

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
Programa de Doctorado en Ingeniería Energía



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

**Implicancias ambientales y económicas de la producción
de hidrógeno verde como combustible para el sector
transporte urbano en Latinoamérica**

**Tesis para optar el grado de
Doctor en Ingeniería en Energía**

Autor:

Mg. Castillo Vargas, Santos Andrés
Código ORCID: 0000-0002-7230-2919
DNI. N° 18890865

Asesor:

Dr. Quillos Ruiz, Serapio Agapito
Código ORCID: 0000-0002-4498-0034
DNI. N° 08597503

Línea de investigación
Energía renovable

Nuevo Chimbote - PERÚ
2025



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CERTIFICACIÓN DE ASESORAMIENTO DE TESIS

Yo, Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis Doctoral titulada: "*Implicancias ambientales y económicas de la producción de hidrógeno verde como combustible para el sector transporte urbano en Latinoamérica*", por el maestro Santos Andrés Castillo Vargas, para obtener el Grado Académico de Doctor en Ingeniería en Energía en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, marzo del 2024.

Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz
ASESOR

CODIGO ORCID: 0000-0002-4498-0034
DNI N° 08597503



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

"Implicancias ambientales y económicas de la producción de hidrógeno verde como combustible para el sector transporte urbano en Latinoamérica".

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA EN ENERGÍA

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

DR. GERMAN RAÚL CHUMPITAZ AYALA
PRESIDENTE
CODIGO ORCID: 0000-0003-1448-1602
DNI N° 43152644

Dr. EDGAR PAZ PEREZ
SECRETARIO
CODIGO ORCID: 0009-0001-6853-8144
DNI N° 32978304

DR. SERAPIO AGAPITO QUILLOS RUIZ
VOCAL
CODIGO ORCID: 0000-0002-4498-0034
DNI N° 08597503



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los siete días del mes de febrero del año 2025, siendo las 11:00 horas, en el aula P-01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 535-2024-EPG-UNS de fecha 24.10.2024, conformado por los docentes: Dr. Germán Raúl Chumpitaz Ayala (Presidente), Dr. Edgar Paz Pérez (Secretario) y Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis titulada : **"IMPLICANCIAS AMBIENTALES Y ECONÓMICAS DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE COMO COMBUSTIBLE PARA EL SECTOR TRANSPORTE URBANO EN LATINOAMÉRICA"**; presentado por el tesista Santos Andrés Castillo Vargas, egresado del programa de Doctorado en Ingeniería en Energía.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 077-2025-EPG-UNS de fecha 03 de febrero de 2025.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como APROBADA, asignándole la calificación de 16.

Siendo las 12:30 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.


Dr. Germán Raúl Chumpitaz Ayala
Presidente


Dr. Edgar Paz Pérez
Secretario


Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz
Vocal/Asesor

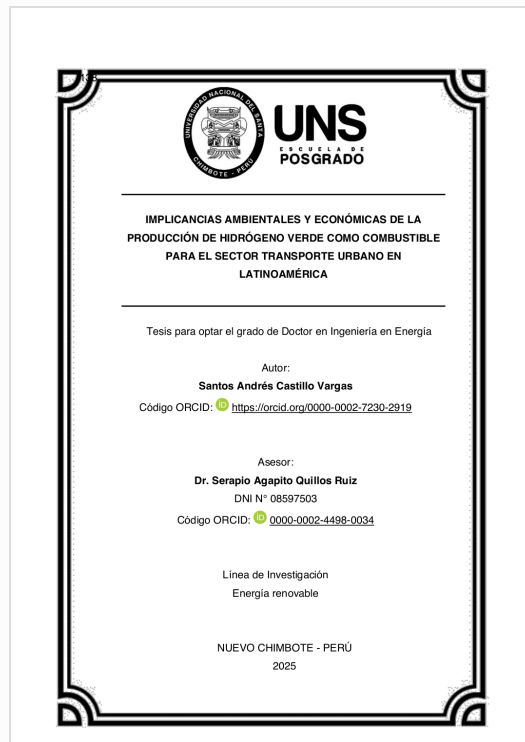


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: SANTOS ANDRES CASTILLO VARGAS
Título del ejercicio: IMPLICANCIAS AMBIENTALES Y ECONÓMICAS DE LA PRODUCC...
Título de la entrega: Tesis doctoral_Andrés Castillo_Repositorio_UNS_2025.docx
Nombre del archivo: Tesis_doctoral_Andrés_Castilo_Repositorio_UNS_2025.docx
Tamaño del archivo: 4.32M
Total páginas: 178
Total de palabras: 47,879
Total de caracteres: 269,931
Fecha de entrega: 14-mar.-2025 10:56p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2615087496



