

Optimizando Tecnologías de Energía Distribuida y Simulando la Cadena de Valor del Hidrógeno Verde en Chile: Una Plataforma en Línea

Alejandro Fernández Gil^{1*}, Roberto Carmona^{1*}, Pablo Rodríguez Machuca², René Garrido Lazo², Daniel Serafini³, Angel Rodríguez Soto¹, Marcelo Mena-Carrasco^{4,5}, Javier Valdes⁶, Yunesky Masip Macia^{1,5}

¹ Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2340025 Valparaíso, Chile

² Departamento de Ingeniería Geoespacial y Ambiental, Universidad de Santiago de Chile, 3363 Santiago de Chile, Chile

³ Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile, 10233 Santiago de Chile, Chile

⁴ Escuela de Ingeniería Bioquímica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 4059 Valparaíso, Chile

⁵ Centro de Acción Climática, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2260000 Valparaíso, Chile

⁶ Institute for Applied Informatics, Deggendorf Institute of Technology, Campus Freyung, 94469 Deggendorf, Germany

{alejandro.fernandez.g, roberto.carmona, angel.rodriguez, marcelo.mena, yunesky.masip}@pucv.cl

{pablo.rodriguez.m, rene.garrido, daniel.serafini}@usach.cl

javier.valdes@th-deg.de

Resumen

Contexto: Este trabajo presenta un novedosa aplicación web para el soporte a la toma de decisiones (Decision Support System (DSS)) que nos permite determinar localizaciones adecuadas para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar y eólica en Chile.

Objetivo: Contribuir al desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno verde y empoderar a los tomadores de decisiones públicos y privados, así como proveer de una herramienta a las comunidades relevantes para la determinación de ubicaciones sostenibles de proyectos de hidrógeno verde, logrando un desarrollo sostenible para las regiones de Chile.

Metodología: Este sistema se desarrolla utilizando un enfoque de investigación que distingue los requisitos y características cruciales existentes en estudios previos y factores socioambientales y técnicos relacionados con características del territorio chileno. Los factores técnicos desempeñan un papel fundamental en la evaluación de la viabilidad de la instalación de plantas de hidrógeno verde, mientras que los factores socio-ambientales pueden imponer limitaciones, por ejemplo, la proximidad a áreas ecológicamente valiosas o a comunidades indígenas. El núcleo de este DSS es un enfoque de toma de decisiones multicriterio (MCDM) que permite a las partes interesadas ponderar estos factores en función de las necesidades específicas del proyecto o las prioridades estratégicas.

Resultados: Este sistema proporciona una visualización interactiva de la superficie terrestre teselada e indicadores de generación de energía potencial, como kilogramos de hidrógeno por kilowatt-peak o metro cuadrado, abarcando las regiones de Chile. Basándose en los hallazgos, se diseña una arquitectura de sistema y un modelo de datos, incorporando la gestión de escenarios regionales chilenos, visualización y gestión de datos geoespaciales reales.

Conclusiones: Este sistema supone una apertura hacia nuevas vías para estrategias de implementación innovadoras, utilizando la información que proporciona el sistema presentado adaptada explícitamente al contexto chileno. Estas estrategias comprenden evaluaciones integrales para abordar los desafíos de viabilidad de la instalación de plantas de hidrógeno verde, potencialmente ayudando en la planificación gubernamental y municipal de la infraestructura de hidrógeno. Además, ofrece la posibilidad de ser extrapolada a otras ubicaciones o regiones a nivel mundial.

Palabras clave: Hidrógeno Verde, Producción de Hidrógeno basada en Energía Solar/Eólica, Energías Renovables, Sistema de Apoyo a Decisiones

Abstract

Context: This study presents a novel web-based decision support system (DSS) that allows us to determine suitable locations for solar- and wind-green hydrogen production based in Chile, a South American country.

Objective: This DSS contributes to developing the green hydrogen value chain to empower public/private decision-makers, as well as communities relevant to the sustainable placement of green hydrogen projects, achieving sustainable development for the regions of Chile.

Method: This system is developed using a design research approach that discerns crucial requirements and characteristics from prior studies and socio-environmental and technical factors related to Chile. Technical factors play a pivotal role in assessing the feasibility of GH₂ plant installation, while socio-environmental factors can impose limitations, such as proximity to ecologically valuable areas and indigenous communities. The core of the DSS is a multi-criteria decision-making (MCDM) formulation that allows stakeholders to weight these factors based on specific project needs or strategic priorities.

Results: The DSS provides an interactive visualization of a tessellated land surface and potential energy generation indicators, such as kilograms of hydrogen per kilowatt peak or square meter, spanning the sixteen regions of Chile. Based on the findings, a system architecture and data model is designed, incorporating the management of Chilean region scenarios, visualization, and geospatial real data management.

Conclusions: These outcomes open avenues for innovative deployment strategies, utilizing insights from the DSS tailored explicitly to the Chilean context. These strategies encompass comprehensive assessments to address GH₂ plant installation feasibility challenges, potentially assisting governmental and municipal planning for hydrogen infrastructure.

