

## Desafíos hídricos y soluciones sostenibles para el fomento de la industria del hidrógeno verde en la región Tacna - Perú

Manuel De Cossío Klüver\*

### RESUMEN

A continuación, presento algunas ideas para abordar el fomento de la industria del hidrógeno verde en la región de Tacna, Perú, considerando los desafíos hídricos y la necesidad de encontrar fuentes alternativas de agua dulce. Se aborda de manera integral el fomento de la industria del hidrógeno verde en esta región, considerando los desafíos y soluciones sostenibles relacionadas con la escasez de agua. Recurrir a fuentes alternativas de agua podría también permitir reducir la escasez y aliviar las presiones sobre las aguas subterráneas y otras masas de agua naturales. La recarga de acuíferos con las fuentes alternativas, que permite que el agua pase de las aguas superficiales a las subterráneas, es un proceso bien conocido para prevenir la escasez de agua.

**Palabras clave:** Agua, escasez y sostenibilidad, hidrógeno verde, recarga acuíferos, Tacna

---

\* Magíster en Derecho Internacional Público, Relaciones Internacionales y Diplomacia por la Universidad Católica Boliviana "San Pablo". Candidato a doctor en Derecho en la Universidad de Montreal, Canadá. Embajador en el Servicio Diplomático del Perú. Profesor de Relaciones Internacionales de la Universidad San Ignacio de Loyola (USIL) y de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Actualmente es el director general de la Dirección General de Estudios y Estrategias de Política Exterior del Ministerio de Relaciones Exteriores del Perú. Correo electrónico: mdecossio555@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-4077-2147>

## Water Challenges and Sustainable Solutions for the Promotion of the Green Hydrogen Industry in the Tacna Region, Peru

### ABSTRACT

In the following article, I put forward several ideas that address the promotion of the green hydrogen industry in the region of Tacna, Peru, considering the water challenges and the need to find alternative sources of fresh water. The promotion of the green hydrogen industry in this region is approached in a comprehensive manner, considering the challenges and sustainable solutions related to water scarcity. Turning to alternative sources of water could also reduce scarcity and alleviate pressures on groundwater and other natural water bodies. Aquifer recharging from alternative sources, which allows water to move from surface water to groundwater, is a well-known process for preventing water shortages.

**Keywords:** Aquifer recharge, green hydrogen, Tacna, water, water scarcity and sustainability,

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo tiene su origen en estudios previos, así como en el deseo de realizar un homenaje a la población de Tacna al cumplirse un nuevo aniversario de la reincorporación de Tacna a la soberanía nacional que se realizó el 28 de agosto de 1929.

El hidrógeno verde ha emergido como un componente crucial en la transición energética global debido a su capacidad para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Producido mediante la electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica, el hidrógeno verde es una alternativa limpia frente a los combustibles fósiles, cuya combustión es una de las principales fuentes de emisiones de carbono a nivel mundial (Becker, 2023; Gallon y Salgado 2021).

En un contexto donde la mitigación del cambio climático se ha convertido en una prioridad global, el hidrógeno verde ofrece una solución versátil para descarbonizar sectores difíciles de electrificar. Por ejemplo, en la industria pesada, como la siderurgia y la producción de cemento, y en el transporte de larga distancia, como el marítimo y el aéreo, donde las baterías eléctricas no son una opción viable debido a su baja densidad energética. El hidrógeno verde puede ser utilizado directamente como combustible o para la producción de combustibles sintéticos que podrían sustituir al carbón, el petróleo y el gas natural (UNESCO, 2021).

Además, el hidrógeno verde es esencial para mejorar la estabilidad y flexibilidad de las redes eléctricas que dependen cada vez más de fuentes renovables intermitentes. Almacenando energía en forma de hidrógeno, es posible equilibrar la oferta y demanda energética, garantizando un suministro continuo y estable.

A medida que los países se comprometan a reducir sus emisiones netas a cero para mediados de siglo, el hidrógeno verde estaría ganando protagonismo en las estrategias nacionales de descarbonización. Se están desarrollando políticas y marcos regulatorios para fomentar su producción, infraestructura y adopción a gran escala, lo que también podría generar beneficios económicos, como la creación de empleos verdes y el fortalecimiento de la seguridad energética (Fennell et al., 2024; IRENA, 2021).

El Perú cuenta con una matriz energética que, aunque diversificada en comparación con otros países de la región, sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles, especialmente del gas natural, que representa una parte significativa de la generación eléctrica actual. Aunque el país tiene un notable potencial hidroeléctrico, que se sigue explotando, ha comenzado a integrar energías renovables no convencionales como la solar y eólica, la necesidad de diversificar aún más sus fuentes de

energía es evidente para garantizar la sostenibilidad y la seguridad energética a largo plazo (H2 Perú y Asociación Peruana de Hidrógeno, 2021).

La dependencia de recursos no renovables, sumada a las fluctuaciones del clima que pueden afectar la generación hidroeléctrica, expone al país a riesgos tanto económicos como ambientales. En este contexto, el hidrógeno verde emerge como una opción estratégica para el Perú. Su producción, utilizando la abundante energía solar y eólica del país, podría no solo reducir la dependencia de los combustibles fósiles, sino también posicionar al Perú como un líder regional en la producción y exportación de energías limpias.

El hidrógeno verde tiene el potencial de descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado y la industria, al tiempo que ofrece una solución para almacenar y gestionar el exceso de energía renovable. Para el Perú, desarrollar una industria del hidrógeno verde no solo diversificaría su matriz energética, sino que también podría impulsar la economía local, atraer inversiones y contribuir significativamente a los objetivos globales de reducción de emisiones.

Para abordar la viabilidad de un proyecto de producción de hidrógeno verde en la región de Tacna, teniendo en consideración los desafíos relacionados con el acceso al agua dulce, es fundamental establecer que esta región, ubicada en el extremo sur del Perú, tiene un potencial estratégico significativo para la producción de hidrógeno verde, principalmente debido a su abundancia de recursos energéticos renovables y su proximidad al mercado internacional a través del océano Pacífico. Tacna posee un alto nivel de radiación solar durante todo el año, lo que la convierte en un lugar ideal para la instalación de plantas solares fotovoltaicas, fundamentales para la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua.

