

Hidrógeno ¿Verde?

I. Introducción:

El Centro de Análisis Socioambiental (CASA) es una organización que busca generar conocimiento, debate y formación, orientada a dar una respuesta y alternativas a la crisis socio-ecológica en el contexto chileno. En ese marco, durante el presente año hemos observado la efervescencia que ha generado la inminente instalación de un complejo industrial designado coloquialmente bajo el nombre de “Hidrógeno Verde”. El auge de este sector se sitúa dentro de la creciente preeminencia de la descarbonización de la economía como uno de los ejes fundamentales para el crecimiento económico, en particular en el marco de la recuperación económica post COVID-19.

Entre los criterios levantados por las organizaciones internacionales, estados nacionales y sectores empresariales que orientan la discusión sobre la transición, se ha entregado un papel predominante al desarrollo de nuevas tecnologías, implementadas por los grandes grupos económicos alrededor del globo. Has ahora, Chile ha sido un alumno aventajado de esta tendencia en el Sur Global. Esto se ha expresado en el seguimiento a las directrices de captación de carbono a través de plantaciones forestales y , especialmente, el desarrollo de grandes proyectos de generación de energía renovable y la explotación de recursos minerales necesarios



para esta forma de transición. La proliferación de la generación eléctrica a partir de energías renovables no convencionales, se enmarca tanto en la urgencia por reemplazar la generación a partir de combustibles fósiles, como también en la necesidad de electrificación de la mayor cantidad de procesos a lo largo y ancho de nuestras economías (IRENA; 2021). Sin embargo, este proceso no es capaz por sí mismo de lograr la ansiada carbono neutralidad, ya que existen múltiples actividades para las cuales la electrificación no es hoy -ni en el corto plazo- una solución total. Entre ellas se encuentra el transporte de bienes y pasajeros o sectores de producción industrial tan relevantes como el acero. Es en ese escenario en el que el hidrógeno ha entrado en la discusión.

El hidrógeno ha formado parte de las discusiones sobre transición energética desde hace décadas, sin embargo, su masificación no ocurrió como algunos proyectaron. La agudización de la crisis climática y la búsqueda de un reemplazo efectivo de los combustibles fósiles ha hecho posible su reaparición en esta discusión. La posibilidad de producir este elemento a partir de electrólisis alimentada por electricidad renovable y sintetizar hidrógeno con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, es el proceso que le asignaría el adjetivo “verde” a este elemento. Considerando el potencial de generación eléctrica disponible a bajo costo en términos comparativos (Palma-Behnke, et al., 2021) y la demanda esperada de



hidrógeno a nivel mundial, comienza a tomar sentido el crecimiento de las expectativas de esta industria en Chile.

A pesar de este favorable escenario de crecimiento económico, hay un aspecto fundamental del surgimiento de esta industria que hasta ahora no ha sido tratado con la importancia que corresponde. Nos referimos al impacto material, espacial y político que la instalación de una industria de las magnitudes proyectadas tendrá en los ecosistemas y asentamientos afectados. Debemos recordar que “cero emisiones” es muy distinto a ausencia de impactos ambientales ya que la huella material del despliegue de paneles solares y centrales eólicas de forma masiva, no es menor. Asimismo, en el escenario presente de alta conflictividad política y socioambiental en Chile, no es posible soslayar el potencial choque entre las comunidades ubicadas en torno a los proyectos de inversión y producción de hidrógeno verde. Tal como se describe en este informe, esta industria requiere la instalación de numerosas instalaciones e infraestructura para transportar el hidrógeno producido.

A partir de todo lo anterior, es que como equipo de investigación nos hemos abocado a escudriñar este nuevo sector económico para responder la siguiente pregunta de investigación:



¿Cuáles son las implicancias energéticas y materiales de la industria de hidrógeno verde en Chile a la escala que de las proyecciones establecidas por el estado chileno?

Para dar respuesta a esta interrogante constituimos un equipo capaz de cumplir varios objetivos. Uno de ellos es la construcción de un marco teórico para interpretar la instalación de la industria y su inserción en la economía y transición energética global. En segundo lugar, apuntamos a construir una plataforma de recopilación y visualización de datos que resuman el impacto material del complejo industrial para producir hidrógeno verde. Finalmente, buscamos compartir la información levantada con activistas y comunidades interesadas en el crecimiento del hidrógeno verde en nuestro país. De esta forma identificaremos el nivel de conocimiento existente sobre el tema, así como potenciales brechas de conocimiento a levantar, para facilitar la participación activa en una transición energética participativa, democrática y justa.

II. Marco Conceptual y Teórico

a) Relación con políticas nacionales e internacionales de transición/expansión energética

El hidrógeno ha pasado a formar parte de la columna vertebral de la política energética chilena. En junio de 2020 se lanzó la primera versión de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, que sigue en desarrollo. En la versión de noviembre de 2020 se hizo explícita la magnitud de las metas de producción hacia 2025 y 2030: hacia el 2035, las exportaciones duplican el uso doméstico de hidrógeno, y hacia 2050 la cantidad exportada casi triplica el volumen destinado al consumo nacional. El modelo para hacer viable (es decir, económicamente rentable) la producción de hidrógeno verde proyecta este vector energético como un nuevo producto de exportación, muchas veces mencionado como el “nuevo cobre”, en términos de identidad productiva nacional.

Este impulso al hidrógeno verde justifica la ventana de oportunidad apelando a “aprovechar” el amplio potencial de energías renovables no convencionales en Chile. Da un rol restringido --pero clave-- al hidrógeno en la demanda energética nacional, proyectando que reemplace combustibles fósiles en sectores de difícil descarbonización; principalmente en minería, industria y transporte pesado.

Por otra parte, desde los compromisos nacionales de mitigación climática, el hidrógeno verde aparece como un componente clave para avanzar hacia la carbono neutralidad, siendo una de las 6 grandes medidas propuestas por el ministerio de energía para esta meta hacia 2050 (Ministerio de Energía, 2020). Se espera que represente el 21% de la disminución de CO₂ actualmente emitido en el área energía. Está siendo considerado también como un factor diferenciador clave de los distintos escenarios en la Planificación Energética de Largo Plazo 2023-2027, permitiendo la expansión de demanda eléctrica en los escenarios más optimistas (vale decir, en los escenarios de mayor crecimiento económico).

Este actual rol protagónico contrasta con la escasa mención que hasta hace poco tenía este vector energético. Por ejemplo, en la Ruta Energética 2018-2022 sólo se mencionaba como una posible adición al mercado nacional de combustibles alternativos. En los Informes de Actualización de Antecedentes (documentos que actualizan anualmente la Planificación Energética de Largo Plazo, PELP) aparece mencionado brevemente sólo bajo el punto “nuevas tecnologías” hasta el año 2019. Considerando que las tecnologías de producción de hidrógeno no han cambiado significativamente en los últimos años ¿Qué gatilló este rápido cambio?



Si bien la Estrategia Nacional está aún en desarrollo, en la última versión de la Estrategia se identificaron los que serían los primeros 2 nodos de desarrollo de hidrógeno a gran escala: las regiones de Atacama y Magallanes. En ambos casos, se apuesta al bajo precio de generar electricidad con fuentes renovables como la clave para hacerlos viables para una producción --inédita hasta ahora en el mundo-- de este vector. Los rasgos geográficos de ambas regiones son clave para su posicionamiento como nodos. En mayo de 2021 se aprobó la primera planta experimental en Magallanes (con una Declaración de Impacto Ambiental) que ocupa hidrógeno verde para producir combustible sintético.