Keywords: Green hydrogen, Solar/wind-based hydrogen production, Renewable energies, Decision support system

1. Introducción

El desafío de la mitigación del cambio climático exige una reducción en la intensidad de carbono de los sistemas energéticos. Este apremiante problema está estrechamente vinculado a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera [1]. Con el crecimiento de la población humana, ha habido un aumento correspondiente en la demanda de recursos naturales, lo que ha resultado en un aumento en las emisiones de CO₂. La escalada en las concentraciones de GEI en la atmósfera se puede rastrear hasta la Revolución Industrial (en 1750). Este fenómeno se origina principalmente a partir de la combustión de combustibles fósiles (por ejemplo, carbono y petróleo), especialmente en los sectores industrial, de transporte y de generación de electricidad [2]. A partir de 2021, el sector energético ha surgido como el principal contribuyente mundial a las emisiones de GEI, representando el 77% del total [3], dado que estas fuentes satisfacen el 81% de la demanda energética mundial [4].

La energía eólica y la fotovoltaica solar (PV) destacan como tecnologías clave para lograr este objetivo. Chile presenta ventajas en energías renovables, contando con un potencial eléctrico recientemente estimado de 2.153 gigavatios (GW), lo que representa 76 veces la capacidad eléctrica instalada en 2021, asumiendo que todo el territorio podría ser utilizado para proyectos energéticos [5]. Según el ranking

Climatescope 2020 de Bloomberg New Energy Finance (<https://global-climatescope.org/results>), Chile se posiciona como líder en energía renovable en las regiones de América Latina. Esto se debe al aumento en el presupuesto (de 1.3 mil millones de dólares en 2014 a 3.2 mil millones de dólares en 2015) para proyectos de energía renovable no convencional (ERNCC). El potencial eólico en Chile se origina principalmente en los fuertes vientos que circulan por todo el país, especialmente en las regiones noreste y sureste [6]. La región de Magallanes y la Antártica Chilena cuenta con recursos eólicos excepcionales, estimando un notable potencial de 126.000 MW. Esta capacidad es cuatro veces mayor que la capacidad combinada del sistema eléctrico nacional (SEN) y los sistemas de energía media de Aysén y Magallanes y la Antártica Chilena [7]. Por otro lado, Chile ha experimentado un aumento sustancial en la tecnología fotovoltaica solar en 2016, marcando la adición más significativa en América Latina. El norte de Chile, específicamente el Desierto de Atacama, destaca por albergar los niveles más altos de irradiación solar del mundo. Desde 2014, el despliegue de la tecnología fotovoltaica solar en Chile ha experimentado un crecimiento exponencial, atribuido a los abundantes recursos solares en todo el territorio y las condiciones de mercado favorables que atraen a nuevos inversores [8].

La producción de hidrógeno verde (GH₂) es una tecnología potencial y prometedora propuesta para

abordar la transición energética aprovechando fuentes de energía renovable no convencionales (URES) como la energía eólica y solar para generar hidrógeno. Su generación a partir de URES se considera una opción atractiva y viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de GEI [9]. El hidrógeno presenta un alto potencial energético debido a su alta densidad de energía por unidad de masa y capacidad para servir como portador de energía, lo que permite su almacenamiento y consumo controlado. En este sentido, Chile posee una ventaja competitiva para la producción de GH_2 , se espera que tenga uno de los costos de producción más bajos a nivel mundial para 2023 [10]. Esto abre oportunidades para la producción competitiva a gran escala, posicionando al país como un actor clave en el mercado global de energía renovable.

La transición energética en curso presenta a Chile una oportunidad única para abordar desafíos socioambientales complejos a través de soluciones innovadoras. Las políticas propuestas por el gobierno chileno y el Ministerio de Energía de Chile hacen necesaria la evaluación del potencial de hidrógeno de Chile. El número de plantas de hidrógeno está surgiendo y crecerá en los próximos años; es esencial investigar la ubicación adecuada y el potencial energético de las infraestructuras de hidrógeno en el territorio nacional. El objetivo es satisfacer la demanda energética y el suministro de hidrógeno. Esta tarea puede ser crítica porque hay factores ambientales y técnicos que deben tenerse en cuenta en el proceso de ubicación de la industria de GH_2 ; por ejemplo, la distancia a salares y comunidades indígenas, distancias costeras y potencial de zonas solares y eólicas, entre otros. En este contexto, un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS) puede ayudar al gobierno, a las industrias y a los planificadores a identificar posibles zonas y escenarios y compararlos con resultados visualizados para establecer industrias de GH_2 . Se integraron datos nacionales de 16 factores (8 ambientales y 8 técnicos) en el DSS y se presentaron los resultados en un mapa con la posibilidad dinámica de conocer el potencial de hidrógeno a lo largo de los terrenos de las 16 regiones de Chile.