Además de su potencial solar, Tacna cuenta con infraestructura básica y una ubicación geopolítica privilegiada, cercana a países como Chile y Bolivia, lo que podría facilitar el comercio regional de hidrógeno verde y convertir a la región en un *hub* energético para el sur del Perú y para su entorno internacional. Este desarrollo podría contribuir no solo a la descarbonización de sectores industriales en la región, sino también a la diversificación de la economía local, generando empleo y promoviendo la inversión en tecnologías limpias.

Sin embargo, uno de los desafíos más críticos que enfrenta Tacna para la viabilidad de este proyecto es su limitada disponibilidad de agua dulce. La región se caracteriza por un clima árido y la escasez de recursos hídricos, lo que complica el uso de agua dulce en procesos industriales como la producción de hidrógeno verde, que requiere grandes volúmenes de agua para la electrólisis.

Para superar este obstáculo, es esencial explorar y desarrollar fuentes alternativas de agua (Sadoff y Muller, 2010). Entre las opciones más viables se encuentran:

- La desalación de agua de mar: Dada la proximidad de Tacna al océano Pacífico, la desalación es una solución técnica viable. Las plantas desalinizadoras, alimentadas por la misma energía renovable que se utilizaría para la producción de hidrógeno, pueden proporcionar un suministro constante de agua sin agotar los recursos hídricos ya escasos de la región. Utilizar plantas de desalación alimentadas por energía solar o eólica es una solución viable. Estas plantas pueden convertir agua de mar en agua dulce necesaria para la electrólisis, evitando el agotamiento de las fuentes de agua dulce locales. Un ejemplo exitoso es el proyecto de hidrógeno verde se encuentra en Neom, Arabia Saudita, donde se está desarrollando una planta de hidrógeno verde que integra desalación y energía renovable.
- El reciclaje y reutilización de agua: Ampliar los sistemas de reciclaje de agua dentro del proceso de producción puede reducir significativamente la demanda total de agua dulce. Esta estrategia también puede incluir el uso de aguas residuales tratadas para la electrólisis. La implementación de sistemas cerrados de reciclaje de agua dentro de las plantas de producción puede minimizar la demanda de agua nueva.
- Las tecnologías de captura de agua atmosférica: En zonas áridas, las tecnologías de captura de agua del aire pueden ofrecer una solución complementaria para la obtención de agua en pequeña escala, aunque actualmente estas tecnologías son más útiles como soluciones auxiliares. Aunque aún en desarrollo, la captura de agua atmosférica podría ofrecer una solución complementaria, aprovechando la humedad relativa del aire, incluso en zonas áridas. Estas tecnologías pueden producir pequeñas cantidades de agua potable a partir de la condensación del vapor de agua presente en el aire.
- La optimización de los procesos de electrólisis: Investigaciones están en curso para desarrollar procesos de electrólisis que requieran menos agua o que puedan utilizar agua salada directamente, lo que reduciría la necesidad de agua dulce.

Poner en marcha proyectos de producción de hidrógeno verde en regiones áridas con estrés hídrico como la región Tacna presenta una serie de complejidades debido a la escasez de agua, un recurso esencial para la electrólisis, el proceso principal para la producción de hidrógeno verde. Estas complejidades incluyen desafíos técnicos, económicos y ambientales, que requiere soluciones innovadoras y aprender de las lecciones obtenidas de casos internacionales exitosos.

La principal barrera en regiones áridas a este tipo de proyectos es la disponibilidad limitada de agua dulce, necesaria para la electrólisis. La competencia por los recursos hídricos entre diferentes sectores, como el agrícola, industrial y doméstico, puede agravar las tensiones y limitar el uso de agua en la producción de hidrógeno verde.

Adicionalmente, los costos para obtener agua en regiones áridas, ya sea a través de la desalación o el uso de soluciones novedosas, puede aumentar significativamente los costos operativos del proyecto, afectando su viabilidad económica. También deben tenerse en consideración los impactos ambientales negativos que la construcción y operación de infraestructuras, como plantas desalinizadoras, puede tener en el medio ambiente, incluyendo la afectación de ecosistemas marinos y el aumento de la huella de carbono del proyecto si no se emplean energías renovables.

Es por estas razones que se debe optar por soluciones innovadoras como la desalación de agua de mar con energía renovable, el reciclaje y reutilización de agua, la captura de agua atmosférica, o la optimización de los procesos de electrólisis.

Entre los numerosos casos a nivel internacional que utilizan fuentes alternativas de energía y agua podemos mencionar los siguientes:

- a) Australia: En regiones como Pilbara, Australia, proyectos de hidrógeno verde están integrando la desalación de agua de mar y utilizando energía solar para la electrólisis. La clave del éxito ha sido la integración de infraestructuras de energía renovable a gran escala con soluciones de desalación, manteniendo bajos costos de operación (Australian Government, 2019).
- b) Arabia Saudita: El ya mencionado proyecto de Neom, que incluye la mayor planta de hidrógeno verde del mundo, ha mostrado la viabilidad de combinar energía solar y eólica con desalación en un entorno desértico. El proyecto enfatiza la importancia de la escala y la eficiencia en la reducción de costos y en la minimización de impactos ambientales (Shoonover et al., 2024).
- c) Chile: En el desierto de Atacama, uno de los lugares más áridos del mundo, Chile está desarrollando proyectos de hidrógeno verde utilizando energía solar y eólica. La lección clave es la colaboración público-privada y la necesidad de un marco regulatorio que facilite la inversión y el desarrollo tecnológico (Ministerio de Energía de Chile, 2020).