El hidrógeno también tomó un fuerte protagonismo en la última Planificación Energética de Largo Plazo (2023-2027). Si bien se espera que la mayoría de los mega proyectos de hidrógeno no estén conectados al Sistema Eléctrico Nacional (de lo que se ocupa la PELP), los escenarios consideran al hidrógeno como una forma de electrificación indirecta para consumo doméstico: “se aborda el desafío de la producción de hidrógeno verde en Chile, para lo cual se plantea la oportunidad de que esta industria se desarrolle centralizadamente (1 o 2 polos de producción), en función de las economías de escala que supone, y/o de forma más descentralizada, de acuerdo con la distribución territorial la demanda. Ello depende tanto de la

temporalidad en el despliegue de esta industria como del nivel de exportación que considera cada escenario” (p.39).

A nivel legislativo, existe sólo una iniciativa en el senado para declarar el hidrógeno como bien nacional de uso público. Una idea de Ley Marco para el hidrógeno fue comentada a comienzos de año por el senador Girardi, pero aún no ingresa al Senado. Hasta ahora, los estudios de factibilidad de proyección de crecimiento se han hecho en estrecha colaboración con organismos internacionales como la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional - GIZ. El rol de este energético también fue destacado en un documento comisionado al Banco Mundial sobre proyecciones de crecimiento en verde en Chile (Antosiewicz et al 2020).

b) ¿Nuevas zonas de sacrificio?

Ya establecido el marco del debate energético desde donde analizaremos el objeto de estudio, consideramos pertinente observar la naciente industria desde el prisma del que tal vez ha sido el concepto socio ambiental más relevante de los últimos años en Chile, el de las llamadas “zonas de sacrificio”.

Definir zonas de sacrificio no es una tarea sencilla. Para los fines de esta investigación hemos decidido circunscribir este concepto a la definición propuesta

por una reciente publicación (Ortega, 2019), es decir, aquellos que cumplen las siguientes condiciones:

- 1) Un intenso desarrollo industrial que ha producido daño a los ecosistemas.
- 2) Vulneración a los derechos humanos por proximidad de la población a procesos productivos contaminantes
- 3) Aumento de la vulnerabilidad
- 4) Empobrecimiento de los habitantes (Ortega, 2019).

Las zonas de sacrificio más reconocidas a nivel nacional (e.g., Tocopilla, Mejillones, Huasco, Quintero-Puchuncaví y Coronel) están íntimamente vinculadas a los combustibles fósiles, sea por generación de energía en centrales termoeléctricas o como espacio de entrada de combustibles. En esa línea, pareciera errado considerar que se pueda utilizar este concepto al analizar el hidrógeno verde. ¿Es posible que surjan zonas de sacrificio por la transición energética, es decir, debido al masivo despliegue de energías renovables y el desarrollo de una gran industria de hidrógeno verde? (Temper et al, 2020). Creemos que considerando las cuatro variables anteriormente mencionadas, especialmente la primera y tercera, es una inquietud razonable y que vale la pena analizar en su mérito.

Las energías renovables no son inmateriales, requiriendo considerable espacio, metales y otros recursos para su instalación. Allí yacen potenciales impactos

socioambientales, tanto en el sistema energético mismo (efectos directos) como en la extracción de los recursos necesarios para su construcción (efectos indirectos).

Dentro de los efectos directos están aquellos que tienen las plantas generadoras de electricidad renovable en los ecosistemas en donde se emplazan, así como las plantas de electrólisis y osmosis inversa requeridas para una industria de hidrógeno verde. Los efectos identificados por la literatura son la ocupación de suelo, daño a especies que ocupan el territorio, interrupción de beneficios de la naturaleza para el ser humano¹ (ej: radiación solar, viento), entre otros (Romero-Toledo, 2019; Yañez & Molina, 2008). Otro efecto directo es la construcción de líneas de transmisión, las que pueden fragmentar muchísimos ecosistemas por su extensión y generar agudos conflictos sociales (Hess et al., 2021). Las líneas de transmisión ya han generado conflictos de forma creciente en la medida que su desarrollo se ha acercado a lugares con más población. Ejemplos conocidos de esto es la resistencia al proyecto Hydroaysén durante los 2000 y al desarrollo eólico en el Archipiélago de Chiloé en la actualidad

Dentro de los efectos indirectos destaca la gran minería del cobre, sector sobre el cual existe una profusa literatura (Romero-Toledo, 2019; Yañez & Molina, 2008),

¹ En el presente documento utilizamos este concepto, al igual que el IPBES, en reemplazo del tradicional “servicios ecosistémicos”.



que recientemente se ha ampliado hacia nuevos recursos (**Jerez et al., 2021**). Entre ellos está la extracción del litio, particularmente en el Salar de Atacama, el que permite ejemplificar los riesgos: si bien el territorio donde se ubica dicho ecosistema no puede designarse aún como una zona de sacrificio, se avizora un elevado riesgo de agotamiento de los acuíferos debido a las técnicas de extracción del litio . Esto amenazaría la subsistencia de asentamientos ubicados en medio del desierto más árido del mundo. De esta forma, se podría elevar la magnitud del significado de una zona de sacrificio, ya que la devastación del Salar de Atacama podría acarrear el fin del pueblo indígena atacameño.

La probabilidad de que la transición energética genere zonas de sacrificio aumenta en cuanto se dé de forma corporativa (la llamada “transición energética corporativa”). Esto ocurre cuando el foco se pone exclusivamente en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, sin consideración de otros recursos o dimensiones. Dicha perspectiva fomenta cambios en el sistema energético orientados a la acumulación de riqueza, creando nuevos procesos de mercantilización y con una tendencia a la concentración del sector en grandes corporaciones nacionales e internacionales (Bertinat et al., 2020). Una rápida mirada al sector en Chile nos demuestra que ésta ha sido la opción tomada por sucesivos gobiernos. Por una parte, aproximadamente el 65% de la generación



eléctrica se encuentra en manos de 4 empresas, Enel, Aes Gener, Colbún y Engie (Coordinador Eléctrico, 2019). Por otro lado, el relato de éxito de la transición energética renovable se ha sostenido en el sitio privilegiado que ha alcanzado el país como lugar de inversión tal como lo demuestra el primer lugar que Chile ha alcanzado en el índice de competitividad para la inversión en ERNC de Bloomberg (Climatescope, 2021).

Como alternativa se encuentra la llamada “transición energética popular”, caracterizada por los principios de sustentabilidad fuerte y justicia socioambiental. Esta orientación apunta a la construcción del derecho a la energía, problematiza su mercantilización y la dinámica propia de los procesos de acumulación tendientes al crecimiento infinito. Dicha transición energética busca establecer un sistema descentralizado, democrático y justo, acabando con la pobreza energética. (Bertinat et al., 2021)

En definitiva, creemos que no es posible descartar el surgimiento de una dinámica de despojo con los territorios donde se instale la industria del hidrógeno verde, que podría eventualmente categorizarse como zona de sacrificio. Sin embargo, para poder evaluar esta situación, es necesario determinar el real impacto que este novel

sector económico tendría según las proyecciones existentes. Por eso, a continuación iniciamos el primer paso en esa tarea.

c) El análisis de huella de materiales, una perspectiva fundamental para entender la materialidad de una industria

Toda actividad económica tiene asociada una determinada cantidad de materiales y energía para que ocurra. El análisis de huella de materiales (Material Footprint Analysis) es una técnica contable que rastrea y cuantifica los materiales requeridos para una actividad, tanto directamente como a lo largo de su cadena productiva . Esta metodología ha sido construida a partir de aportes académicos que se originan en el siglo XIX, pero ha alcanzado mayor relevancia en las últimas décadas (Fischer-Kowalski, 1998). Esto se explica en gran medida por el aumento sostenido del metabolismo social de la economía global.