INFORME DE ORIGINALIDAD

11%	10%	6%	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
2	revistaladecin.com Fuente de Internet	<1 %
3	archive.org Fuente de Internet	<1 %
4	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
5	scioteca.caf.com Fuente de Internet	<1 %
6	repositorio.uam.es Fuente de Internet	<1 %
7	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
8	repositorio.epnewman.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
9	revistas.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
10	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
11	www.undp.org Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unitec.edu Fuente de Internet	<1 %

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, por ser mi luz y guía en cada paso de este camino. Su presencia constante me ha llenado de fuerza y sabiduría para superar cada desafío.

A mi amada esposa, Johana Correa, cuyo amor, paciencia y apoyo incondicional han sido el faro que me ha guiado a través de este desafiante pero gratificante viaje. Tu presencia es mi tranquilidad.

A mis queridos hijos, Kasandra, Jonathan y Anderson que, con cada sonrisa y cada gesto de cariño, me recordaron la razón por la que luchaba y el futuro brillante que estamos construyendo juntos. Son mi mayor inspiración y motivación.

AGRADECIMIENTO

Ante todo, mi más profundo agradecimiento a Dios, fuente de toda sabiduría y amor, por iluminar mi camino en cada paso de este desafiante viaje. Su presencia inagotable ha sido mi fortaleza y mi consuelo en los momentos de duda y cansancio.

A mi querida esposa, Johana Correa, no existen palabras suficientes para expresar mi gratitud por tu amor y apoyo inquebrantables. Tu comprensión y paciencia han sido los pilares sobre los que he construido este logro. Gracias por estar a mi lado, en los buenos y malos momentos, y por hacer de nuestro hogar un lugar de paz y motivación.

A mis amados hijos, Kasandra, Jonathan y Anderson, gracias por ser mi alegría y mi escape. Cada risa y cada momento que compartimos me recuerda que la vida va más allá de los libros y los estudios. Ustedes son mi motivación más grande y el corazón de mi vida.

Este logro es tanto mío como suyo, y es un honor compartir cada éxito con ustedes, quienes son mi mayor bendición.

INDICE GENERAL

	Pág.
Certificación del asesor	ii
Aval del jurado	iii
Resumen	xxiii
Abstract	xxiv
Capítulo I: Introducción	25
1.1. Descripción del problema	28
1.2. Formulación de la investigación	30
1.2.1. Problema general	30
1.2.2. Problema específico	30
1.3. Objetivo de la investigación	30
1.3.1. Objetivo general	30
1.3.2. Objetivos específicos	30
1.4. Justificación	31
1.5. Importancia	32
Capitulo II: Marco teórico	33
2.1. Antecedentes de la investigación	33
2.1.1. A nivel internacional	33
2.1.2. A nivel regional	38
2.2. Marco conceptual	46
2.2.1. Implicancia ambiental	46
2.2.2. Electrolisis del agua	48
2.2.3. Biomasa	49
2.2.4. Energías renovables	50
2.2.5. Implicancia económica	50
2.2.6. Movilidad urbana y sus modalidades	53
2.2.7. El transporte público urbano	53
2.2.8. Hidrógeno	53
2.2.9. Combustible	55
2.2.10. Energía	55
2.2.11. Emisiones de CO ₂ de transporte de pasajeros urbanos	56
2.2.12. Energías no Renovables	56
2.2.13. Matriz Energética	57
2.2.14. Transición Energética	57
2.2.15. Seguridad Energética	57
2.2.16. Diversificación de la Matriz Energética	58
Capítulo III: Marco Metodológico	59
3.1. Tipo de investigación	59
3.2. Método de la investigación	59
3.3. Diseño o esquema de la investigación	60

3.4. Población y muestra	60
3.5. Operacionalización de las variables	68
3.6. Técnicas e instrumentos de la investigación	69
3.7. Procedimientos de la recolección de datos	69
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos	72
Capítulo IV: Resultados y Discusión	74
4.1. Sector ambiental en LATAM	74
4.1.1. Argentina	74
4.1.2. Brasil	78
4.1.3. Colombia	82
4.1.4. Chile	86
4.1.5. Ecuador	91
4.1.6. México	94
4.1.7. Paraguay	97
4.1.8. Perú	100
4.1.9. Uruguay	103
4.1.10. Costa Rica	106
4.1.11. Honduras	108
4.2. Impacto ambiental en LATAM	109
4.2.1. Emisiones de GEI	109
4.2.2. Capacidad de producción de HV en países de LATAM	112
4.3. Sector económico en LATAM	115
4.3.1. Argentina	115
4.3.2. Brasil	119
4.3.3. Colombia	123
4.3.4. Chile	127
4.3.5. Ecuador	131
4.3.6. México	134
4.3.7. Paraguay	137
4.3.8. Perú	140
4.3.9. Uruguay	142
4.3.10. Venezuela	144
4.3.11. Costa Rica	145
4.4. Impacto económico en LATAM	147
4.4.1. Inversión extranjera o Nacional para producir HV	142
4.4.2. Costos nivelados del HV en LATAM	150
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	152
5.1. Conclusiones	152
5.2. Recomendaciones	153
Referencias bibliográficas	154

