comercialización de motores de dos tiempos para grandes buques está prevista para el 2024, y un paquete de conversión para buques existentes estará disponible en 2025. Además, en 2023 comenzaron a desarrollar un motor de cuatro tiempos. No obstante, el uso del amoníaco presenta desafíos técnicos, como garantizar la seguridad debido a su toxicidad y el desarrollo de tecnologías para controlar la combustión y minimizar la generación de NO_x, especialmente el óxido nitroso (N₂O), que tiene un potencial de efecto invernadero 298 veces superior al del CO₂ (Economic Research Institute for ASEAN and East Asia, 2024).

El amoníaco es un combustible con potencial a largo plazo para el mercado, ofreciendo emisiones de carbono nulas o casi nulas si se controla la generación de NO_x. Puede mezclarse con otros combustibles como carbón, gas natural o diésel para su uso en motores, calderas o turbinas. Sin embargo, la experiencia en su uso es limitada, y tecnologías clave como quemadores y motores aún están en desarrollo. Se requiere investigación sobre la corrosión en componentes expuestos a altas temperaturas, así como el uso de lubricantes adecuados y materiales resistentes al amoníaco a altas temperaturas. Además, hay interés en sistemas de menor escala para aplicaciones específicas.

Las preocupaciones de seguridad en instalaciones de prueba han retrasado algunos de estos desarrollos, lo que hace necesario realizar análisis adicionales y fomentar la colaboración entre las partes interesadas para avanzar en esta tecnología. Es fundamental incrementar el número de proyectos piloto de combustión de amoníaco a nivel mundial (Gant et al., 2023).

4.3 Avances de la regulación del hidrógeno en la cadena productiva

El 12 de septiembre de 2024, el gobierno presentó el Plan de Trabajo de Regulaciones Habitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024-2030. Liderado por los ministerios de Energía, Economía, Salud, Transportes y Telecomunicaciones, y Minería, el plan busca establecer un marco normativo para regular la cadena de valor del hidrógeno, promoviendo la colaboración público-privada.

Este plan se enmarca en la Ley N° 21.305, que transfiere la regulación del hidrógeno al Ministerio de Energía, lo que implica la necesidad de regular su uso como energético y habilitar nuevos usos en la cadena productiva. Además, la creación de reglamentos reducirá la carga de permisos especiales para proyectos de hidrógeno verde.

Cada ministerio se comprometió a incluir consultas públicas y un informe de impacto regulatorio en la elaboración o modificación de regulaciones. El PDT incluye 16 regulaciones a elaborar o modificar, con un cronograma específico por ministerio para su implementación en áreas de competencia y en el desarrollo de la industria del hidrógeno verde. El plan fue sometido a consulta pública, incorporando los siguientes aspectos:

- Actualización de lineamientos para la calificación industrial: el Minsal revisará los lineamientos vigentes, incorporando orientaciones para que las Seremi de Salud evalúen los estudios de riesgos y análisis de consecuencias para obtener la calificación industrial.
- Aclaración de competencias entre la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y Minsal: se publicará una guía para definir los límites de competencias entre SEC y Minsal para proyectos de hidrógeno, amoníaco, *e-fuels* y uso no energético de hidrógeno.
- Compatibilidad territorial del amoníaco: se han logrado avances para establecer un proceso sobre cómo se abordará el amoníaco en los instrumentos de ordenamiento territorial.

Aunque estos anuncios avanzan en la definición y armonización de las regulaciones para la cadena de valor del amoníaco, persiste el desafío de conciliar los diferentes usos de la sustancia y aplicar normas a todos los proyectos y territorios. Además, la posible modificación de la Circular B32 del Minsal para incorporar medidas técnicas de mitigación podría rigidizar aún más el marco regulatorio sin garantizar una reducción efectiva de los riesgos asociados a la infraestructura productiva.

En otros ámbitos, la OGUC ha sido criticada por no abordar adecuadamente la gestión de riesgos, especialmente en relación con los desastres naturales. El artículo 2.1.17 establece que los planes reguladores pueden definir “zonas no edificables” o “áreas de riesgo” para proteger los asentamientos humanos. En 2023, el Minvu presentó recomendaciones derivadas del estudio de Cigiden (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2023), destacando la necesidad de establecer estándares para el diagnóstico de riesgos y unificar metodologías que aborden tanto amenazas naturales como antrópicas. También se propuso definir el concepto de riesgo en la OGUC, crear guías para estudios de riesgo y fortalecer los equipos municipales.