## 2. CONTEXTO REGIONAL. DESAFÍOS HÍDRICOS EN TACNA

Como se ha mencionado, la región Tacna se encuentra ubicada en el extremo sur del Perú, limitando al norte con la región Moquegua, al este con Bolivia, al sur con Chile

y al oeste con el océano Pacífico. Geográficamente, se caracteriza por ser una región árida, con un clima desértico y semiárido, con escasas precipitaciones a lo largo del año. Presenta una topografía variada, con zonas costeras áridas, valles interandinos y la cordillera de los Andes. La altitud varía desde los 0 metros en la costa hasta más de 4000 metros en la sierra. La región se encuentra influenciada por la corriente fría de Humboldt, lo que provoca una gran aridez en la zona costera (Autoridad Nacional del Agua, 2010).

El clima en Tacna es extremadamente seco, con temperaturas que varían según la altitud. En la costa, las temperaturas son suaves, mientras que en la sierra son frías. La región no tiene una estación seca o húmeda definida, ya que las precipitaciones son muy escasas. La vegetación es escasa y adaptada a las condiciones áridas, con especies como la ichu y la tola.

El estrés hídrico en la región Tacna es un problema crítico debido a la disminución de los recursos hídricos disponibles y la sobreexplotación de los acuíferos. A esta crítica situación se suma el hecho que la región es árida y semiárida, con precipitaciones muy escasas, lo que limita la recarga de los acuíferos y la disponibilidad de agua superficial (Pino, 2021).

En los últimos años la disponibilidad de agua en la región ha disminuido debido a la sobreexplotación de los acuíferos, la contaminación y la sedimentación de los ríos y lagunas. En particular, la extracción excesiva de agua subterránea ha llevado a la disminución de los niveles freáticos, lo que afecta la disponibilidad de agua para consumo humano, agricultura y otros usos.

Se debe añadir que la contaminación por actividades mineras, agrícolas y urbanas afecta la calidad del agua, reduciendo su disponibilidad para uso humano y otros fines.

Esta situación con relación a la demanda de agua para diferentes usos (agricultura, minería, consumo humano, etc.) genera competencia y tensiones por el acceso a este recurso limitado. Asimismo, la escasez de agua afecta la producción agrícola, lo que puede generar pérdidas económicas y afectar la seguridad alimentaria. Finalmente, la falta de acceso a agua potable y servicios sanitarios adecuados afecta la salud y el bienestar de la población, especialmente en zonas rurales y marginadas.

El desarrollo de un proyecto de hidrógeno verde en la región de Tacna enfrenta un obstáculo significativo debido a la escasez de agua dulce. El hidrógeno verde se produce a través de la electrólisis del agua, que requiere grandes cantidades de agua dulce. Es por ello que la región de Tacna, caracterizada por su aridez y limitada disponibilidad de agua dulce, enfrenta retos y desafíos para el proyecto.

Obviamente, la falta de agua dulce en la región Tacna limita la cantidad de hidrógeno que se puede producir, reduciendo la viabilidad del proyecto. La necesidad de transportar agua dulce desde fuentes lejanas o utilizar tecnologías de obsoletas aumenta los costos del proyecto. Asimismo, la extracción de agua dulce de fuentes limitadas puede afectar negativamente los ecosistemas locales y la biodiversidad. Finalmente, la dependencia de fuentes de agua dulce limitadas pone en riesgo la sostenibilidad a largo plazo del proyecto (Autoridad Nacional del Agua, 2010).

Para superar estos obstáculos, se podrían considerar las varias estrategias. Una de ellas podría ser la de utilizar tecnologías de desalinización de agua de mar o de aguas subterráneas salobres para aumentar la disponibilidad de agua dulce. Una segunda podría ser la utilización de agua residual tratada para la producción de hidrógeno verde. En tercer lugar, establecer un plan para implementar medidas de eficiencia en el uso del agua para minimizar el consumo. También debe contemplarse trabajar con las comunidades locales para desarrollar soluciones sostenibles y equitativas para el manejo del agua.

En resumen, la escasez de agua dulce en la región de Tacna representa un obstáculo significativo para el desarrollo de un proyecto de hidrógeno verde. Sin embargo, mediante la implementación de estrategias innovadoras y sostenibles, es posible superar este desafío y avanzar hacia una producción de hidrógeno verde viable y respetuosa con el medio ambiente.

### 3. REQUERIMIENTOS HÍDRICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

La electrólisis es el proceso principal utilizado para producir hidrógeno verde, un tipo de hidrógeno que se obtiene sin emisiones de carbono, utilizando electricidad proveniente de fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica. Este proceso es fundamental para la producción de hidrógeno que no contribuya al cambio climático, lo que lo convierte en una pieza clave para la transición hacia una economía de energía limpia (IRENA y Bluerisk, 2023).

La electrólisis implica la descomposición del agua ( $H_2O$ ) en sus componentes básicos: hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ), mediante la aplicación de una corriente eléctrica. El proceso se lleva a cabo en un dispositivo llamado electrolizador, que consta de tres componentes principales: dos electrodos (ánodo y cátodo) y una membrana).

El proceso de inicia cuando la corriente eléctrica se aplica a los electrodos del electrolizador. Para producir hidrógeno verde, esta electricidad debe provenir de fuentes renovables. El hidrógeno producido se recolecta en forma gaseosa en el cátodo, mientras que el oxígeno, un subproducto del proceso, se libera en el ánodo.

Para que el proceso de electrólisis sea eficiente y para evitar la degradación del equipo, es crucial que el agua utilizada sea de alta pureza. El uso de agua impura o contaminada puede tener varios efectos adversos como la corrosión de los electrodos (las impurezas, como sales o minerales presentes en el agua, pueden corroer los electrodos, reduciendo su vida útil y eficiencia); la contaminación del hidrógeno (las impurezas pueden contaminar el hidrógeno producido, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones que requieren hidrógeno de alta pureza); y la reducción de la eficiencia del proceso (los sólidos disueltos y otros contaminantes pueden interferir con la conductividad eléctrica del agua, aumentando la resistencia y reduciendo la eficiencia general del proceso de electrólisis).