Así, en el caso que aplicamos esta metodología a la industria del hidrógeno verde, no sólo se considera la cantidad de agua, electricidad, terreno, cemento, etc. que se requerirá en el proceso de electrólisis, sino también lo necesario para obtener todos los insumos usados en el proceso. Todo análisis de huella de materiales tiene que definir límites de sistema pues el proceso se puede hacer recursivamente *ad infinitum*. En este caso se analizará sólo el sistema integrado por los procesos de electrólisis (hidrógeno), osmosis inversa (agua) y generación renovable (electricidad “verde”).

El uso de esta técnica es un valioso complemento a los análisis estándar de beneficio económico ante la presencia de externalidades y ausencia de mercados, es decir cuando los precios no reflejan el verdadero costo de oportunidad de las cosas. Esto es, sin duda, una falla central a los paradigmas económicos neoclásicos predominantes. También es una herramienta valiosa ante curvas de oferta no-lineales, cuando los precios actuales son malas señales de los precios futuros. En ambos casos, los análisis de beneficio económico proveen una visión distorsionada sobre la conveniencia social de un proyecto. En el caso del hidrógeno verde, la escala proyectada lleva a las siguientes inquietudes:

- La demanda por materiales raros podría ser tal que lleve a un aumento explosivo de precios, impactando la viabilidad de la industria en el mediano plazo.
- El área requerida podría llevar a conflictos por uso del suelo.
- La demanda por materiales base (cemento, hierro, etc.) podría implicar importantes presiones adicionales sobre los ecosistemas de donde se originan, amplificando externalidades ya existentes.

d) Dimensiones geopolíticas (de lo transcontinental a lo interregional)

El hidrógeno ha recibido una atención limitada en el pasado. Su hype ha sufrido altibajos durante las últimas décadas, siempre ligado a un apoyo político-económico fragmentado y a dinámicas energéticas pasajeras en las que narrativas como la del “Peak Oil” o la energía nuclear jugaron un papel fundamental. Sin embargo, la vuelta constante a un sistema energético basado en combustibles fósiles baratos y accesibles han sido los principales desincentivos para el desarrollo de la tecnología del hidrógeno.

Los compromisos climáticos en relación a la descarbonización de la economía llevan años encima de la mesa. Hay, además, un tipo de sectores, normalmente asociados a las venas materiales del capitalismo – industria pesada, transporte de larga



distancia, aviación, militar, etc. – que no tienen alternativa a la electrificación, lo que los convierte en sectores clave en los escenarios de descarbonización. ¿Por qué el apoyo al hidrógeno ha estado fragmentado durante tanto tiempo a pesar de ser, aparentemente, un ingrediente clave para los compromisos climáticos? La respuesta se encuentra en los costes de producción y en la incertidumbre de viabilidad asociada a una tecnología en fase de infancia.

No ha sido hasta la llegada de la tormenta perfecta cuando, el “elemento más abundante del planeta”, ha sido llevado al altar del solucionismo tecnológico y ser proclamado como la única solución a una multitud de problemas complejos que enfrenta la humanidad. El hidrógeno surge como la *única* alternativa para alcanzar cero emisiones en estos sectores y como el vector energético imprescindible para fomentar un acople del sistema energético hacia un sistema más definido por la demanda y los Smart Systems. Los principales elementos que han contribuido a este alineamiento del apoyo económico y político al hidrógeno han sido los costos decrecientes de la energía renovable y los electrolizadores, los compromisos climáticos en relación a la descarbonización del tejido productivo y la disponibilidad de fondos públicos masivos debido a la crisis económica y social del COVID-19.

Alrededor de \$150 billones de dinero público se está destinando para proyectos de hidrógeno globalmente en forma de subsidios y apoyo económico para crear cauces

seguros de inversión y eliminar el riesgo de inversión para el capital privado utilizando fondos públicos (especialmente disponibles disfrazados de fondos de recuperación frente al Covid-19)².

En este marco, Chile aparece como un país con gran potencial para la producción de hidrógeno y el desarrollo de tecnología asociada. Chile, “el campeón escondido” – apodo que le acuñó Alemania en el World Energy Council en 2018 -, ha sido señalado como el país más competitivo a nivel mundial capaz de alcanzar costes de producción de entre \$2.7/kg³ y \$1.6/kg⁴ – los más bajos del mundo – y el país más atractivo para inversores en energía renovables entre mercados emergentes – atrayendo \$16 billones de inversión en energía renovable en los últimos siete años y \$4.9 billones solo en 2019 (Bloomberg’s Climatescope). La Asociación Chilena del Hidrógeno (H2 Chile) hace uso de estos informes de agencias internacionales para fomentar el desarrollo del Hidrógeno como vector energético a través de la estimulación de la demanda, la búsqueda de financiación, la mejora de la regulación y la creación de alianzas nacionales e internacionales a través de “espacios de networking entre entidades públicas y privadas” como H2 Chile.

² <https://www.ft.com/content/7eac54ee-f1d1-4ebc-9573-b52f87d00240>

³ IRENA, «Hydrogen: A Renewable Energy Perspective», Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan, September 2019, p. 36. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf

⁴ Gobierno de Chile, «Estrategia Nacional De Hidrógeno Verde», November 2020. Available at: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf



A julio de 2021, Chile tenía una capacidad instalada neta en energía renovables de 7.338 MW, representando un 28,2% de la matriz energética nacional. A esto se le suman los 145 proyectos en etapa de construcción, que suponen un incremento de 4.733 MW de potencia instalada, cuya finalización se prevé entre diciembre de 2020 y febrero de 2023. A su vez, a Julio de 2021 se registran 275 proyectos de energías renovables en etapa de calificación dentro del Servicio de evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), sumando un total de 14.183 MW por un valor de 14.851 MMUSD de inversión (Reporte Mensual ERNC, Agosto 2021)

En 2020, el sector de energía renovable en Chile recibió un 41.6% de toda la inversión directa extranjera[1] y un total de 32 proyectos, encabezando la lista de inversión en energías renovables en Latino América – por delante de Brasil y México, con 31 y 10 proyectos anunciados, respectivamente.

Entre 2015 y 2020, España, Italia e Irlanda fueron los mayores inversores en proyectos de energía renovable en Chile. Durante este periodo, Dublin-based Mainstream Renewable Power lideró las inversiones en 14 proyectos en Chile, mientras que en 2020, la compañía italiana Enel se convirtió en la principal compañía inversora en número de proyectos, seguida de la española OPDE. En términos de inversión de capital, Solarcentury (Reino Unido) se convirtió en la



principal compañía, invirtiendo un total de \$950m en tres proyectos solares en Antofagasta y Tarapacá.

Corfo estima que el país tiene una capacidad solar de 1,700 GW y casi 200 GW de viento – aproximadamente unas 70 veces las necesidades energéticas actuales del país. Además, Chile se sitúa como uno de los seis países con más proyectos de hidrógeno verde en el mundo junto con Australia, Alemania, Holanda, China o Arabia Saudí.

La mayoría de los proyectos piloto están siendo planeados en las regiones norteñas de Chile – Atacama y Antofagasta, las cuales tienen un fuerte acceso a la red nacional de electricidad y unas de las mayores potencialidades solares del mundo. State Grid – una compañía eléctrica China – posee dos de las cuatro distribuidoras de electricidad chilenas, distribuyendo a un 57% de los consumidores totales del país.