La motivación principal de este trabajo es contribuir al desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile mediante un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS) que permite identificar ubicaciones óptimas para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar y eólica. Este sistema busca empoderar a tomadores de decisiones públicos y privados, y a las comunidades relevantes, para promover un desarrollo sostenible en las regiones chilenas, evaluando la viabilidad de los proyectos a través de la consideración de factores técnicos y

socioambientales, y facilitando la planificación de infraestructuras energéticas más eficientes y sostenibles. Los resultados de este trabajo abren caminos para estrategias de implementación

2. Estado del Arte

Varios estudios en la literatura han considerado el uso de sistemas de información geográfica (GIS) para identificar áreas adecuadas para la instalación de plantas de GH_2 , considerando una variedad de factores sociales, ambientales y técnicos. Estos estudios varían en términos de las variables que consideran; algunos se centran en la ubicación, el contexto y el transporte, mientras que otros incorporan factores demográficos y la conservación de áreas protegidas, entre otros [11], [12], [13].

Después de revisar varios estudios y plataformas relacionadas con la producción de energía de hidrógeno y los sistemas de apoyo a la toma de decisiones, es evidente que se han explorado varios enfoques. Estos incluyen el uso de sistemas de información geográfica (GIS) para identificar áreas adecuadas para las plantas de GH_2 , considerando factores sociales, ambientales y técnicos. Los estudios varían en las variables que consideran, centrándose en la ubicación, el contexto y el transporte, mientras que otros incorporan factores demográficos y la conservación de áreas protegidas. Por ejemplo, el trabajo de [14] presentó un DSS para identificar sitios prioritarios para la producción de hidrógeno solar en Argelia, específicamente para el sector del transporte. Exploraron ubicaciones potenciales para tales sitios en Argelia, utilizando un enfoque de toma de decisiones multicriterio (MCDM) combinado con GIS y el proceso analítico jerárquico (AHP). Proporcionó un análisis detallado y sistemático, ofreciendo ideas valiosas para las autoridades y los tomadores de decisiones en la planificación estratégica para la implementación de energía renovable en el sector del transporte de Argelia. El artículo publicado en [15] presentó un DSS para localizar futuras estaciones de hidrógeno HRS, empleando dos enfoques diferentes. El primero utilizó un GIS para evaluar ubicaciones potenciales de HRS basadas en criterios de seguridad, mientras que el segundo empleó un modelo de optimización considerando costos de instalación y transporte. El DSS facilita la identificación de sitios adecuados mediante evaluación multicriterio. La investigación de [16] introdujo enfoques innovadores en MCDM para abordar incertidumbres en la selección de ubicaciones de HRS para el sector del transporte. Este trabajo pionero contribuyó al desarrollo de un DSS específicamente diseñado para la selección de ubicaciones de almacenamiento de hidrógeno, llenando un vacío en la investigación

anterior. La tesis de doctorado de [17] exploró la producción de hidrógeno derivada de energías renovables como una solución prometedora para los objetivos globales de reducción de GEI y la seguridad energética. Los autores desarrollaron sistemas de energía innovadores y herramientas de apoyo a la toma de decisiones, centrándose en la integración sostenible de renovables e hidrógeno. La investigación de [18] presentó un novedoso DSS basado en la web diseñado para estaciones de recarga de hidrógeno (HRS) y esquemas de optimización de la cadena de suministro. Incorporando aportes de expertos en hidrógeno, el sistema permite a los usuarios personalizar escenarios, configurar ajustes, analizar resultados y almacenar datos, lo que permite a los tomadores de decisiones evaluar varios escenarios sin habilidades especializadas. Aborda la creciente demanda de estrategias de implementación de HRS en Corea, donde el gobierno planea aumentar drásticamente la adopción de automóviles de hidrógeno e infraestructura para 2040. Los autores de [19] propusieron un enfoque integral para evaluar tecnologías de hidrógeno para la descarbonización en la industria de refinación de petróleo. Introduce un sistema de índices que incorpora principios de sostenibilidad y fiabilidad, utilizando 17 criterios sociales, ambientales, económicos y de fiabilidad. Desarrollaron un DSS práctico para priorizar tecnologías de hidrógeno basadas en sostenibilidad y fiabilidad, con el objetivo de lograr la descarbonización de la refinación de petróleo. Además, la investigación aborda los desafíos de la contaminación del aire en la industria de refinación de petróleo a través de estrategias efectivas de toma de decisiones, particularmente aplicables a regiones como el sur de Irán.

Mientras tanto, han surgido diversas plataformas para abordar diferentes aspectos de la cadena de valor del hidrógeno verde, como la producción, gestión y planificación. Por ejemplo, Fraunhofer Chile, en 2022, propuso una plataforma en línea llamada "Explorador de Hidrógeno Verde" para analizar la prefactibilidad de proyectos de GH_2 en la zona norte de Chile [20]. H2News representa otra plataforma creada en 2023 para difundir información, promover diálogos y comentar sobre el desarrollo de una economía de GH_2 en Chile y América Latina [21]. Un ejemplo de una herramienta colaborativa es una plataforma con un repositorio de GH_2 lanzada en 2020 como H2LAC [22]. Además, la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ) desarrolló una herramienta de evaluación técnico-financiera para proyectos de GH_2 basada en un sistema de archivos Excel [23]. Buscan apoyar al sector financiero en la evaluación preliminar de proyectos para la producción de GH_2 . Además, HEPU es un software de código abierto creado por la empresa Southern Lights.