El Minvu se comprometió a modificar la LGUC y la OGUC, y desarrollar una metodología para los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) que

facilite estudios de riesgo sistemáticos (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2023). El 30 de agosto de 2024, se cerró la consulta ciudadana para la “Modificación de la OGUC en áreas de riesgo”. Esta modificación incluye una Guía Metodológica que define áreas de riesgo y establece una secuencia metodológica de análisis basada en amenaza, vulnerabilidad y riesgo, orientada a mejorar las decisiones de planificación territorial. Esta guía representa un avance, aunque incipiente, en la misma dirección de la propuesta que se plantea en este estudio sobre la planificación territorial con base en la evaluación de riesgos.

Por otra parte, la Guía Metodológica para la Elaboración de Estudios de Riesgo de Planes Reguladores de Nivel Comunal e Intercomunal del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2024) establece un marco técnico para integrar la gestión de riesgos en la planificación territorial. Su objetivo es proporcionar herramientas para identificar, evaluar y mitigar riesgos en áreas urbanas.

La guía comienza con la identificación de amenazas naturales (sismos, inundaciones) y antrópicas (incendios, derrames), seguida de un análisis de vulnerabilidad que abarca factores sociales, físicos y ambientales. Los resultados permiten la zonificación del riesgo, clasificando las áreas en riesgo alto, medio o bajo, lo que informa las decisiones de planificación.

La metodología central incluye una matriz de riesgo que combina los niveles de amenaza y vulnerabilidad para obtener un perfil integral, así como la elaboración de mapas de amenazas y mapas de vulnerabilidad. También promueve la evaluación multiamenaza y el uso de indicadores de exposición para cuantificar el riesgo a los asentamientos humanos. A diferencia de Países Bajos, la metodología de Minvu tiene un enfoque más cualitativo, aunque incluye análisis cuantitativo en algunos casos, combinando estudios de vulnerabilidad social, física y ambiental.

5. Propuestas de política pública

De los resultados presentados previamente, se puede concluir lo siguiente:

- El marco regulatorio vigente en Chile se centra en limitar las actividades e infraestructuras en determinados territorios, de acuerdo con el segmento industrial correspondiente, es decir, en función del uso que se dé a la sustancia producida. Sin embargo, esta categorización no considera la existencia de elementos como el amoníaco, que puede ser multipropósito y formar parte de más de un segmento industrial.
- Se infiere que el principal objetivo del marco regulatorio actual para determinar los territorios en los cuales puede operar una infraestructura específica es salvaguardar la seguridad tanto de las personas como del medioambiente.

- Si bien existe una propuesta de trabajo del Ministerio de Energía para perfeccionar un marco regulatorio que facilite el desarrollo de proyectos de hidrógeno y amoníaco, aún es una regulación compleja cuando se trata de comparar diferentes tecnologías ubicadas en distintos territorios. Además, esta propuesta no contempla acciones específicas para regular la posible combustión del amoníaco.

A partir de las conclusiones presentadas, se proponen las siguientes recomendaciones de política pública:

5.1 Planificación territorial con base en evaluación de riesgos

Esta propuesta consiste en incorporar el Análisis Cuantitativo de Riesgos¹¹ (QRA, por sus siglas en inglés) como herramienta fundamental para determinar si una infraestructura puede o no emplazarse en un territorio.

El análisis cuantitativo de riesgos es una técnica estadística utilizada para comprender la incertidumbre y/o el riesgo en un proyecto. Esta metodología emplea valores numéricos y datos complejos para determinar la probabilidad de eventos específicos y el impacto potencial que dichos eventos podrían tener en el territorio. Este enfoque implica la recopilación de datos sobre cantidades específicas y mensurables de riesgo, utilizando modelos matemáticos y simulaciones para su análisis. A partir de estos datos, es posible pronosticar la probabilidad de diversos resultados, incluyendo escenarios tanto favorables como desfavorables (Ham y Gansevoort, 1992).