Por estas razones, el agua utilizada en los electrolizadores debe ser purificada mediante procesos como la desmineralización o la ósmosis inversa, lo que asegura que esté libre de sales y otros contaminantes.

La producción de hidrógeno verde a escala industrial requiere una cantidad significativa de agua, dado que el proceso de electrólisis utiliza agua como materia prima para generar hidrógeno y oxígeno. A manera de ejemplo se conoce que, para producir un kilogramo de hidrógeno se necesitan 9 litros de agua.

La producción industrial de hidrógeno se mide típicamente en toneladas métricas. Una tonelada métrica de hidrógeno equivale a 1000 kilogramos (kg) de hidrógeno. Entonces para producir una tonelada métrica de hidrógeno (1000 kg), se necesitan nueve metros cúbicos de agua.

Esto significa que una planta industrial que produzca 100 toneladas de hidrógeno verde al día necesitaría 900 metros cúbicos de agua pura diariamente.

La cantidad de agua puede variar ligeramente dependiendo de la eficiencia del electrolizador utilizado. Las tecnologías más avanzadas pueden optimizar el uso del agua, pero la cantidad básica calculada sigue siendo un buen indicador. Como se ha mencionado, el agua debe ser de alta pureza, lo que puede requerir tratamiento adicional (desalación, ósmosis inversa, etc.) en regiones donde la calidad del agua es un problema.

#### 4. FUENTES ALTERNATIVAS DE AGUA DULCE EN TACNA

Ante la escasez y estrés hídrico existentes en la región Tacna se hace necesaria la búsqueda de fuentes alternativas de agua dulce de calidad que puedan proveer de la cantidad suficiente de este elemento para sostener una industria razonable de hidrógeno verde. A continuación, se revisan, muy brevemente, las posibles fuentes de agua alternativa con las que cuenta Tacna. Por razones de espacio nos concentraremos en

dos de las fuentes alternativas de agua para Tacna. Nos referimos a la desalación de agua de mar y a la reutilización de aguas residuales. Dejaremos de lado las tecnologías de captura de agua atmosférica y la optimización de los procesos de electrólisis (Mahmoudi et al., 2023).

#### 4.1. Desalación de agua de mar

La desalación es un proceso crucial para obtener agua dulce a partir de agua salada, especialmente en regiones con escasez de agua dulce. Dentro de las tecnologías de desalación, la ósmosis inversa es una de las más avanzadas y ampliamente utilizadas. También se conocen otras tecnologías como la destilación multietapa (MED - Multi-Effect Distillation), la destilación por compresión de Vapor (VC - Vapor Compression), la electrodiálisis (ED) y la electrodiálisis reversa (EDR).

Las tecnologías avanzadas de desalación, como la ósmosis inversa, la destilación multietapa, la destilación por compresión de vapor y la electrodiálisis ofrecen soluciones innovadoras para la obtención de agua dulce de alta pureza en regiones con escasez de recursos hídricos.

La elección de la tecnología adecuada depende de factores como la fuente de agua, la escala del proyecto, los costos energéticos y las necesidades específicas de pureza del agua. Para proyectos de hidrógeno verde en regiones áridas, como Tacna, la combinación de una tecnología de desalación eficiente con fuentes de energía renovable puede ser clave para garantizar un suministro sostenible de agua pura, esencial para el éxito de tales iniciativas (Khawaji et al., 2020).

#### 4.2. Reutilización de aguas residuales

El tratamiento y reutilización de aguas residuales urbanas e industriales es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en regiones con escasez de agua. Existen varios métodos avanzados que permiten tratar y reutilizar estas aguas de manera segura y eficiente.

Los principales métodos utilizados son: el tratamiento primario (tamizado, sedimentación) para eliminar sólidos grandes y flotantes, así como sedimentos, antes de los tratamientos más avanzados; el tratamiento secundario para degradar la materia orgánica disuelta y suspendida mediante procesos biológicos; el tratamiento terciario para eliminar contaminantes específicos (nutrientes, metales pesados, patógenos) con la finalidad de mejorar la calidad del agua y prepararla para su reutilización; y, finalmente el tratamiento avanzado y la reutilización a fin de preparar el agua tratada para su reutilización en aplicaciones específicas (riego, uso industrial, recarga de acuíferos, etc.).

En resumen, el tratamiento y la reutilización de aguas residuales urbanas e industriales implican una combinación de tecnologías físicas, químicas y biológicas. La elección de los métodos depende de la calidad del agua residual, los contaminantes presentes y el uso final del agua tratada. Con la implementación de estas tecnologías, es posible reducir la presión sobre los recursos hídricos, promover la sostenibilidad y satisfacer la creciente demanda de agua limpia en diferentes sectores, así como su posible uso en la producción de hidrógeno verde o para la recarga de acuíferos.

## 5. MODELOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN REGIONES ÁRIDAS: LECCIONES APRENDIDAS

Como ejemplos exitosos de proyectos de hidrógeno verde en regiones áridas en esta oportunidad nos concentraremos en tres países: Arabia Saudita, Australia y Chile. En cada uno de estos países se han implementado iniciativas exitosas:

- **Arabia Saudita: Proyecto NEOM**

El proyecto NEOM en Arabia Saudita es una de las iniciativas más ambiciosas del mundo en términos de producción de hidrógeno verde. NEOM es una ciudad planificada en la región de Tabuk, cerca del Mar Rojo, que será alimentada completamente por energías renovables. El proyecto de hidrógeno verde, liderado por la empresa saudí ACWA Power, en asociación con Air Products y NEOM, se centra en la producción de hidrógeno a gran escala utilizando energía solar y eólica. Con una inversión de \$5000 millones, este proyecto tiene como objetivo producir 650 toneladas de hidrógeno verde al día para 2025, lo que convertirá a Arabia Saudita en uno de los mayores productores mundiales de hidrógeno verde. Este hidrógeno será exportado principalmente en forma de amoníaco, destinado a mercados globales como Europa y Asia (Shoonover et al., 2024).