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Emisiones en función del tipo de recorrido (g CO₂/km)</i>	56
Tabla 2 <i>Ficha de recolección datos en LATAM que incluye información relacionadas a las investigaciones y a las variables de estudio</i>	62
Tabla 3 <i>Operacionalización de las variables</i>	68
Tabla 4 <i>Parámetros para el sector ambiental en Argentina</i>	74
Tabla 5 <i>Parámetros para el sector ambiental en Brasil</i>	78
Tabla 6 <i>Parámetros para el sector ambiental en Colombia</i>	83
Tabla 7 <i>Parámetros para el sector ambiental en Chile</i>	87
Tabla 8 <i>Parámetros para el sector ambiental en el Ecuador</i>	92
Tabla 9 <i>Parámetros para el sector ambiental en México</i>	95
Tabla 10 <i>Parámetros para el sector ambiental en el Paraguay</i>	98
Tabla 11 <i>Parámetros para el sector ambiental en el Perú</i>	101
Tabla 12 <i>Parámetros para el sector ambiental en Uruguay</i>	104
Tabla 13 <i>Promedio de la reducción de emisiones de GEI y CO₂ en LATAM</i>	110
Tabla 14 <i>Energía requerida en LATAM para producir 1kg de HV con diferentes fuentes energéticas</i>	112
Tabla 15 <i>Capacidad de producción de HV en LATAM</i>	113
Tabla 16 <i>Capacidad de producción de HV en LATAM en Mt/a</i>	115
Tabla 17 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Argentina</i>	116
Tabla 18 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Brasil</i>	119
Tabla 19 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Colombia</i>	124
Tabla 20 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Chile</i>	128
Tabla 21 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Ecuador</i>	132
Tabla 22 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en México</i>	135
Tabla 23 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Paraguay</i>	138
Tabla 24 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Perú</i>	141
Tabla 25 <i>Resumen de los hallazgos para el sector económico en Uruguay</i>	143
Tabla 26 <i>Resumen de los costos nivelados del hidrógeno en LATAM</i>	150

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Producción del hidrógeno y su aplicación en el transporte</i>	26
Figura 2 <i>Las implicancias ambientales y económicas al producir HV</i>	29
Figura 3 <i>Los efectos negativos que tienen las diferentes actividades en el medio ambiente</i>	47
Figura 4 <i>Diagrama de la descomposición del agua mediante electrólisis</i>	49
Figura 5 <i>Ciclo de la Biomasa</i>	49
Figura 6 <i>Efecto económico en el medio ambiente</i>	51
Figura 7 <i>Métodos de producción de hidrógeno y sus colores</i>	54
Figura 8 <i>Proceso y fuentes de energía ara la producción del hidrógeno</i>	55
Figura 9 <i>Identificación de estudios basados a datos y registros</i>	73

Acrónimos

AEC	: Alkaline Electrolysis Cells (Celdas de Electrólisis Alcalina)
BEA	: Beneficios Económicos y Ambientales
BEV	: Battery Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico de Batería)
BEVs	: Battery Electric Vehicles (Vehículos Eléctricos de Batería)
BDD	: Boron-Doped Diamond (ánodos de diamante dopado con boro)
BID	: Banco Interamericano de Desarrollo
CE	: Consumo Energético
CI	: Competitividad Industrial
CINVESTAV	: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
CP	: Costos de Producción
CT	: Costos Totales
DHS	: Distributed Hydrogen Systems (Sistemas Distribuidos de Hidrógeno)
EGEI	: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
FCEV	: Fuel-Cell Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico de Celdas de Combustible)
FCEVs	: Fuel Cell Electric Vehicles (Vehículos Eléctricos a Celdas Combustible)
FLH	: Full Load Hours (Horas de Carga Plena)
GEI	: Gases de Efecto Invernadero
GH ₂	: Compressed Hydrogen Gas (Hidrógeno Gaseoso Comprimido)
GWP	: Global Warming Potential (Potencial de Calentamiento Global)
HDV-HRS	: Hydrogen Refueling Stations for Heavy-Duty Vehicles (Estaciones de Repostaje de Hidrógeno para Vehículos Pesados)
HV	: Hidrógeno Verde
ICEVs	: Internal Combustion Engine Vehicles (Vehículos con Motor de Combustión Interna)
IED	: Impacto Económico Directo
LCA	: Life Cycle Assessment (Evaluación del Ciclo de Vida)
LCOE	: Levelized Cost of Electricity (El Costo Nivelado de Electricidad)
LCOH	: Levelized Cost of Hydrogen (Costo Nivelado del Hidrógeno)
LATAM	: América Latina
LH ₂	: Cryogenic Liquid Hydrogen (Hidrógeno Líquido Criogénico)