Proporciona herramientas para diseñar, simular y estudiar la idoneidad de proyectos de GH_2 en Chile, Suiza y Suiza [24].

Como resultado, después de revisar numerosos artículos publicados, no se encontró ningún trabajo o plataforma sobre la decisión estratégica de determinar y analizar las ubicaciones adecuadas para la producción de energía de hidrógeno que integren factores ambientales y tecnológicos en las regiones de Chile. El DSS sugerido se aplica para evaluar estos factores esenciales en la futura industria de energía de hidrógeno en Chile.

3. Metodología

Esta metodología considera dos partes de la siguiente manera: (i) análisis y recopilación de los datos e información relacionados con el contexto territorial, y (ii) identificación y estudio de factores desde el punto de vista de la dimensión técnica y la dimensión socio ambiental (ver Figura 1). La primera dimensión considera la identificación de factores técnicos que facilitan el acceso a la infraestructura (por ejemplo, red de carreteras, subestaciones eléctricas). En contraste, la dimensión socio ambiental se refiere a factores con importancia de conservación para el cuidado y desarrollo de las personas, es decir, áreas ambientales con importancia social. Estas partes establecen la base y las fórmulas matemáticas que facilitan el acceso a la instalación de plantas de GH_2 y el potencial de generación de GH_2 a partir de energía solar y eólica, y ayudan a los tomadores de decisiones a identificar posibles patrones que restrinjan la instalación de plantas de GH_2 .

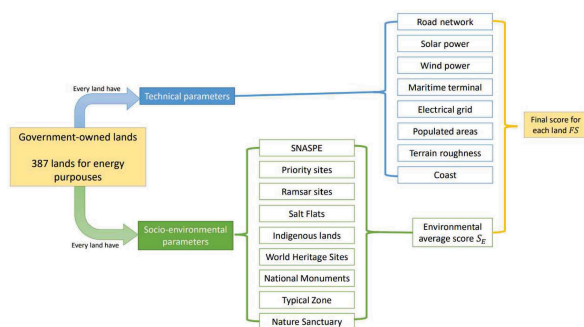


Figura 1. Ilustración de los pasos para obtener los puntajes ambientales promedio y finales. Este diagrama de flujo se aplica a una parcela de tierra a la vez: cada parcela tiene sus propios puntajes de SE y FS [25]

3.1. Datos

Empleamos un algoritmo proporcionado en [25] que permite la clasificación y clasificación de las zonas de

Chile, que son áreas geográficamente definidas por polígonos de coordenadas dadas por longitud y latitud. Con ello, podemos determinar qué tan favorable sería instalar industrias de GH_2 en zonas específicas.

Los datos de las zonas en el país se obtuvieron de tierras estatales reales que han sido licitadas, están en proceso de licitación y serán licitadas. Todas estas tierras cumplen con los criterios fiscales mínimos para uso industrial. Las tierras se clasifican con un ID, un nombre largo que indica la ubicación geográfica de la tierra, y geometría (longitud y latitud de los vértices del polígono o polígono múltiple). La zona norte de Chile recibe una de las cantidades más altas de radiación solar del mundo (hasta 11 kWh/m^2 por día [26]), lo que la convierte en un área favorable para colocar plantas solares. Aunque la alta disponibilidad energética del sector podría usarse para alimentar directamente ciudades o industrias, existen desafíos relacionados con la infraestructura eléctrica. Por otro lado, la región más al sur de Chile experimenta vientos fuertes, lo que la convierte en un buen lugar para plantas de energía eólica. Es importante tener en cuenta que es natural que los resultados del algoritmo muestran resultados favorables para la energía solar. Esto ocurre porque la mayoría de las tierras disponibles se encuentran en la región norte de Chile.

El algoritmo utilizado aquí es independiente de la elección de tierras. Un algoritmo general puede aplicarse a diferentes contextos geográficos, incluso donde las tierras no están distribuidas. Las tierras de propiedad del gobierno ejemplifican casos de la vida real y demuestran cómo funciona el algoritmo y cómo se generan las calificaciones y clasificaciones de las tierras. El método presentado aquí se aplica completamente a cualquier terreno dentro del territorio chileno, en tierra (no mar) y sin cruzar límites territoriales hacia otros países.

3.2. Factores Socio-ambientales y Técnicos

La identificación y evaluación de factores ambientales y técnicos restringirán e influyen en la viabilidad de la instalación de plantas de hidrógeno verde (ver Figura 1). Para este fin, utilizamos herramientas de procesamiento geoespacial (por ejemplo, QGIS).

- Factores socioambientales: Facilitan la importancia de conservación para el cuidado y desarrollo de las personas, es decir, áreas ambientales con importancia social, determinadas en base a ocho criterios (ver Tabla 1, columna 1).

- Factores técnicos: Facilitan o restringen el acceso a la infraestructura (ver Tabla 1, columna 2).