- **Australia: Proyecto Asian Renewable Energy Hub (AREH)**

Australia ha desarrollado varios proyectos clave en el campo del hidrógeno verde, especialmente en regiones áridas como el desierto de Pilbara en Australia Occidental. Uno de los más grandes es el Asian Renewable Energy Hub (AREH), que se plantea como un complejo de energía renovable y producción de hidrógeno verde. El proyecto, que tiene una inversión estimada de \$36 mil millones, planea aprovechar la abundante energía solar y eólica de la región para generar hasta 26 gigavatios de energía, que será utilizada para producir hidrógeno verde. Este hidrógeno será exportado principalmente a los mercados de Asia, que tienen una alta demanda de energía limpia. Además, AREH se ha posicionado como un proyecto clave en la transición energética de Australia y su estrategia para convertirse en un líder global en la exportación de hidrógeno (Autralian Government, 2019).

- **Chile: Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde**

Chile, particularmente en la región del desierto de Atacama, ha lanzado una estrategia nacional para convertirse en un líder global en la producción de hidrógeno verde. El desierto de Atacama, que tiene algunas de las tasas más altas de radiación solar del mundo, es el sitio ideal para la producción de energía solar, que es fundamental para la electrólisis del agua necesaria para producir hidrógeno verde.

El Gobierno chileno ha identificado más de 40 proyectos en diferentes etapas de desarrollo, con el objetivo de alcanzar una capacidad de producción de hidrógeno de 5 gigavatios para 2025 y 25 gigavatios para 2030. Un caso notable es el proyecto de hidrógeno verde en la región de Magallanes, que planea utilizar la energía eólica de la Patagonia para producir y exportar hidrógeno verde y amoníaco a mercados internacionales (Ministerio de Energía de Chile, 2020).

La revisión de estos tres proyectos demuestra cómo diferentes países están aprovechando sus recursos naturales y condiciones climáticas únicas para liderar el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, posicionándose como actores clave en el mercado global de energías renovables.

Adaptar las lecciones exitosas de Arabia Saudita, Australia y Chile, por ejemplo, a las condiciones geográficas y climáticas de Tacna para la producción de hidrógeno verde requeriría una combinación de tecnologías innovadoras y estrategias adecuadas para el uso eficiente de los recursos disponibles, especialmente en cuanto a fuentes de agua no convencionales. A continuación, se detallan algunas posibles adaptaciones:

- **Aprovechamiento de energía solar y eólica:** dadas las condiciones geográficas y climáticas de la región Tacna cuenta con uno de los niveles más altos de radiación solar en el mundo, similar a lo que se encuentra en el desierto de Atacama en Chile y en Arabia Saudita y Australia. Además, hay potencial para la generación de energía eólica en ciertas áreas. En ese sentido, siguiendo el ejemplo de Chile, Australia y Arabia Saudita, Tacna podría desarrollar grandes plantas solares y parques eólicos que generen la electricidad necesaria para los electrolizadores que producen hidrógeno verde. Estos proyectos deben estar optimizados para operar en condiciones de alta radiación y temperaturas extremas, tal como se ha hecho en el desierto de Atacama, en Pilbara (Australia) y el proyecto NEOM en Arabia Saudita.
- **Uso de fuentes de agua no convencionales:** como es sabido Tacna enfrenta un estrés hídrico severo, lo que limita el acceso a fuentes de agua dulce. Sin embargo, la región está relativamente cerca del océano Pacífico, lo que ofrece oportunidades para utilizar las tecnologías de desalación más avanzadas. En este caso, siguiendo

los ejemplos de Arabia Saudita y Australia, Tacna podría adoptar el uso de agua desalinizada para alimentar los electrolizadores de hidrógeno. En Arabia Saudita, donde el acceso al agua dulce es limitado, se utilizan plantas desalinizadoras para proporcionar agua a los proyectos de hidrógeno verde. En Australia, también se están utilizando fuentes de agua no convencionales, como la desalinizada, para apoyar la producción de hidrógeno en áreas áridas.

Teniendo en cuenta estas experiencias, Tacna podría implementar plantas desalinizadoras alimentadas por energía solar o eólica para producir agua limpia sin aumentar la presión sobre los recursos hídricos locales. También se podría considerar el uso de tecnologías de reciclaje de agua y el tratamiento de aguas residuales como fuentes adicionales para la producción de hidrógeno.

En lo que se refiere a la integración y sostenibilidad del proyecto de hidrógeno verde propuesto para Tacna debe considerarse que la región tiene un ecosistema frágil y un entorno árido, lo que hace crucial que cualquier desarrollo industrial sea sostenible y minimice el impacto ambiental. Es por esta razón que, inspirándose en los proyectos en Chile, Arabia Saudita y Australia, Tacna podría integrar prácticas de sostenibilidad en el diseño y operación de las plantas de hidrógeno verde (Arhuata, 2022).

Esta orientación debería incluir la gestión sostenible de los residuos del proceso de desalación, es decir, implementar sistemas de gestión y reciclaje de subproductos de la desalinización. Por ejemplo, podrían emplearse técnicas avanzadas de manejo de agua para minimizar el consumo neto de agua dulce, utilizando soluciones como la reutilización de agua en el proceso de electrólisis.

También se deberían realizar evaluaciones ambientales detalladas para asegurar que los proyectos no dañen el medio ambiente local, tomando en cuenta la biodiversidad y las necesidades de las comunidades locales.

Un factor limitante está constituido por la infraestructura actual de Tacna, especialmente en términos de transporte y almacenamiento de hidrógeno. Por esta razón, Tacna podría desarrollar una infraestructura integrada de transporte y almacenamiento de hidrógeno, siguiendo el modelo de Australia. Esto incluiría la construcción de plantas de licuefacción y almacenamiento cerca de las áreas de producción, así como la instalación de una red de transporte (por ejemplo, tuberías) que conecte la producción con los mercados nacionales e internacionales. Además, la conexión con un puerto especializado en la exportación de hidrógeno podría ser una opción para explorar.