En términos operativos, se propone que las autoridades locales y/o nacionales determinen un umbral máximo de riesgo (en unidades de riesgo) que se esté dispuesto a asumir en un territorio. Por ejemplo, se podría determinar que es aceptable un nivel de riesgo de 1×10^{-6} para un territorio, es decir, que la probabilidad de que ocurra un evento mortal debido a causas relacionadas con una determinada instalación industrial sea de una en un millón, lo que indicaría que una persona tendría esa probabilidad de morir debido al peligro estudiado. Esta regulación se fundamenta en el concepto de “zonificación de riesgos” o “gestión del uso del suelo”, con el objetivo de minimizar el impacto de accidentes graves en la salud pública y el medioambiente.

Este tipo de planificación territorial con base en riesgo permite decidir si una infraestructura industrial puede instalarse en un territorio, independiente de lo que se produzca, del territorio donde se instale o de la industria a la que pertenezca. Esto resuelve temas como el umbral límite de almacenamiento de amoníaco (regulado por el Minsal) o la consideración de si el producto se utiliza como energético o no (amoníaco).

11 QRA: Quantitative Risk Analysis.

Una manera de realizar esta zonificación sería incorporar, en la Evaluación Ambiental Estratégica de los territorios, los estudios necesarios para definir los límites de riesgo aceptables para instalaciones industriales (probabilidad de fatalidad).

Una vez definido el riesgo aceptable para un territorio, los proyectos que quieran instalarse en esa zona deberán realizar un QRA específico para la instalación industrial en el territorio. El QRA permite construir curvas de iso-riesgo o contornos de riesgo, que son representaciones gráficas que muestran las zonas o áreas alrededor de una instalación o fuente de peligro donde se alcanzan ciertos niveles de riesgo. Estas curvas conectan puntos donde el riesgo de sufrir un evento específico (como lesiones o muerte) es constante, y son útiles para visualizar el nivel de riesgo en función de la proximidad a la fuente del peligro. Además, ayudan a entender cómo varía el riesgo en función de la distancia respecto al origen del peligro (por ejemplo, un tanque de amoníaco o una instalación industrial), facilitando el establecimiento de distancias de seguridad y la planificación de respuestas ante emergencias. Las curvas de iso-riesgo se utilizan para delimitar áreas en las que el riesgo es aceptable o no, según las normativas. Por ejemplo, si el riesgo en un área supera cierto umbral (como 1×10^{-4}) podría requerir medidas de mitigación adicionales. Las curvas de iso-riesgo son una herramienta visual clave para comunicar riesgos en QRA y para tomar decisiones sobre ubicación de instalaciones, protección de personas, y diseño de medidas de control y mitigación (Stantec Consulting Ltda., 2023).

Se propone solicitar el Análisis Cuantitativo de Riesgos a los proyectos, como parte del Estudio de Impacto Ambiental, para determinar la posibilidad de que una determinada infraestructura industrial se instale en un territorio, independizándola del instrumento de planificación territorial (IPT).

El QRA permite a las empresas tomar decisiones informadas, gestionando los riesgos hasta niveles tan bajos como sea razonablemente posible¹² (Alarp). También, facilita el cumplimiento de las normativas de seguridad e identifica áreas clave para mejoras en seguridad, lo cual es esencial para mantener la seguridad operativa y proteger tanto al personal como al medioambiente.

Existen proveedores de software de análisis de riesgo que han desarrollado sus sistemas de modelamiento matemático con base en gran cantidad de datos de instalaciones reales, lo que les permite ofrecer un software que prediga de manera precisa los riesgos y consecuencias de una determinada infraestructura. Por ejemplo, DNV (Det Norske Veritas) es un proveedor mundial de soluciones digitales y aplicaciones de software de análisis de riesgo, centrado en los mercados de energía, marítimo y sanitario.