III. Metodología:

a) Límites del sistema:

El procedimiento realizado para definir la huella material de la industria del hidrógeno tuvo como primer paso la definición de las fronteras del sistema a

evaluar. De esta manera se debe iniciar el análisis de flujo de materiales, ya que, de lo contrario, es imposible circunscribir el tamaño del proceso a evaluar. En ese sentido, decidimos incluir los siguientes aspectos:

- Infraestructura requerida para realizar desalinización del agua de mar a través de osmosis inversa.
- Infraestructura requerida para generar electricidad para desalinizar el agua y producir hidrógeno a través de electrólisis.
- Infraestructura requerida para producir hidrógeno a través de electrólisis.

Se optó por no incluir otras áreas de la industria del hidrógeno verde, tales como la energía requerida para la construcción y transporte de los productos requeridos para la instalación de la infraestructura. Asimismo, no se consideró la construcción de infraestructura de transporte del hidrógeno que eventualmente se requerirá, esta podría ser vial portuaria o tuberías. Esta decisión se tomó debido a la incertidumbre y falta de información sobre la localización y usos del hidrógeno que se producirá en Chile durante la siguiente década.

b) Construcción de Escenarios:

Posteriormente se definió el periodo de tiempo a medir, el cual fue fijado en el año 2030. Se proyectó la construcción de la infraestructura requerida para contar con una potencia instalada de 25 GW de producción de hidrógeno verde. Finalmente se crearon tres escenarios de desarrollo de la generación energética renovable, en los cuales la nueva matriz, destinada a la producción de hidrógeno, se compone de las siguientes fuentes energéticas:

- 1. 50% solar, 40% eólico, 10% hidroeléctrico**
- 2. 75% solar, 25% eólico**
- 3. 100% solar**

Consideramos que una proyección de estas características se ajusta a la realidad del desarrollo de la matriz de generación eléctrica presente en Chile. Asimismo, con la información disponible sobre los proyectos anunciados y la escala temporal que contiene la Estrategia Nacional de Hidrógeno, creemos que una proyección más allá de 2030 no contaría con niveles de robustez suficiente para ser incluida.

c) Identificación de demanda de materiales y superficie:

Finalmente, se realizó una revisión bibliográfica para establecer parámetros de requerimiento de materiales, energía y superficie para los escenarios determinados. De esta forma se proyectó la demanda, la cual se analiza en el siguiente punto.

IV. Resultados:

La proyección de los requerimientos materiales según los tres escenarios requeridos nos proporcionó una gran cantidad de datos, los cuales para comprender a cabalidad, requieren ser representados de formas diversas. Por ello, publicamos en el sitio web de CASA una plataforma de visualización interactiva que permite identificar de forma didáctica los patrones de comportamiento de cada una de las estimaciones⁵. La presente sección utiliza algunas de esas imágenes para identificar los principales resultados de la investigación.

a) Proyecciones Generales

En primer lugar, las proyecciones totales de la investigación se presentan a continuación en esta tabla descargada de la plataforma

⁵ Disponible en <https://h2verde.netlify.app/>

Gráfico 1

Grupo	Subgrupo	Recurso	Unidad	Esc. 1 - min	Esc. 1 - max	Esc. 2 - min	Esc. 2 - max	Esc. 3 - min
Otro	Otro	Madera	Ton	4,600.0	4,600.0	0.0	0.0	0.0
Plástico	Plástico	Poliétileno (PE)	Ton	2,187.5	2,187.5	0.0	0.0	0.0
Plástico	Plástico	Policloruro de vinilo (PVC)	Ton	316.7	316.7	0.0	0.0	0.0
Otro	Otro	Diesel	Ton	38.3	2,291.7	0.0	0.0	0.0
Metal	Acero	Paneles de acero	Ton	13.5	13.5	0.0	0.0	0.0
Otro	Otro	Explosivos	Ton	13.1	416.7	0.0	0.0	0.0
Áridos	Áridos	Arena de Silice	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Metal	Acero	Acero-Niquel-Cromo	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Metal	Cromo	Cromo 18/8	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mineral	Mineral	Bentonita	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mineral	Mineral	Lana mineral (rock wool)	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mineral	Mineral	Perlita	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Químico	Ácido clorhídrico (HCL)	Ácido clorhídrico (HCL)	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Químico	Hidróxido de sodio	Hidróxido de sodio (NaOH)	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Químico	Químico	Lignosulfonatos	Ton	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Metal	Metal	Platino (Pt)	Ton	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Metal	Metal	Iridio (Ir)	Ton	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
Metal	Metal	Vanadio (V)	Ton	29.7	29.7	44.5	44.5	59.4
Químico	Químico	Helio (He)	Ton	0.0	48.5	0.0	72.7	0.0
Metal	Tierra rara	Itrio (Y)	Ton	125.0	125.0	125.0	125.0	125.0
Metal	Tierra rara	Terbio (Tb)	Ton	32.0	280.0	20.0	175.0	0.0
Metal	Metal	Boro (B)	Ton	32.0	280.1	20.1	175.1	0.1
Mineral	Mineral	Oxido de Escandio (Sc2O3)	Ton	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0
Metal	Tierra rara	Lantano (La)	Ton	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Metal	Metal	Galio (Ga)	Ton	7.5	385.6	11.3	578.4	15.0
Metal	Metal	Titanio (Ti)	Ton	390.6	390.6	585.9	585.9	781.3
Metal	Tierra rara	Disproso (Dy)	Ton	112.0	1,000.0	70.0	625.0	0.0
Metal	Tierra rara	Praseodimio (Pr)	Ton	160.0	1,400.0	100.0	875.0	0.0
Otro	Otro	Adhesivo	Ton	711.6	711.6	1,067.5	1,067.5	1,423.3
Químico	Ácido clorhídrico (HCL)	Ácido clorhídrico (HCL) 30%	Ton	960.7	960.7	1,441.1	1,441.1	1,921.4
Metal	Silicio	Silicio (Si)	Ton	0.0	1,150.0	0.0	1,725.0	0.0
Metal	Metal	Zirconio (Zr)	Ton	1,000.0	2,500.0	1,000.0	2,500.0	1,000.0
Metal	Metal	Plata (Ag)	Ton	1,200.0	2,918.8	1,800.0	4,378.1	2,400.0
Metal	Tierra rara	Neodimio (Nd)	Ton	0.0	7,440.0	0.0	4,650.0	0.0
Metal	Metal	Magnesio (Mg)	Ton	3,343.8	3,343.8	5,015.6	5,015.6	6,687.5