Socio-ambiental	Técnicas
Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado y Conservación Local y Ambiental	Distancia a la costa
Áreas con Valor Ecológico	Rugosidad del terreno
Zonas de humedales	Distancia de la red vial
Salares	Potencial solar
Comunidades indígenas	Potencial eólico
Patrimonio histórico y cultural	Distancia terminal marítima
Monumento nacional	Distancia de la red eléctrica
Santuario de la naturaleza	Distancia áreas pobladas

Tabla 1. Categorías consideradas para los factores socioambientales y técnicos

3.3. Formulación MCDM

Se utilizó una fórmula única para convertir los factores socioambientales (por ejemplo, la distancia a áreas prioritarias de alto valor para la conservación, distancias a salares chilenos, entre otros) en puntajes, considerando que una mayor distancia implica un mejor puntaje.

$P_k(d_{t,i}) = 10 \tanh(\frac{d_{t,i}}{k})$, si el terreno se encuentra fuera de una zona M , de lo contrario 0.

$$N_{M,t} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 P_k(d_{t,i}) = \text{Avg}(P_k(d_{t,1}), \dots, P_k(d_{t,8})) \quad (1)$$

donde t : terreno, $d_{t,i}$: distancia entre terreno i y t , $P_k(d_{t,i})$: puntuación asociada a la distancia $d_{t,i}$.

La fórmula de puntuación difiere para los parámetros técnicos debido a las diferentes escalas y unidades. En este caso, no hay promedio de puntuaciones técnicas:

$$P_k(d_{t,i}) = 10e^{-\frac{d_{t,i}}{k}}; P_k(d_{t,i}) = \tanh\left(\frac{d_{t,i}}{k}\right) \text{ (para solar y viento)}$$

$$P_k(d_{t,9}), \dots, P_k(d_{t,15}), N_{T,t,i} = P_k(d_{t,i}), \forall i \in \{9, \dots, 15\} \quad (2)$$

Puntuación final:

$$FS = p_1 N_{M,t} + \sum_{i=9}^{15} p_i N_{T,t,i}, \text{ donde } p_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3)$$

donde w_i : peso, and p_i : porcentaje.

La Figura 2 para la puntuación socioambiental y la Figura 3 para la puntuación técnica muestran los resultados de la fórmulas de puntuación anteriores donde buscamos determinar si cuanto más corta es la distancia, peor es puntuación o cuanto mayor sea la distancia, mejor será la puntuación

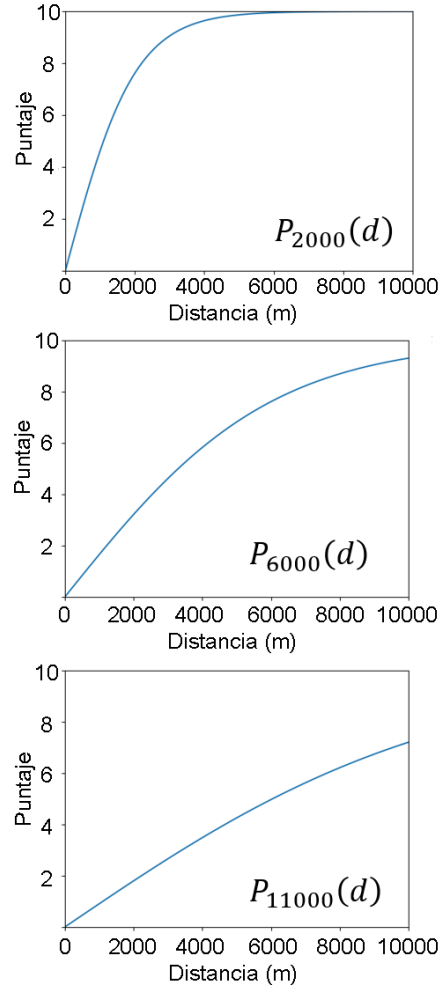


Figura 2. Función de puntuación que convierte los factores socioambientales (distancias) en puntajes. Esta función está acotada $0 \leq P_k \leq 10$. Una

mayor distancia implica un mejor puntaje. Ver Ecuación 1.