12 Alarp: as low as reasonable possible.

DNV provee la solución de software QRA Safeti™, que modela tanto las consecuencias como los riesgos en una sola interfaz, brindando los medios para una gestión eficaz de los riesgos. Safeti incorpora además un software de análisis de consecuencias, Phast™ (usa simulaciones integradas en campo libre y CFD¹³), y calcula el riesgo en función de las frecuencias de fuga proporcionadas por el usuario, datos de ignición, condiciones meteorológicas, poblaciones y datos de vulnerabilidad. El conjunto Safeti/Phast permite realizar: análisis costo-beneficio; evaluación de riesgo de incendios y explosiones¹⁴ (FERA); evaluación de riesgo en edificios ocupados¹⁵ (OBRA); estudios de análisis cuantitativo de riesgos (QRA); diseño basado en riesgos; y análisis de sensibilidad (DNV, 2024).

Como referencia, el costo de acceso a la licencia de Safeti/Phast es desde alrededor de 61 millones de pesos/año (EUR 58.254) y el costo de capacitación es del orden de tres millones de pesos por persona (GBP 2.400). Sin embargo, el costo del estudio QRA sería de cargo de la empresa que presenta el proyecto. El sector público tendría la responsabilidad de asumir el costo de preparar profesionales para la revisión de dichos estudios y de desarrollar una guía para el análisis de riesgo basada en normas internacionales, que utilice metodologías adecuadas para la elaboración de curvas de iso-riesgo.

Adicionalmente, la planificación territorial basada en riesgo permitiría aplicar el mismo concepto de análisis para infraestructura de transporte, como los amoniaductos. En este caso, cada tramo del amoniaducto deberá someterse a un análisis que permita determinar la probabilidad y la magnitud de los riesgos en función del entorno local. Las áreas con diferentes límites de riesgo deberán ser evaluadas de manera diferenciada. También, se podría integrar la evaluación de riesgos combinados, tales como riesgos naturales e industriales, así como eventos críticos, por ejemplo, el riesgo de un derrame de amoníaco en caso de un tsunami o el riesgo de infraestructura energética en caso de un ataque terrorista.

En cuanto a las modificaciones normativas necesarias para implementar el modelo propuesto, a continuación, se presentan algunas de las modificaciones necesarias más evidentes:

- Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, respecto a la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE): incorporar la zonificación de riesgo con base en unidades de riesgo aceptables, que fijen el umbral por el cual se regirán los estudios cuantitativos de riesgos que presenten los proyectos al momento de su aprobación ambiental.

13 CFD: computational fluid dynamics.

14 FERA: fire and explosion risk assessment.

15 OBRA: occupied buildings risk assessment.

- OGUC (artículos 2.1.28 y 2.1.29): revisión de los artículos de la OGUC que regulan la infraestructura energética y la capacidad productiva para definir su pertinencia en un territorio con base en el nivel de riesgo aceptable que se defina en la EAE.
- Circular B32, DDU 470 y DDU 218: pierden pertinencia, debido al cambio de enfoque hacia el límite de riesgo aceptable.

Se requerirá un estudio jurídico exhaustivo para determinar la totalidad de las modificaciones necesarias para la implementación completa.

Respecto a las instituciones responsables de materializar estas modificaciones, sin duda, un actor clave que debiese incorporarse a esta discusión es el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), ya que sería el ente a cargo de liderar los cambios necesarios para la incorporación de la gestión de riesgos, tanto a nivel de la Evaluación Ambiental Estratégica como en la revisión, a través del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), de los Estudios de Impacto Ambiental presentados por los proyectos. Se estima que el MMA requerirá la creación de un equipo o unidad especializada, conformada con profesionales debidamente capacitados en la revisión de los QRA que presenten los proyectos de instalaciones industriales.

Por parte de la planificación territorial, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo será clave en la armonización regulatoria de los artículos de OGUC que incorporen el análisis de riesgo. En cuanto al rol del Ministerio de Salud, este deberá velar por el cumplimiento de las medidas mitigatorias que se aprueben para un determinado proyecto, mediante la fiscalización adecuada con profesionales preparados para dicha labor. El Ministerio de Energía liderará el proceso desde la articulación institucional y armonización regulatoria del sector energético.