Resulta obvio que un proyecto de esta envergadura necesita de apoyo político y financiero importantes. Como una región relativamente menos desarrollada, Tacna

necesitaría un fuerte apoyo gubernamental y alianzas internacionales para desarrollar un proyecto de esta magnitud.

Apoyándose en la experiencia de Chile, Tacna podría beneficiarse de la creación de una estrategia regional de hidrógeno verde que incluya incentivos fiscales, subvenciones, y asociaciones público-privadas para atraer inversiones. Además, colaboraciones internacionales con países líderes en la producción de hidrógeno verde podrían ayudar a transferir tecnología y conocimiento.

La clave del éxito en Tacna radicaría en combinar estas estrategias con un enfoque apoyado en la sostenibilidad y la adaptación a las condiciones locales, asegurando que los proyectos de hidrógeno verde no solo sean viables, sino también beneficiosos para la comunidad y el medio ambiente.

## 6. POLÍTICAS PÚBLICAS Y MARCO REGULATORIO

Para diseñar un proyecto de desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Tacna que tenga en cuenta el estrés hídrico de la región, es crucial revisar el marco regulatorio existente en el Perú relacionado con la gestión del agua y la energía. A continuación, se identifican las áreas clave donde se requerirían reformas o nuevas políticas, así como incentivos y programas gubernamentales para promover tecnologías sostenibles en la gestión del agua.

En cuanto al marco regulatorio existente, está constituido por:

- Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338): Esta ley regula el uso y la gestión de los recursos hídricos en el Perú, estableciendo que el agua es un bien de dominio público y que su uso debe ser racional y equitativo.
- Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía (Ley N° 27345): Establece disposiciones para fomentar el uso eficiente de la energía en todas las actividades económicas, incluyendo la promoción de energías renovables.
- Decreto Legislativo N° 1002: Promueve la inversión en generación de electricidad con el uso de recursos energéticos renovables (RER), lo cual es fundamental para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde.

Sobre esta base se pueden identificar las áreas donde se requieren reformas o nuevas políticas públicas:

- Reformas en la gestión integrada del agua: Es necesario fortalecer la Ley de Recursos Hídricos para que integre explícitamente la necesidad de gestionar fuentes de agua no convencionales (como desalinización, aguas residuales tratadas

y captación de niebla) para proyectos industriales, incluyendo la producción de hidrógeno verde. En ese sentido, se requiere desarrollar normativa que facilite el uso de agua desalinizada y aguas residuales tratadas en procesos industriales, incluyendo un marco para la concesión de derechos de uso de estas fuentes no convencionales.

- Regulación de tecnologías de desalinización y reutilización de aguas: Actualización de la normativa para regular las tecnologías de desalinización y reutilización de aguas residuales, asegurando que estos procesos sean sostenibles y cumplan con los estándares ambientales. En ese sentido, se debería implementar una regulación específica para el tratamiento y uso de aguas residuales industriales en la producción de hidrógeno, incentivando su utilización en vez de agua potable.
- Promoción de energías renovables para desalinización: alinear la Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía con las necesidades de la industria del hidrógeno verde, promoviendo específicamente el uso de energías renovables (solar y eólica) para procesos de desalinización en regiones áridas. Establecer, por consiguiente, incentivos para que las plantas desalinizadoras en Tacna utilicen energía renovable, reduciendo su huella de carbono y mejorando su viabilidad económica.

Adicionalmente podrían identificarse incentivos y programas gubernamentales orientados a la promoción del uso de tecnologías sostenibles. Por ejemplo, introducir subsidios o créditos fiscales para empresas que implementen tecnologías de desalinización y reutilización de aguas residuales en la producción de hidrógeno verde. Esto podría incluir la reducción de impuestos sobre equipos de desalinización y tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

También podrían establecerse líneas de financiamiento preferencial para proyectos de hidrógeno verde que utilicen tecnologías de desalinización, reciclaje de agua y captación de niebla, recarga de acuíferos con tasas de interés reducidas y períodos de gracia extendidos.

Otra medida podría ser la creación de un fondo gubernamental dedicado a la inversión en infraestructura verde, como plantas de desalinización alimentadas por energía solar o eólica, orientado a facilitar la creación de la infraestructura necesaria para la producción de hidrógeno verde en Tacna. Implementar un proceso regulatorio acelerado (*fast-track*) para la aprobación de proyectos de hidrógeno verde que integren tecnologías de desalinización y uso de aguas residuales. Esto incluiría la simplificación de los trámites ambientales y permisos de agua.

Un tema fundamental es el desarrollo y promoción de infraestructura de agua no convencional orientado a la creación de una infraestructura dedicada para la

distribución de agua desalinizada o tratada desde plantas ubicadas en la costa hacia las zonas industriales en Tacna. También debe explorarse la inversión en la red eléctrica para asegurar el suministro estable de energía renovable a las plantas de desalinización y a los procesos de producción de hidrógeno verde.

Los programas de investigación y capacitación también juegan un papel importante. Por ejemplo, establecer un centro de investigación y desarrollo en Tacna, en colaboración con universidades y el sector privado, enfocado en la innovación en tecnologías de hidrógeno verde, desalinización, y gestión de agua. Este centro debería estar asociado a programas de capacitación para técnicos y profesionales en el uso de tecnologías de gestión de agua no convencional y producción de hidrógeno verde, asegurando que la región cuente con personal capacitado para operar y mantener esta infraestructura.

Las alianzas público-privadas e internacionales con países que lideran en la producción de hidrógeno verde y en tecnologías de desalinización, como Arabia Saudita, Australia y Chile, para transferir conocimientos y tecnología al Perú serían importantes. También el desarrollo de parques industriales dedicados a la producción de hidrógeno verde, donde se integre la captación y gestión de agua no convencional con la producción de energía renovable, impulsando así el desarrollo regional y la atracción de inversiones.

Estas reformas, incentivos y programas reseñados muy rápidamente no solo facilitarían el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Tacna, sino que también asegurarían la sostenibilidad del recurso hídrico en una región que ya enfrenta desafíos significativos en este ámbito.