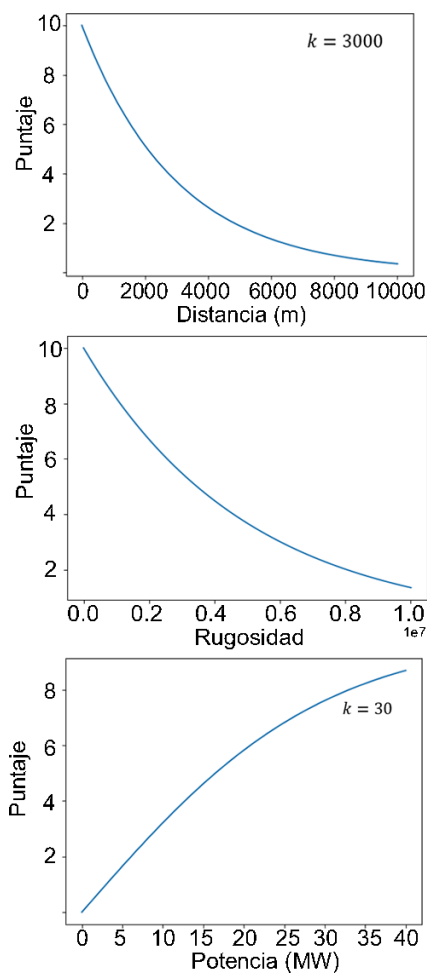


Figura 3. Función de puntuación de la distancia más cercana a la costa y menor rugosidad del terreno (ver Ecuación 2, y mayor energía eólica/solar (ver Ecuación 3) (orden: de izquierda a derecha). Esto permite la conversión de distancias (m) de estos parámetros a una escala entre 0 y 10.

4. Resultados

4.1. Modelado y procesamiento de datos

Todas las zonas (por ejemplo, salares, costas, etc.) fueron marcadas geométricamente como polígonos definidos por coordenadas geográficas (longitud, latitud) (ver Figura 4). Se utilizaron varios algoritmos para simplificar los cálculos y reducir los tiempos computacionales necesarios para obtener las distancias entre zonas públicas y estos objetos geométricos. Primero, las distancias entre dos puntos se definieron como una línea geodésica trazada entre los dos puntos en una superficie aproximada de la Tierra dada por el Sistema Geodésico Global WGS84.

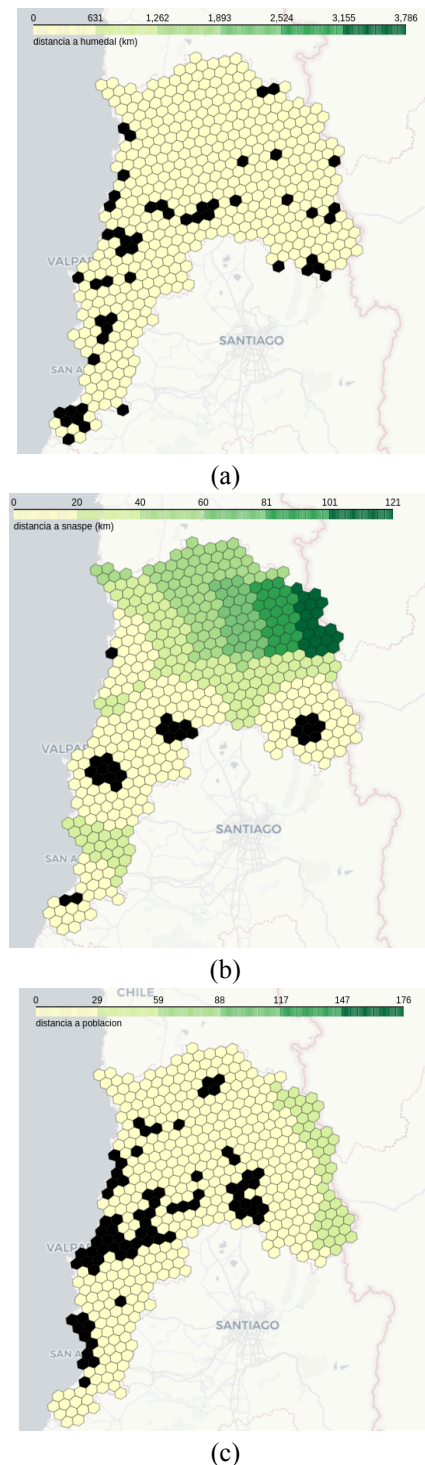


Figura 4. Ejemplo de visualización de diferentes factores por separado: (a) Distancia a Zonas de Humedales, (b) Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), y (c) Distancia a Zonas Pobladas.

4.2. Capacidad de toma de decisiones multicriterio

En el núcleo del DSS se encuentra una herramienta de toma de decisiones multicriterio que permite a los usuarios ponderar diferentes parámetros según las necesidades específicas del proyecto o las prioridades estratégicas. Esta característica permite un proceso de evaluación personalizable, donde los responsables de la toma de decisiones pueden priorizar ciertos criterios, como minimizar el impacto ambiental o maximizar el rendimiento energético. El sistema ajusta dinámicamente las clasificaciones de los sitios potenciales según estas preferencias, proporcionando un resultado personalizado que se alinea con los objetivos del proyecto.

4.3. Plataforma de exploración y dimensión espacial

Realizamos un proceso de teselación (visualizado como hexágonos) para todas las regiones de Chile, considerando una resolución de 25 km². Calculamos las puntuaciones basadas en los factores mencionados anteriormente y creamos una base de datos con las puntuaciones finales para cada hexágono. Estos valores se centran en la producción de kilogramos de hidrógeno verde (kgH₂) utilizando fuentes de energía solar y eólica (ver Figura 5).