Respecto a los resultados y alcances que se podrían esperar de la implementación de esta propuesta de política pública, se puede mencionar:

- Desvinculación del uso del producto del proceso regulatorio: la zonificación basada en riesgo permitiría evaluar proyectos industriales peligrosos exclusivamente en función de su nivel de riesgo, y no con base en su uso final. Esto facilitaría la aprobación de instalaciones como las plantas de amoníaco para uso energético, siempre que cumplan con los criterios de riesgo aceptables.
- Mayor seguridad pública y ambiental: la implementación de un sistema de evaluación que cuantifique y gestione mejor los riesgos industriales contribuiría a reducir el potencial de accidentes mayores y aumentaría la protección de las comunidades cercanas a instalaciones peligrosas.
- Claridad regulatoria: el uso de unidades de riesgo estandarizadas proporcionaría mayor certeza tanto a las empresas como a las autoridades sobre los niveles de seguridad aceptables, facilitando el cumplimiento normativo y la evaluación de proyectos.

- Reducción de conflictos sociales: la zonificación basada en riesgo podría disminuir la oposición social a ciertos proyectos industriales, como los relacionados con el amoníaco, al garantizar que las instalaciones cumplan con estrictos criterios de seguridad.
- Mayor certidumbre a las inversiones: un enfoque basado en riesgo podría hacer que Chile sea más atractivo para inversiones en industrias complejas, como la producción de combustibles limpios o el almacenamiento de vectores energéticos, siempre que se mantengan dentro de los umbrales de riesgo aceptables.

5.2 Evaluar implementación del amoníaco como combustible

En cuanto al amoníaco como combustible, proyectos como el impulsado por la empresa Guacolda (que podría ser replicado por otras empresas a nivel nacional) resaltan la necesidad de trazar un plan de acción para definir si Chile declarará el amoníaco como combustible o no. Para ello, se requiere información adicional sobre aspectos críticos en su uso como combustible, especialmente aquellos relacionados con la corrosión y el desgaste de componentes, que podrían generar fugas o accidentes.

Si el amoníaco se va a utilizar de forma generalizada como combustible, especialmente en el sector marítimo, es crucial que las personas encargadas de su manejo en puertos y a bordo de los barcos estén adecuadamente capacitadas. Esto incluye a los equipos de respuesta de emergencia, tanto en tierra como en el mar, por lo que es esencial desarrollar las capacidades locales para la formación de personal especializado en el manejo del amoníaco.

Por lo tanto, la propuesta de política pública que se recomienda en este ámbito consiste en:

- Fortalecer la participación de Chile en las discusiones de grupos internacionales que están desarrollando lineamientos para el uso del amoníaco como combustible, como la Organización Marítima Internacional (IMO).
- Estrechar lazos de colaboración con países como Japón, China y Corea del Sur, que ya cuentan con pilotos industriales en funcionamiento y pueden aportar información valiosa para la toma de decisiones.
- Destinar fondos a la investigación nacional para obtener información clave para la toma de decisiones en este ámbito, permitiendo obtener parámetros de operación segura de distintas mezclas de combustibles en distintos dispositivos. Para esto, se propone la apertura de un programa o consorcio tecnológico a través del instrumento de Corfo¹⁶. Mediante este instrumento se podrían crear las estructuras adecuadas para la investigación e innovación que el país

¹⁶ Los Programas y Consorcios Tecnológicos de Corfo son una herramienta de política pública diseñada para incrementar la tasa de innovación tecnológica en productos y procesos de las empresas, enfocándose en sectores productivos y/o económicos específicos. Esto se logra a través de la ejecución coordinada de portafolios de proyectos de desarrollo tecnológico, los cuales permiten reducir y/o eliminar brechas identificadas, mejorar la productividad del sector y contribuir a su diversificación y/o sofisticación.

requiere, con el objetivo de implementar de manera segura y sostenible el uso del amoníaco como combustible. Esto facilitaría la coordinación de iniciativas entre instituciones, empresas y el sector público, orientándolas hacia el desarrollo de tecnologías habilitantes para el uso del amoníaco en diversas mezclas y aplicaciones. Asimismo, se podrían realizar pruebas en condiciones controladas, generando información relevante para asegurar la viabilidad técnica y operativa del uso del amoníaco en distintas aplicaciones. Este enfoque permitirá no solo la adopción segura del amoníaco como fuente de energía, sino también su integración de manera eficiente en el contexto nacional, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la transición energética del país.