Grupo	Subgrupo	Recurso	Unidad	Esc. 1 - min	Esc. 1 - max	Esc. 2 - min	Esc. 2 - max	Esc. 3 - min
Metal	Metal	Cadmio (Cd)	Ton	58.1	5,219.4	87.2	7,829.1	116.3
Metal	Metal	Indio (In)	Ton	281.3	5,236.9	421.9	7,855.3	562.5
Mineral	Mineral	Selenio (Se)	Ton	31.3	5,275.6	46.9	7,913.4	62.5
Químico	Hidróxido de sodio	Hidróxido de sodio (NaOH) 50%	Ton	3,558.2	5,337.3	5,337.3	8,005.9	7,116.4
Metal	Metal	Molibdeno (Mo)	Ton	7,765.0	8,565.0	7,587.5	8,087.5	6,250.0
Metal	Metal	Telurio (Te)	Ton	293.8	5,648.8	440.6	8,473.1	587.5
Metal	Hierro	Hierro (in magnet)	Ton	2,080.0	18,200.0	1,300.0	11,375.0	0.0
Químico	Químico	Ácido acético 98%	Ton	13,876.9	13,876.9	20,815.4	20,815.4	27,753.8
Metal	Cromo	Cromo (Cr)	Ton	31,560.0	36,080.0	19,725.0	22,550.0	0.0
Plástico	Plástico	Plástico reforzado con vidrio (GRP)	Ton	38,000.0	38,000.0	23,750.0	23,750.0	0.0
Metal	Metal	Plomo (Pb)	Ton	4,527.3	16,834.8	6,785.6	25,246.9	9,047.5
Químico	Químico	Nitrogeno (N2)	Ton	0.0	17,790.9	0.0	26,686.3	0.0
Otro	Otro	Pintura	Ton	36,175.0	36,175.0	30,812.5	30,812.5	18,750.0
Metal	Metal	Niquel (Ni)	Ton	31,567.5	40,782.5	27,843.8	35,468.8	18,550.0
Metal	Metal	Estaño (Sn)	Ton	371.9	28,943.8	557.8	43,415.6	743.8
Metal	Metal	Manganeso (Mn)	Ton	32,550.0	34,470.0	47,687.5	48,887.5	62,500.0
Químico	Químico	Tensoactivos	Ton	85,396.3	85,396.3	128,094.5	128,094.5	170,792.6
Químico	Solvente	Dipropilenglicol metil éter (DPM)	Ton	106,745.4	106,745.4	160,118.1	160,118.1	213,490.8
Metal	Acero	Acero (Acero inoxidable)	Ton	115,781.3	115,781.3	173,671.9	173,671.9	231,562.5
Mineral	Mineral	Crisol de cuarzo	Ton	128,094.5	138,769.0	192,141.7	208,153.5	256,188.9
Metal	Metal	Zinc (Zn)	Ton	257,125.0	281,125.0	205,437.5	220,437.5	102,250.0
Áridos	Áridos	Gravilla	Ton	476,000.0	476,000.0	297,500.0	297,500.0	0.0
Vidrio	Vidrio	Fibra de vidrio	Ton	381,881.3	381,881.3	359,671.9	359,671.9	276,562.5
Áridos	Áridos	Arena	Ton	662,400.0	662,400.0	414,000.0	414,000.0	0.0
Área	Área	Área	ha	372,468.5	497,803.4	311,320.9	498,560.9	179,648.7
Otro	Otro	Lubricantes	Ton	400,662.5	401,462.5	578,593.8	579,093.8	750,125.0
Metal	Metal	Cobre (Cu)	Ton	182,731.3	490,956.3	234,196.9	631,125.0	274,262.5
Metal	Silicio	Silicio policristalino (Poli-Si)	Ton	409,190.6	462,563.3	613,786.0	693,845.0	818,381.3
Metal	Acero	Cables de acero	Ton	530,168.8	612,000.0	795,253.1	918,000.0	1,060,337.5
Plástico	Plástico	Plástico	Ton	759,600.0	759,600.0	1,071,500.0	1,071,500.0	1,364,000.0
Mineral	Silicio	Carburo de Silicio (SiC)	Ton	761,450.4	935,801.2	1,142,175.6	1,403,701.8	1,522,900.8
Plástico	Plástico	Polietilene glycol (PEG)	Ton	964,266.7	1,031,872.1	1,446,400.0	1,547,808.1	1,928,533.3
Metal	Metal	Aluminio (Al)	Ton	1,355,131.2	1,371,131.2	1,966,937.5	1,976,937.5	2,561,750.0
Metal	Acero	Acero	Ton	4,370,000.2	4,862,500.0	2,825,000.0	3,125,000.0	250,000.0
Químico	Químico	Argon (Ar)	Ton	106,746.9	2,206,072.8	160,118.1	3,309,107.0	213,490.8
Vidrio	Vidrio	Vidrio	Ton	4,132,991.5	4,132,991.5	6,199,486.9	6,199,486.9	8,265,982.5

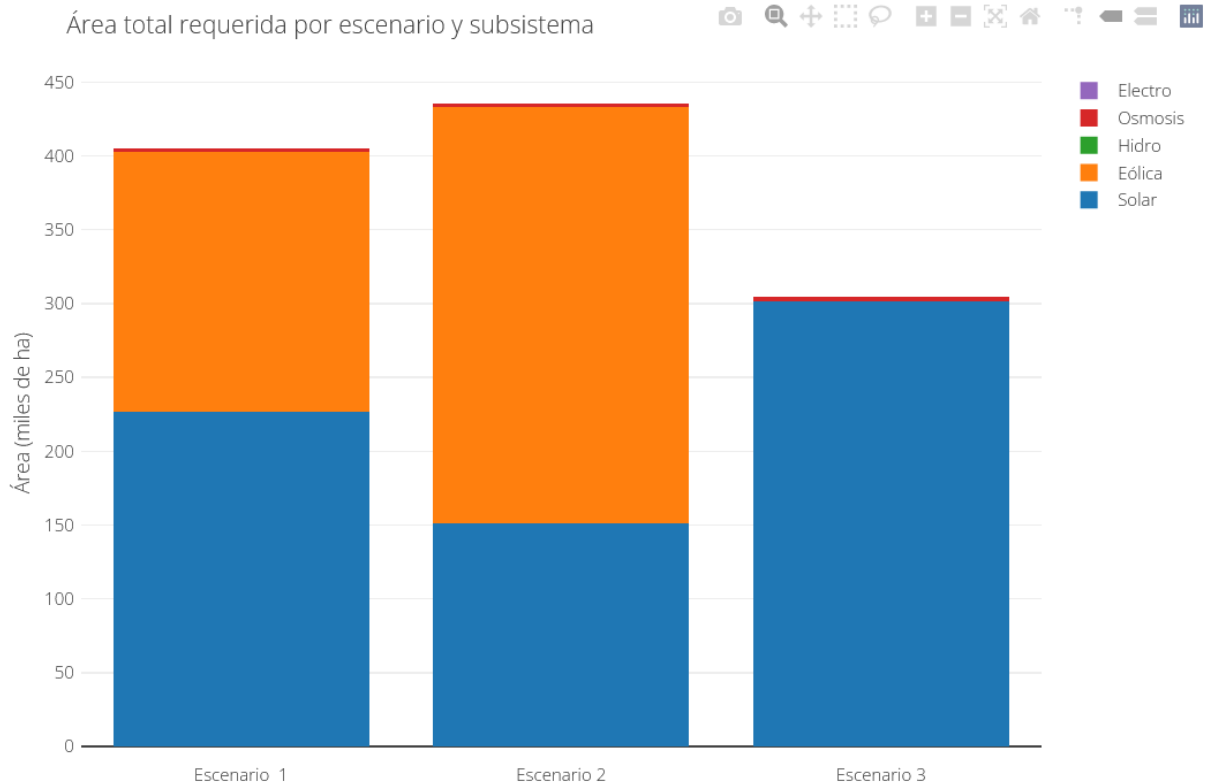
Grupo	Subgrupo	Recurso	Unidad	Esc. 1 - min	Esc. 1 - max	Esc. 2 - min	Esc. 2 - max	Esc. 3 - min
Cemento	Cemento	Cemento	Ton	4,718,541.7	4,758,750.0	7,031,250.0	7,031,250.0	9,375,000.0
Metal	Hierro	Hierro (Fe)	Ton	5,300,520.8	5,456,520.8	7,232,843.8	7,330,343.8	8,977,125.0
Agua	Agua	Agua deionizada	Ton	23,128,167.0	23,128,167.0	34,692,250.5	34,692,250.5	46,256,334.
Áridos	Áridos	Grava	Ton	31,250,040.1	31,870,833.3	46,875,000.0	46,875,000.0	62,500,000.
Electricidad	Electricidad	Electricidad	GWh	10,724,600.4	35,635,706.9	16,061,869.5	53,426,585.5	21,399,138.
Agua	Agua	Agua	Ton	30,543,256.6	61,288,201.9	30,522,657.4	61,249,894.4	30,523,724.