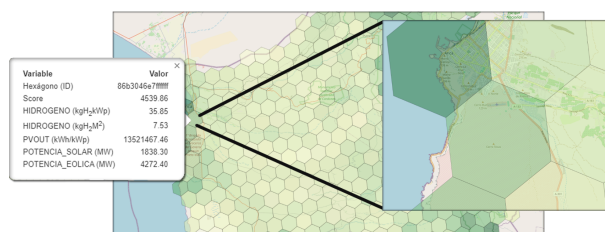


Figura 5. Visualización de una zona teselada (25 km²) e información energética en la región de Arica y Parinacota. Nótese que se visualizaron los factores socioambientales y técnicos con la ponderación máxima de las puntuaciones.

Los factores y modelos se integraron en una plataforma web interactiva, que puede verse como un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS), para ayudar a los responsables de la toma de decisiones. La plataforma está soportada con la teselación de las regiones de Chile, la selección de regiones en opciones comunes o regionales, y la adición de controles que posibilitan la ponderación de los factores socio ambientales o técnicos (*sliders*), lo que significa la importancia asignada a un factor (ver Figura 6). Finalmente, cada hexágono visualizado puede proporcionar información energética enfocada en la producción de hidrógeno verde.

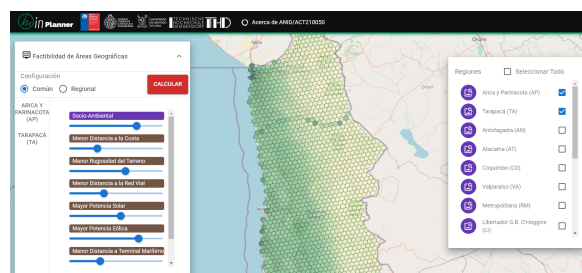


Figura 6. Plataforma eXplorerH2in: Módulo para la viabilidad de áreas geográficas. Este ejemplo visualiza factores (menú izquierdo) para dos regiones (menú derecho).

4.4. Integración de datos de energía renovable

Este DSS integra de manera efectiva datos geográficos sobre la disponibilidad de energía solar y eólica en las regiones de Chile. Al utilizar automáticamente el potencial de energía solar y eólica en cada área prospectiva, el sistema proporciona una visualización clara de las ubicaciones más prometedoras para instalar plantas de hidrógeno verde. Esta característica permite a los responsables de la toma de decisiones identificar rápidamente las regiones del norte como ideales para la producción de hidrógeno basada en energía solar y las áreas del sur para iniciativas basadas en energía eólica. Todo esto para optimizar la utilización de fuentes de energía renovables.

5. Conclusiones

Se desarrolló una plataforma web integral que integró una arquitectura de sistema y un modelo de datos, permitiendo la gestión de escenarios regionales chilenos, la visualización y la gestión de datos geoespaciales reales. Además, se modeló y sistematizó una formulación de toma de decisiones multicriterio que considera factores socio ambientales y técnicos para determinar las ubicaciones adecuadas para la instalación de industrias de hidrógeno verde en Chile. Esta plataforma facilita la implementación de estrategias innovadoras utilizando información adaptada al contexto chileno, y su metodología ofrece la promesa de extrapolación a otras ubicaciones o regiones a nivel global. También proporciona evaluaciones integrales para abordar desafíos en la viabilidad de la instalación de plantas de hidrógeno verde, potencialmente contribuyendo a la planificación gubernamental para el hidrógeno. Los resultados de este estudio aplicado se pueden resumir de la siguiente manera:

- Desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno verde: La herramienta desarrollada contribuye directamente al avance de la cadena de valor del hidrógeno verde al proporcionar una plataforma interactiva que empodera a los tomadores de decisiones públicos y privados, facilitando la identificación de ubicaciones estratégicas para proyectos de hidrógeno verde en Chile.
- Viabilidad de proyectos: El DSS permite una evaluación detallada de la viabilidad de instalar plantas de hidrógeno verde, integrando factores técnicos (como el acceso a infraestructuras) y socioambientales (como la proximidad a áreas ecológicas sensibles y comunidades indígenas). La capacidad de ponderar estos factores asegura que los proyectos seleccionados se alineen con prioridades estratégicas y consideraciones socio-ambientales.
- Planificación de infraestructuras energéticas: El DSS ofrece una herramienta visual e interactiva que permite a las autoridades gubernamentales y planificadores municipales identificar las áreas más prometedoras para la producción de hidrógeno verde. Ayuda a optimizar el uso de recursos energéticos renovables, como la energía solar en el norte de Chile y la energía eólica en el sur, lo que contribuye a la transición hacia energías más limpias y sostenibles en el país.