## 7. IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO. LA TRANSFORMACIÓN ECONÓMICA DE TACNA A TRAVÉS DE LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO VERDE

La puesta en marcha de la industria del hidrógeno verde en Tacna tiene el potencial de transformar la economía regional de manera significativa. Tacna, con su alto nivel de radiación solar y vastas áreas desérticas, ofrece un entorno adecuado para la producción de energía solar, esencial para la electrólisis del agua en la producción de hidrógeno verde (Woods et al., 2022).

A continuación, se analiza el impacto económico, los beneficios ambientales y los riesgos sociales de este proyecto.

La instalación y operación de plantas de hidrógeno verde crearía numerosos empleos directos e indirectos. Durante la fase de construcción, se necesitarán trabajadores en ingeniería, construcción, y servicios relacionados. En la fase operativa, surgirán

empleos en la gestión de plantas, mantenimiento, logística y transporte. Para satisfacer la demanda de mano de obra especializada, se requerirán programas de formación y capacitación en tecnología de hidrógeno, energías renovables y gestión de agua. Esto podría impulsar el desarrollo de centros de capacitación técnica en la región (Singh et al., 2024).

El proyecto permitiría el desarrollo de redes de distribución eléctrica renovable para suministrar energía a las plantas de hidrógeno, así como infraestructuras para el transporte y almacenamiento del hidrógeno producido. La construcción de plantas de desalinización y sistemas de reciclaje de aguas residuales será crucial para proporcionar el agua necesaria para el proceso de electrólisis, aliviando la presión sobre las fuentes de agua dulce locales.

La creación de un *clúster* de hidrógeno verde puede atraer inversión tanto local como extranjera. Las alianzas público-privadas serán fundamentales para financiar proyectos de gran escala y para promover la investigación y desarrollo (I+D) en tecnologías de hidrógeno y gestión de agua.

En lo que se refiere a los beneficios ambientales del proyecto, el hidrógeno verde es una fuente de energía limpia que puede sustituir combustibles fósiles en la industria y el transporte, reduciendo significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto es particularmente relevante para sectores como la minería en Tacna, que podrían reducir su huella de carbono al adoptar hidrógeno como fuente de energía.

La producción de hidrógeno verde fomentaría la expansión de la capacidad de generación de energía renovable en Tacna, particularmente solar. Esto contribuirá a la diversificación de la matriz energética del Perú y al cumplimiento de sus compromisos internacionales de reducción de emisiones.

Adicionalmente, la adopción de tecnologías como la desalinización y la reutilización de aguas residuales puede proporcionar agua no solo para la industria del hidrógeno, sino también para otros usos industriales y urbanos, reduciendo la presión sobre los acuíferos locales y contribuyendo a la gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

Sin embargo, se debe prestar atención a los eventuales riesgos sociales y ambientales que el proyecto podría generar.

A pesar del uso de tecnologías de desalinización y reciclaje de agua, existe el riesgo de que la industria del hidrógeno compita por el agua con las comunidades locales, especialmente si no se implementan adecuadamente las infraestructuras necesarias o si no se gestionan eficazmente las fuentes de agua no convencionales. Es crucial que las políticas y regulaciones aseguren que las comunidades locales no vean restringido

su acceso al agua. Esto puede incluir la priorización del agua para consumo humano y agrícola sobre el uso industrial.

La desalinización, aunque necesaria, puede tener impactos ambientales adversos, como la generación de salmuera y la afectación de los ecosistemas marinos. Se deben establecer regulaciones estrictas para mitigar estos efectos, promoviendo tecnologías más sostenibles y eficientes.

La producción y el uso de hidrógeno deben ser gestionados para minimizar cualquier emisión residual o desechos industriales que puedan surgir, asegurando que el proyecto sea lo más limpio y sostenible posible.

Para que el proyecto sea socialmente equitativo, es fundamental involucrar a las comunidades locales en el proceso de planificación y desarrollo. Esto incluye la consulta previa y la participación en los beneficios económicos y sociales que generará el proyecto.

Las empresas involucradas en la producción de hidrógeno deben implementar programas de responsabilidad social corporativa (RSC) que inviertan en el desarrollo local, mejorando las infraestructuras, servicios y oportunidades para las comunidades cercanas.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El hidrógeno verde no solo desempeña un rol crucial en la reducción de los gases de efecto invernadero y en la lucha contra el cambio climático, sino que también es un pilar fundamental para la transición hacia un sistema energético global más sostenible y resiliente.

La región de Tacna presenta una oportunidad estratégica única para la producción de hidrógeno verde en el Perú, impulsada por su excelente potencial de energía solar. No obstante, la escasez de agua dulce plantea un desafío significativo que debe ser abordado mediante la innovación en la gestión de recursos hídricos. La implementación de tecnologías como la desalación, el reciclaje de agua, y la explotación sostenible de fuentes alternativas es clave para garantizar la viabilidad y el éxito a largo plazo de este proyecto, contribuyendo al liderazgo del Perú en la transición energética global.

La implementación de proyectos de hidrógeno verde en regiones áridas con estrés hídrico es compleja, pero no insuperable. Las soluciones innovadoras, como la desalación alimentada por energías renovables, el reciclaje de agua, y la adopción de nuevas tecnologías, son esenciales para superar los desafíos. Las lecciones aprendidas de casos internacionales subrayan la importancia de la escala, la integración de ener-

gías renovables y la colaboración multisectorial para asegurar el éxito y la sostenibilidad de estos proyectos. Al abordar estos desafíos de manera efectiva, las regiones áridas pueden convertirse en centros estratégicos de producción de hidrógeno verde, contribuyendo significativamente a la transición energética global.

Como se ha discutido, el estrés hídrico en la región Tacna es un problema complejo que requiere una gestión sostenible y equitativa de los recursos hídricos, así como medidas para reducir la demanda y proteger la calidad del agua.