Cómo es posible observar, la demanda está conformada por múltiples materiales, por lo que su análisis crítico requiere diversas formas de representación. Por ello, a continuación pasaremos a analizar las superficies y magnitudes requeridas por la industria del Hidrógeno Verde.

b) Superficie

Al observar el comportamiento de la superficie, en los tres escenarios planteados, el territorio a ocupar supera las 300.000 hectáreas. Tal como se vislumbra en el Gráfico 3, el de mayor extensión es el escenario N°2 con 435.136 has, seguido del escenario N° 1 con 404.941 has y del N° 3 con 304.224 has.

Gráfico 2



Con el objeto de entregar magnitudes de referencia para el uso proyectado de superficie, la plataforma diseñada cuenta con comparaciones que se expresan en las En la Imagen 1, el contraste es realizado con las dimensiones de una cancha de fútbol, donde vemos que la cifra supera las 430.000 canchas en el escenario de menor extensión. Por otra parte, la imagen 2 nos muestra una cifra aún más impresionante al constatar que los escenarios N° 1 y 2 superan en más de un tercio la totalidad de la superficie cultivada de la

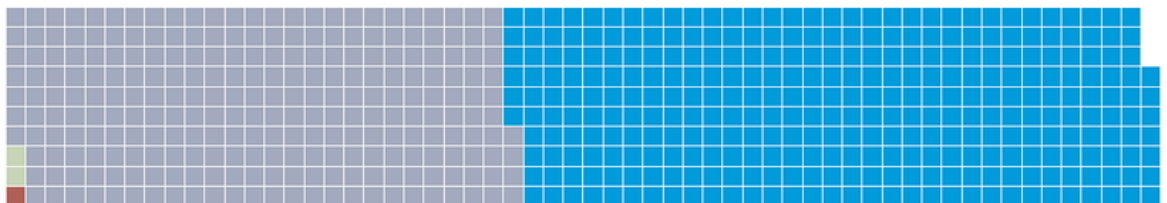
industria frutícola en Chile. Finalmente, la Imagen 3 expresa el uso del territorio comparando la industria del hidrógeno con la ciudad de Santiago, la cual “entra” en el suelo proyectado en los tres escenarios entre 4,74 y 6,78 veces.

Imagen 1

Escenario 1 (Área total 435,136 ha)



Escenario 2 (Área total 404,941 ha)



Escenario 3 (Área total 304,224 ha)

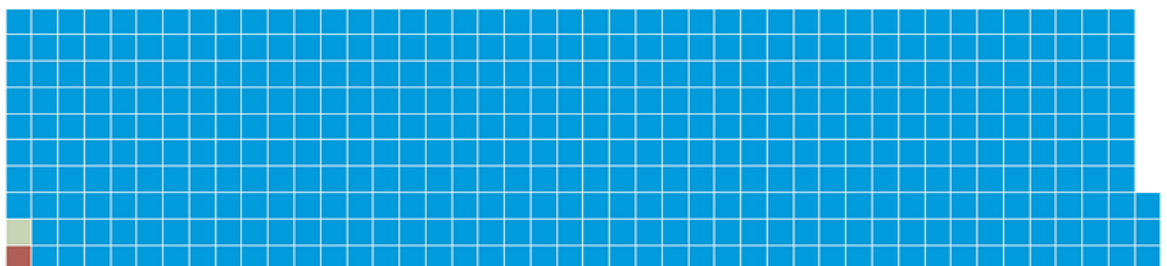


Imagen 2

Escenario 1 (Área total 435,136 ha)



Escenario 2 (Área total 404,941 ha)



Escenario 3 (Área total 304,224 ha ha)



Imagen 3

Escenario 1 (Área Total 435,136 ha)



Escenario 2 (Área Total 404,941 ha)



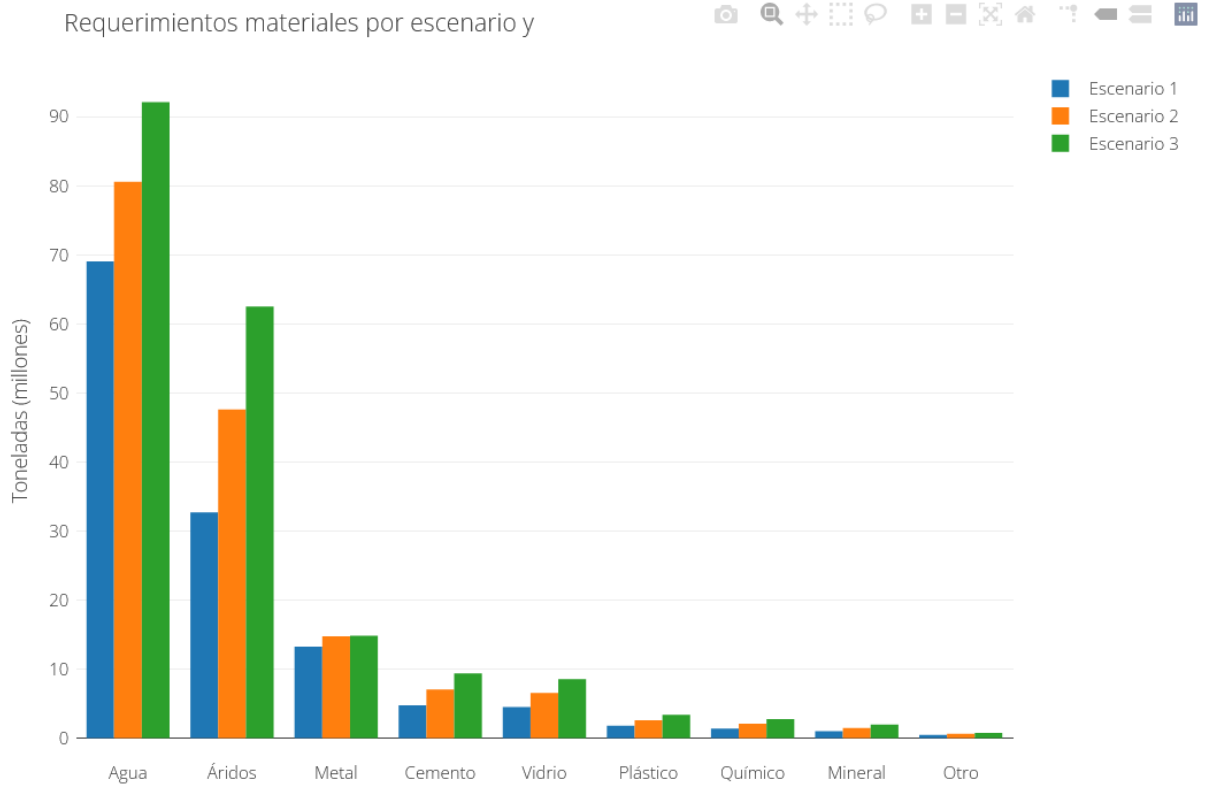
Escenario 3 (Área Total 304,224 ha)