En este ámbito no se proponen modificaciones regulatorias ya que estarán supeditadas a los resultados que se obtengan, tanto de la investigación local, como de la investigación conjunta con colaboradores internacionales. La implementación del programa tecnológico será de responsabilidad de Corfo, pero el diseño deberá incluir la participación del Ministerio de Energía, la SEC, la Comisión Nacional de Energía, entre otros.

6. Conclusiones

La implementación del amoníaco como combustible y su integración en la planificación territorial representan oportunidades significativas para el desarrollo sostenible y la transición energética de Chile. Sin embargo, para aprovechar plenamente estos beneficios, es esencial abordar los desafíos técnicos, de seguridad y regulatorios identificados. La adopción del Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) como herramienta para la planificación territorial permite evaluar de manera objetiva y estandarizada los riesgos asociados con instalaciones industriales peligrosas, como las plantas de amoníaco, independientemente de su ubicación o uso final. Esto no solo mejora la seguridad pública y ambiental, sino que también proporciona claridad regulatoria y puede reducir conflictos sociales al garantizar que las instalaciones cumplan con criterios de riesgo aceptables.

Por otra parte, el fomento de la investigación y desarrollo a través de un Consorcio Tecnológico especializado en el uso del amoníaco como combustible es clave. Esta estructura permitiría coordinar esfuerzos entre instituciones, empresas y el sector público para superar los desafíos técnicos, como la corrosión en componentes a altas temperaturas y la generación de emisiones de NO_x . Además, fortalecería la formación de capital humano especializado en el manejo del amoníaco, consolidando las capacidades locales y asegurando operaciones seguras en puertos y embarcaciones, en el proceso de exportación del amoníaco. La integración de estos esfuerzos generaría una base sólida para el uso del amoníaco en diversas aplicaciones, desde motores en embarcaciones marítimas hasta la generación de energía.

Adicionalmente, es crucial reforzar la atención sobre el desafío de la percepción pública asociada con la transición hacia el uso del amoníaco verde, destacando su relevancia en el diseño de políticas públicas. Una política integral que apoye y acelere esta transición debe contemplar tanto los aspectos técnicos como los sociales que influyen en su desarrollo y aceptación, incluyendo la sensibilización de las comunidades y la capacitación de quienes estarán involucrados en su manejo. Este enfoque permitiría superar las barreras actuales y consolidar la industria del amoníaco verde en Chile, sentando las bases para una economía más limpia y sostenible.

Las propuestas de política pública presentadas requieren una armonización normativa y una colaboración interinstitucional efectiva, involucrando al Ministerio del Medio Ambiente, el Minvu, el Minsal y el Ministerio de Energía. Al implementar estas acciones, Chile no solo avanzará en su compromiso con la energía limpia, sino que también podría posicionarse a la vanguardia en innovación tecnológica y en la adopción de tecnologías de bajas emisiones. Esto contribuirá al aumento de la competitividad del país y a un desarrollo económico alineado con el respeto al medioambiente y la seguridad de las personas, promoviendo una transición energética que responda a las necesidades globales de reducción de emisiones y generación de energía sostenible.

Referencias

- Banco Central de Chile** (2024). *Indicadores de Comercio Exterior*. Disponible en: https://www.bcentral.cl/documents/33528/5858892/ICE_I_2024.pdf/500362ed-5da3-5b1d-abc5-ee1726e89560?t=1716413011199
- Cheddie, D.** (2022). *Ammonia as a Hydrogen Source for Fuel Cells: A Review*. s.l.:s.n.
- DNV** (2024). *DNV*. Disponible en: <https://www.dnv.com/software/services/plant/quantitative-risk-analysis/>
- Economic Research Institute for Asean and East Asia (ERIA)** (2024). *Potential Utilisation of Fuel Ammonia in ASEAN Countries*, s.i.: ERIA Research Project Report FY2023 No. 20.
- EPA** (2021). *Household Cleaning Products*. Disponible en: <https://www.epa.gov/>
- EPA** (2024). *Emergency Planning and Community Right-to-Know Act (EPCRA)*. Disponible en: <https://www.epa.gov/epcra>
- FDA** (2020). *US Food & Drug Administration*. Disponible en: <https://www.fda.gov/>
- Fecke M., Garner, S. y Cox, B.** (2016). *Review of Global Regulations for Anhydrous Ammonia Production, Use and Storage*. s.l., s.n.
- Feller-Rate** (2023). *Informe de Clasificación Enaex S.A. Noviembre 2023 Línea de Bonos y Acciones Serie Única*, s.l.: s.n.
- Fuster, J., Arteaga, Y. y Farias, R.** (2022). *Industria del Amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización*. Santiago: GIZ.