La electrólisis es un proceso clave en la producción de hidrógeno verde, permitiendo descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad renovable. La pureza del agua es esencial para garantizar la eficiencia del proceso y la durabilidad del equipo, lo que subraya la importancia de contar con fuentes de agua pura, especialmente en regiones donde el agua es un recurso escaso. Este enfoque asegura que el hidrógeno producido sea limpio, tanto desde el punto de vista ambiental como técnico, contribuyendo a la transición hacia un futuro energético sostenible.

La producción de hidrógeno verde a escala industrial requiere una cantidad considerable de agua. Por ejemplo, para producir 100 toneladas métricas de hidrógeno verde por día, se necesitan alrededor de 900 000 litros de agua. Este requerimiento resalta la importancia de contar con fuentes sostenibles y confiables de agua, especialmente en regiones donde el recurso es escaso, para asegurar la viabilidad y sostenibilidad de proyectos de hidrógeno verde a gran escala.

El desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Tacna tiene el potencial de transformar la economía regional, creando empleos, desarrollando infraestructuras críticas y atrayendo inversiones significativas. Además, ofrece importantes beneficios ambientales, como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y el alivio del estrés hídrico mediante el uso de tecnologías sostenibles.

Sin embargo, es fundamental abordar los riesgos sociales asociados, particularmente con relación con el acceso al agua para las comunidades locales y la sostenibilidad ambiental. La implementación de un marco regulatorio robusto y la promoción de la participación comunitaria serán esenciales para garantizar que el proyecto sea socialmente equitativo y ambientalmente sostenible, contribuyendo así a un desarrollo regional inclusivo y resiliente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arhuata, C. (2022). Oportunidades de una alianza estratégica entre el Perú y Chile en torno al hidrógeno verde. En *Premio 2021: Integración y Buena Vecindad Chile-Perú / Perú-Chile*. Instituto de Estudios Internacionales (IDEI) de la PUCP, Instituto de Estudios Internacionales (IEI) de la Universidad de Chile y Konrad Adenauer Stiftung. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/183809>
- Australian Government. (2019). *Australia's National Hydrogen Strategy*. COAG Energy Council. <https://www.dccew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Evaluación de Recursos Hídricos cuencas de los ríos Locumba y Sama*. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos Administración Local de Agua Locumba Sama. [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/evaluacion\\_de\\_rh\\_superficiales\\_locumba\\_-\\_sama\\_0\\_2.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/evaluacion_de_rh_superficiales_locumba_-_sama_0_2.pdf)
- Becker, A. (2023). *Desafíos del Hidrógeno Verde ¿Nueva bonanza o más de lo mismo? Friedrich Ebert Stiftung. Proyecto Regional FES Transformación Social-Ecológica*. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/20738.pdf>
- Fennell, J., Awad, M. y Leece, A. (2024). *Hydrogen Production Water Management: Understanding the Challenges*. Integrated Sustainability. <https://www.integratedsustainability.com/insights/whitepapers/hydrogen-production-water-management/>
- Ferroukhi, R., Nagpal, D., Lopez-Peña, A., Hodges, T., Mohtar, R. H., Daher, B. Mohtar, S. y Keulertz, M. (2015). *Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus*. IRENA. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_Water\\_Energy\\_Food\\_Nexus\\_2015.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_Water_Energy_Food_Nexus_2015.pdf)
- Gallon Tamayo, J. L. y Salgado Gonzalez, M. A. (2021). *Hydrogen's New Horizon: Scaling Up Clean Hydrogen for the Power Sector*. World Bank Group. <https://documents.worldbank.org/en/publication/document-reports/documentdetail/099610008052220112/idu04bf8d2300606f04deb084d507b84b54eb458>
- H2 Perú y Asociación Peruana de Hidrógeno/ ENGIE (2021). *Potencial del Hidrógeno Verde en el Perú. Impulsando la transición energética del Perú*. [https://h2.pe/uploads/20210908\\_H2-Peru\\_Estudio-final.pdf](https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf)
- IRENA. (2021). *Green Hydrogen Supply. A Guide to Policy Making*. International Renewable Energy Agency. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA\\_Green\\_Hydrogen\\_Supply\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Green_Hydrogen_Supply_2021.pdf)
- IRENA y Bluerisk. (2023). *Water for hydrogen production*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/Water-for-hydrogen-production>
- Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I. K. y Wie, J. M. (2020). Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*, 221(1-3), 47-69. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.067>
- Mahmoudi, A., Bostani, M., Rashidi, S. y Sadegh Valipour, M. (2023). Challenges and opportunities of desalination with renewable energy resources in Middle East

- countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (184). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113543>
- Ministerio de Energía de Chile. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones*. Gobierno de Chile. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia\\_nacional\\_de\\_hidrogeno\\_verde\\_-\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf)
- Pino, E. (2021). Conflictos por el uso de agua en una región árida: caso Tacna, Perú. *Diálogo Andino*, (65), 405-415. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000200405>
- Sadoff, C. y Muller, M. (2010). *La Gestión del Agua, la Seguridad Hídrica y la Adaptación al Cambio Climático: Efectos Anticipados y Respuestas Esenciales. Global Water Partnership y Comité Técnico (TEC)*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Amb-131.pdf>
- Schoonover, M., Alkhabbaz, M. y D'Agostini, M. (2024). Saudi Arabia and the hydrogen economy. Blue and green hydrogen value chain. En R. Shabaneh, J. Roychoudhury, J. F. Braun, S. Saxena (Eds.), *The Clean Hydrogen Economy and Saudi Arabia* (pp. 500-517). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003294290-20>
- Singh, P., Kumar Agarwal, A., Thakur, A. y Sinha, R. K. (2024). *Challenges and Opportunities in Green Hydrogen Production*. Springer Nature Singapore.
- UNESCO. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>
- Woods, P., Bustamante, H. y Aguey-Zinsou, K.F. (2022). The hydrogen economy - Where is the water? *Energy Nexus*, (7). <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100123>

Fecha de recepción: 1 de setiembre de 2024  
Fecha de aprobación: 30 de octubre de 2024