c) Requerimientos materiales

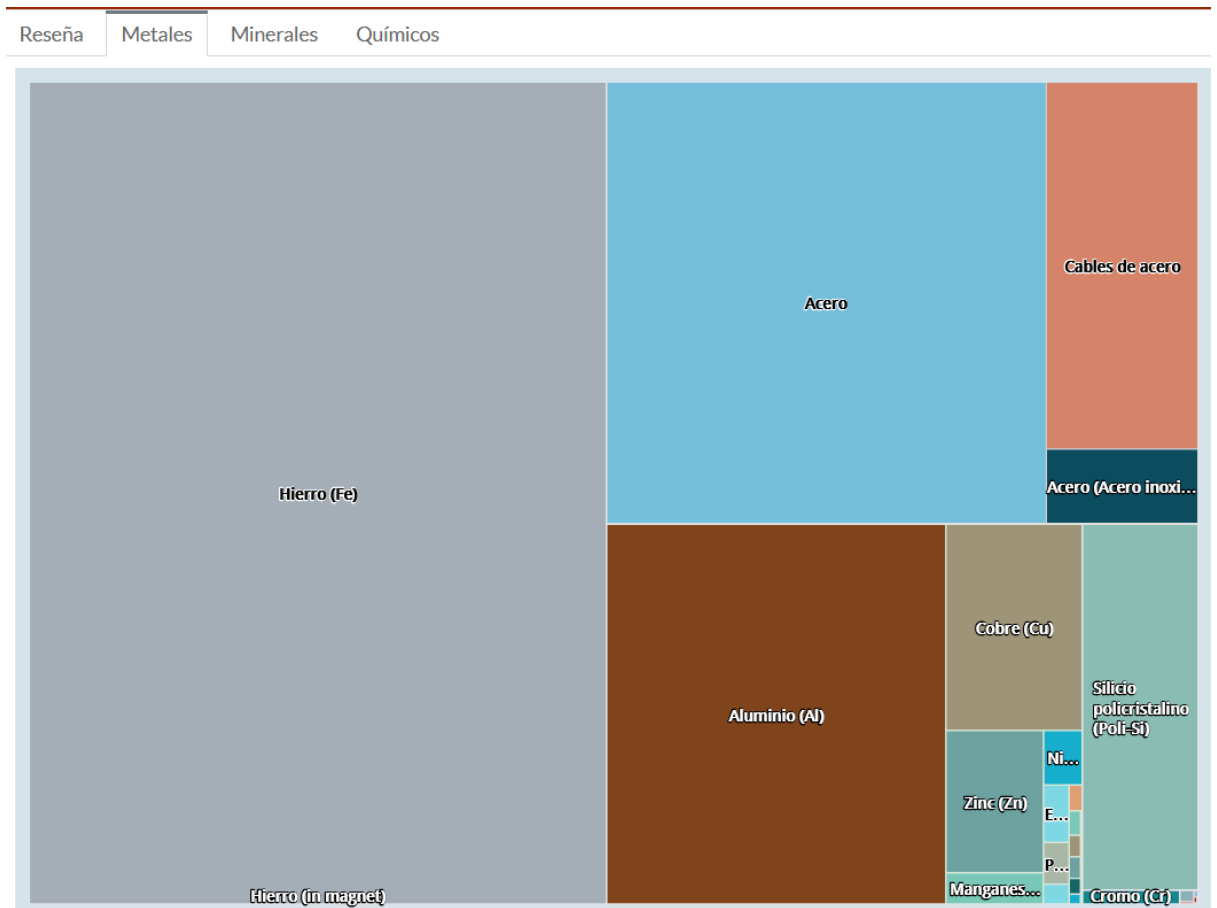
Si ponemos la mirada sobre este aspecto de la demanda de recursos, observamos que en términos de masa, destaca la necesidad de agua y áridos. En un segundo nivel de relevancia se encuentran los metales, cemento y vidrio, para dejar en un espacio menor a los minerales, plásticos y químicos.

Gráfico 3



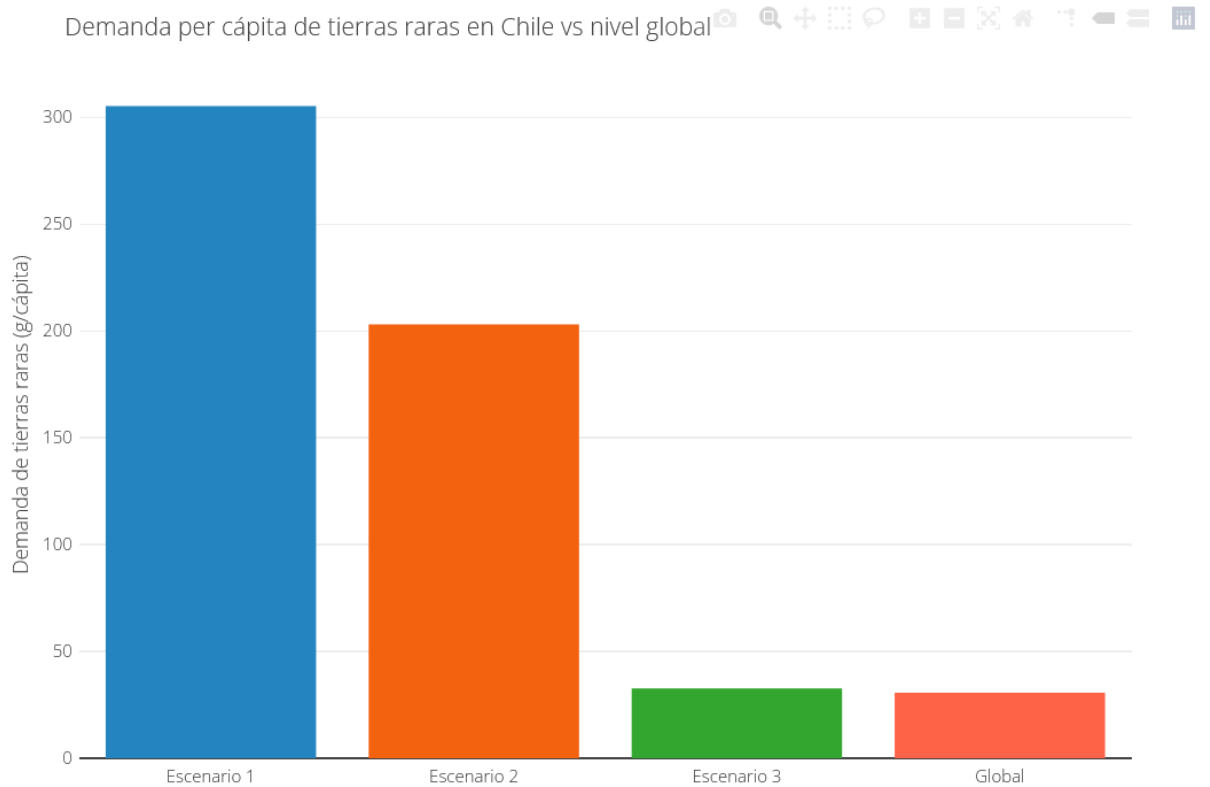
Posteriormente desarrollamos en la plataforma una serie de representaciones en formato “treemap”, que permiten visualizar de forma interactiva la proporción de recursos según grupo (metales, minerales y químicos).

Imagen 4



Finalmente, destacamos el alto nivel de consumo per cápita de tierras raras en el que incurrirá Chile una vez construida la capacidad proyectada de generación de hidrógeno verde. En él se observa que sobrepasamos con creces el promedio global en dos de los tres escenarios proyectados.

Gráfico 4



V. Conclusiones

La presente investigación ha demostrado que el impacto material de la industria del hidrógeno verde, al ser proyectada según las propias estimaciones del estado chileno, será de altas magnitudes. La instalación de la capacidad de generación renovable necesaria para producir 25 GW de hidrógeno verde ocupará un territorio de cientos de miles de hectáreas y requerirá de importantes cantidades de agua, minerales, tierras raras y otros recursos. En particular, el uso de hierro, acero y vidrio



será de magnitudes muy elevadas, mientras que el uso de agua desalinizada trae aparejado un problema muy importante en materia de disposición de la salmuera generada por el proceso de ósmosis inversa.