6. Referencias

- [1] Y. Widiyawati, “Global warming & climate change: Integration of socio-scientific issues to enhance scientific literacy”, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1511, n.º 1, Art. n.º 1, 2020.
- [2] O. US EPA, “Sources of Greenhouse Gas Emissions [Overviews and Factsheets]”, U.S. Environmental Protection Agency, Technical report., 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-green-house-gas-emissions>
- [3] N. García, “Carbono neutralidad en el sector energético de Chile”, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile | Asesoría Técnica Parlamentaria, Technical report., 2021. [En línea]. Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repository/10221/32578/1/BCN_Carbononeutralidad_en_el_sector_energetico_Chile_15Oct_Rev_RT01_edPM.pdf
- [4] IPCC, “Summary for Policymakers”, en *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2014, pp. 1-30.
- [5] C. Vásquez, D. Valdivia, H. Sepúlveda, y M. García, “Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables 2021”, Unidad Gestión de Información División Energías Sostenibles. Ministerio de Energía de Chile, Technical report., 2021. [En línea]. Disponible en: https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/ICPER_2021_v2.pdf
- [6] H. González, W. Jofré, y M. Moreno, “Tecnologías de dominio público. Energía Eólica”, Instituto Nacional de Propiedad Industrial, Technical report., 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.inapi.cl/docs/default-source/default-document-library/articles-11336_recurso_1f94e8815a718490bafc0d7a20e53d9d0.pdf?sfvrsn=e800017c_0
- [7] H. González, W. Jofré, y M. Moreno, “Identificación de Potenciales Renovables: Caso Eólico. Hidrógeno Verde en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena”, Unidad Gestión de Información División Energías Sostenibles. Ministerio de Energía de Chile, Technical report., 2020. [En línea]. Disponible en: https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/Magallanes_White_Paper_Edicion_Feb20.pdf
- [8] A. Zurita *et al.*, “State of the art and future prospects for solar PV development in Chile”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, pp. 701-727, 2018.
- [9] X. Li, C. J. Raorane, C. Xia, Y. Wu, T. K. N. Tran, y T. Khademi, “Latest approaches on green hydrogen as a potential source of renewable energy towards sustainable energy: Spotlighting of recent innovations, challenges, and future insights”, *Fuel*, vol. 334, p. 126684, 2023.
- [10] M. T. Muñoz, H. Chávez, y J. Guajardo, “Economic Analysis: Green Hydrogen Production Systems”, *Processes*, vol. 11, n.º 5, p. 1390, 2023.
- [11] A. Kandakoglu, A. Frini, y S. Ben Amor,

- “Multicriteria decision making for sustainable development: A systematic review”, *J. Multi-Criteria Decis. Anal.*, vol. 26, n.º 5-6, pp. 202-251, 2019.
- [12] B. Elboshy, M. Alwetaishi, R. M. H. Aly, y A. S. Zalhaf, “A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility”, *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, n.º 3, p. 101618, 2022.
- [13] Y. Wang, “Ecological risk identification and assessment of land remediation project based on GIS technology”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 27, pp. 70493-70505, jun. 2023.
- [14] D. Messaoudi, N. Settou, B. Negrou, y B. Settou, “GIS based multi-criteria decision making for solar hydrogen production sites selection in Algeria”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, n.º 60, pp. 31808-31831, 2019.
- [15] H. Dagdougui, A. Ouammi, E. Garbolino, y R. Sacile, “A regional decision support system for locating future hydrogen refueling stations”, en *2012 IEEE International Systems Conference SysCon 2012*, 2012, pp. 1-6.
- [16] K. Kokkinos, E. Nathanail, V. Gerogiannis, K. Moustakas, y V. Karayannis, “Hydrogen storage station location selection in sustainable freight transportation via intuitionistic hesitant decision support system”, *Energy*, vol. 260, p. 125008, 2022.
- [17] H. Dagdougui, “Decision support systems for sustainable renewable energy systems and hydrogen logistics: modelling, control and risk analysis”, Theses, École Nationale Supérieure des Mines de Paris ; Università degli studi di Genova - Italie, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://pastel.hal.science/pastel-00679421>
- [18] H. Ryu *et al.*, “A web-based decision support system (DSS) for hydrogen refueling station location and supply chain optimization”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, n.º 93, pp. 36223-36239, 2023.
- [19] A. Fetanat y M. Tayebi, “Sustainability and reliability-based hydrogen technologies prioritization for decarbonization in the oil refining industry: A decision support system under single-valued neutrosophic set”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 52, pp. 765-786, 2024.
- [20] Fraunhofer Chile, “Explorador de Hidrógeno Verde (EHV): Conoce tu potencial para desarrollar hidrógeno solar”. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.exploradorhidrogenoverde.cl>
- [21] H2News, “La Plataforma de Noticias de Hidrógeno Renovable de Chile para el Mundo”. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://h2news.cl>
- [22] H2LAC, «Plataforma para el desarrollo del hidrógeno verde en Latinoamérica y el Caribe». 2020. [En línea]. Disponible en: <https://h2lac.org>
- [23] GIZ, «Cluster de Energía (4e Chile)». 2022. [En línea]. Disponible en: <https://4echile.cl>
- [24] Southern Lights, “The digital layer of green hydrogen”. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.h-epu.com>
- [25] M. S. Martin *et al.*, “Parameterization proposal to determine the feasibility of geographic areas for the green hydrogen industry under socio-environmental and technical constraints in Chile”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 50, pp. 578-598, 2024.
- [26] A. Molina, M. Falvey, y R. Rondanelli, “A solar radiation database for Chile”, *Sci. Rep.*, vol. 7, n.º 1, p. 14823, 2017.