- Gant, S. et al.** (2023). *Health and Safety Workshop Report*, s.l.: 2nd Symposium on Ammonia Energy.
- Giddey, S. et al.** (2020). Electrolytic hydrogen and ammonia: The green future of energy. *Energy Procedia*, Volumen 158, pp. 1676-1681.
- H2 Chile** (2024). *Mapa de Proyectos*. Disponible en: <https://h2chile.cl/mapa-de-proyectos/>
- Ham, J.M. y Gansevoort, J.** (1992). *Risk Analysis and Emergency Management of Ammonia Installations*, Apeldoorn: s.n.
- Institute for Sustainable Process Technology** (2024). *Clean Ammonia Roadmap*, s.l.: s.n.
- International Energy Agency** (2021). *Ammonia Technology Roadmap*, s.l.: s.n.
- Irena WTO OMC** (2023). *International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy*, s.l.: s.n.
- Ministerio de Energía** (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo** (2023). *Minvu en materia de riesgos en la planificación urbana y territorial*. Disponible en: https://tramitacion.senado.cl/appsenado/index.php?mo=tramitacion&ac=getDocto&iddoc-to=17495&tipodoc=docto_comision
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo** (2024). *Consultas ciudadanas*. Disponible en: https://participacionciudadana.minvu.gob.cl/sites/default/files/guiariosgos_07.08.24.pdf
- Ministry of Economy, T. a. I.** (2022). *Ammonia Strategy and Policy in Japan*. Disponible en: <https://www.jogmec.go.jp/content/300381295.pdf>
- OSHA** (2024a). *Storage and handling of anhydrous ammonia*. Disponible en: <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.111>
- OSHA** (2024b). *Process safety management of highly hazardous chemicals*. Disponible en: <https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910.1000>
- OSHA** (2024d) *Hazard Communication*. Disponible en: <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.1200>
- Otsuki, Y.** (2024). Overview of current regulatory on hydrogen and fuel ammonia in Japan. *International Energy Law Review*.
- PGS Program Office** (2017). *Guidelines for Generic Risk Approach*. Disponible en: <https://publicatierreeksgevaarlijkestoffen.nl/handreikingen/handreiking-generieke-risicobenadering/>
- PGS Program Office** (2024). *PGS 12 Guideline for the safe storage and loading of ammonia*. Disponible en: <https://publicatierreeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/pgs12/>

- Sauma, E.** (2023). *Centro de Energía UC*. Disponible en: <https://energia.uc.cl/opinion/el-amoniacos-verde-una-solucion-para-el-almacenamiento-y-transporte>
- Stantec Consulting Ltda.-** (2023). *Quantitative Risk Assessment – Bear Head Energy Ammonia Production Facility*, Nova Scotia, Canada: s.n.
- US Government** (2024). *US National Clean Hydrogen Strategy Roadmap*. Disponible en: <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf?Status=Master>
- Valera Medina, A. y Banares-Alcantara, R.** (2021). *Techno-Economic Challenges of Green ammonia as an Energy Vector*. s.l.:Academic Press, Elsevier.
- Zhao, Y., Zhang, M. y Yang, Z.** (2021). Policy perspectives on the future of green ammonia as a hydrogen carrier: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 137, p. 110626.

CÓMO CITAR ESTE CAPÍTULO:

Sauma, E., Isaacs, M. y Delgado, P. (2025). Recomendaciones de política pública para el desarrollo de un mercado de amoníaco verde en Chile. En: Centro de Políticas Públicas UC (ed.), Propuestas para Chile. *Concurso Políticas Públicas 2024. Pontificia Universidad Católica de Chile*, p. 47-78.