Debido a lo anterior, consideramos que la información levantada por esta investigación debe constituir un llamado de atención a la forma en que se ha dado el debate relativo al surgimiento e instalación de la industria del hidrógeno verde en nuestro país. Tal como ha sido mencionado en este documento, las estimaciones de inversión y masividad de este nuevo sector económico son gigantescas, lo cual no se ha visto acompañado de una discusión de sus impactos socioambientales. La categorización de esta industria como un pilar fundamental en la descarbonización de las economías globales no puede servir de excusa para ignorar la demanda de recursos materiales y el uso de superficie. Aún estamos a tiempo de repensar de qué forma modificamos la dinámica de relación de la economía con los ecosistemas, que es injusta, ecológicamente negativa y carente de participación de quienes ocupan el territorio.

En ese sentido, nos parece fundamental entender las potencialidades que la transición energética entrega para la sociedad chilena. En ella podemos definir un nuevo modelo de desarrollo que no continúe sosteniéndose en alimentar un



metabolismo social global desbocado y que demanda un crecimiento económico infinito, que no es sostenible.

Por otra parte, es relevante reconocer el papel que la industria del hidrógeno verde puede tener como un sector relevante de la economía nacional en el mediano y largo plazo. Sin embargo, creemos que una pregunta fundamental que aún no se ha siquiera intentado responder, es el “para qué” de la producción de hidrógeno a esta escala.

Los aprendizajes de esta investigación nos permiten identificar futuros espacios de investigación que desarrollamos a continuación:

Potenciales líneas de investigación

- **Características de los Proyectos de inversión:** hasta ahora la información acerca del número y características de los proyectos que serán desarrollados en el marco de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde no son públicos. Esto hace imposible realizar una proyección efectiva de ocupación de territorios para analizar las consecuencias socioambientales y políticas que

estos tendrían. En ese sentido, en la medida en que esa información se vaya transparentando, es relevante acompañar el proceso de diseño e instalación con investigación de ese proceso.

- **Regulación:** actualmente Chile carece de instrumentos legales específicos para tratar este nuevo sector económico que está naciendo. En ese sentido, un análisis más acabado de la situación jurídica actual, así como la sugerencia de modelos regulatorios más efectivos, son aristas de política pública que revisten importancia y justifican nuevos estudios.
- **Ampliar sistemas:** la información pública y los recursos disponibles para esta investigación fueron determinantes para definir las fronteras del sistema proyectado. En ese sentido, nos parece relevante que este primer paso sea complementado con una ampliación de los límites en los que se realizó el flujo de análisis de materiales. Para ello, una línea interesante a incluir sería la construcción de vías de transporte del hidrógeno, como serían carreteras, transporte marítimo o a través de tuberías.
- **Destino de la producción de hidrógeno verde:** nos parece que la información disponible acerca de los usos proyectados de esta industria es



aún muy escasa y difusa. Por ello, es necesario ahondar en estos, ya que se abre un espacio de discusión muy interesante. Mientras, por una parte, observamos que se vislumbran usos del hidrógeno derechamente cuestionables ya sea ambiental (amoníaco para fertilizantes nitrogenados) o éticamente (explosivos); creemos que debe analizarse críticamente el papel que este vector energético puede jugar en la mantención de los altos e ineficientes usos energéticos de las sociedades del Norte Global.

VI. Referencias Bibliográficas

Antosiewicz, Marek; Gonzáles Carrasco, Luis E.; Lewandowski, Piotr; de la Maza Greene, Nicolás. 2020. Green Growth Opportunities for the Decarbonization Goal for Chile : Report on the Macroeconomic Effects of Implementing Climate Change Mitigation Policies in Chile 2020. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34575> License: CC BY 3.0 IGO.”

IRENA (2021), World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Fischer-Kowalski, M. (1998) Society's Metabolism.: The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860– 1970. *Journal of Industrial Ecology* 2(1).

Jerez et al. (2021) Lithium extractivism and water injustices in the Salar de Atacama, Chile: The colonial shadow of green electromobility

Ortega, T (2019) Prólogo: Lo social y lo político en las zonas de Sacrificio, en *Feminismo Popular y Territorios en Resistencia: La lucha de las Mujeres en la Zona de Sacrificio Quintero-Puchuncaví*, Fundación Emerge/ Fundación Heinrich Boell Stiftung, Cono Sur.

Palma-Behnke, R., Abarca del Río, R., Agostini, C., Alvear, C., Amaya, J., Araya, P., Arellano, N., Arriagada, P., Avilés, C., Barría, C., Berg, A., Buchuk, D., Cardemil, J. M., Dall’Orso, F., Domínguez, M. P., Escauriaza, C., Feijoo, F., Figueroa, A., Flores, C. ... Vicuña, S. (2021). The Chilean Potential for Exporting Renewable Energy (Mitigation and Energy Working Group Report). Santiago: Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Temper, L., Avila, S., Bene, D. D., Gobby, J., Kosoy, N., Billon, P. L., Martinez-Alier, J., Perkins, P., Roy, B., Scheidel, A., & Walter, M. (2020). Movements shaping climate

futures: A systematic mapping of protests against fossil fuel and low-carbon energy projects. *Environmental Research Letters*, 15(12), 123004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc197>

Romero-Toledo, Hugo. 2019. "Extractivismo en Chile: la producción del territorio minero y las luchas del pueblo aimara en el Norte Grande". *Colombia Internacional* (98): 3-30. <https://doi.org/10.7440.colombiaint98.2019.01>

Yáñez, Nancy y Raúl Molina. 2008. *La gran minería y los derechos indígenas en el norte de Chile*. Santiago de Chile: Lom Ediciones.

Parámetros materiales:

Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C., European Commission, & Joint Research Centre. (2020). *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859>

de Castro, C. & Capellán-Perez, I. (2020) Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. *Energies* 2020, 13, 3036.

McKinsey and Company (2020). *Chilean Hydrogen Pathway Final Report*.

Recuperado el 1 de octubre desde

https://energia.gob.cl/sites/default/files/estudio_base_para_la_elaboracion_de_la_estrategia_nacional_para_el_desarrollo_de_hidrogeno_verde_en_chile.pdf

Dominish, E., Florin, N. y Teske, S. (2019). *Responsible Minerals Sourcing for Renewable*

Energy. Reporte preparado para Earthworks por el Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney.

International Energy Agency. (2021). World Energy Outlook 2021.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed3b983c-e2c9-401c-8633-749c3fefb375/WorldEnergyOutlook2021.pdf>

International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*. Recuperado el 13 de octubre desde

<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

International Energy Agency. (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. World Energy Outlook Special Report.

Sarai Atab, M., Smallbone, A.J. & Roskilly, A.P. (2016) An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation. *Desalination*, 397.

Shiva Kumar, S. & Himabindu, V. (2019) Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* (2), 2019

Smith, J., Nayak, D. R., & Smith, P. (2014). Wind farms on undegraded peatlands are unlikely to reduce future carbon emissions. *Energy Policy*, 66, 585–591.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.066>

U.S. Department of the Interior (2021) Mineral Commodity Summaries 2021. U.S. Geological Survey.

Yana ,Z., Hitta ,J. Turner, J. & Mallouka, T. (2020). Renewable electricity storage using electrolysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 9;117(23).

World Bank. (2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*.