LHV	: Lower Heating Value (Valor Calorífico Inferior)
LOHC	: Liquid Organic Hydrogen Carrier (Portador Orgánico Líquido de Hidrógeno)
MOF	: Metal-Organic Frameworks (Estructuras Metal-Orgánicas en español)
NDC	: Nationally Determined Contribution (Contribución Determinada a Nivel Nacional)
NPV	: Net Present Value (Valor Presente Neto)
PEM	: Proton Exchange Membrane (Membrana de Intercambio de Protones)
PM10	: Partículas en Suspensión menores a 10 micras
PTM	: Potencial Tecnológico de Mejora
SMR	: Steam Methane Reforming (Reformado de Metano con Vapor)
SOEC	: Solid Oxide Electrolysis Cells (Celdas de Electrólisis de Óxido Sólido o Celdas de Óxido Sólido)
UA	: Uso de Agua
UE	: Unión Europea
UMR	: Uso de Materiales Renovables

Simbología

CO ₂	: Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	: Dióxido de Carbono equivalente
CO ₂ e	: CO ₂ e: carbon dioxide equivalent (dióxido de carbono equivalente)
MtCO ₂ -eq	: Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente
Nm ³	: Normales Metros Cúbicos
NO _x	: Óxidos de Nitrógeno
USD/kg-H ₂	: Dólares estadounidenses por kilogramo de hidrógeno

RESUMEN

La presente investigación evalúa el impacto ambiental y económico del HV en el transporte urbano en Latinoamérica, considerando su potencial para: reducir emisiones de GEI y diversificar la matriz energética. Sin embargo, su viabilidad depende de los costos de producción y la infraestructura disponible.

Los resultados muestran que, para 2030, los principales países de la región han proyectado reducciones significativas de emisiones de GEI gracias al uso del HV en el transporte urbano. Brasil estima una reducción del 53% respecto a 2005, Chile hasta 95 MtCO₂-eq, Argentina 27,7%, Colombia 51%, México 147,52 Mt/año, Ecuador 8% con apoyo internacional y Uruguay a una tasa del 1,3% anual. Sin embargo, estos avances dependerán de la capacidad de inversión en infraestructura y regulaciones adecuadas.

En términos económicos, tomando como base comparativa el LCOH global de 4,5 - 6,5 USD/kg, establecido por la Asociación Mexicana de Hidrógeno, podemos ver que Chile, Perú, Brasil y Costa Rica presentan costos competitivos en la producción de HV, debido a su acceso a energías renovables, la disponibilidad de recursos naturales y políticas en desarrollo para fomentar esta tecnología. Otros países como Argentina, Colombia, Paraguay y Uruguay muestran costos bajos, cuyos valores fueron determinados utilizando modelos teóricos e ideales.

El desarrollo del HV en Latinoamérica representa una oportunidad clave para la descarbonización del transporte urbano. No obstante, su éxito dependerá del fortalecimiento de la infraestructura, la implementación de regulaciones adecuadas y la cooperación internacional.

Palabras clave: hidrógeno verde, transporte urbano, impacto ambiental, impacto económico, transición energética.

ABSTRACT

This research evaluates the environmental and economic impact of green hydrogen in urban transportation in Latin America, considering its potential to reduce greenhouse gas emissions and diversify the energy matrix. However, its feasibility depends on production costs and available infrastructure.

The results show that by 2030, the main countries in the region have projected significant reductions in greenhouse gas emissions due to the use of green hydrogen in urban transportation. Brazil estimates a 53% reduction compared to 2005, Chile up to 95 MtCO₂-eq, Argentina 27.7%, Colombia 51%, Mexico 147.52 Mt/year, Ecuador 8% with international support, and Uruguay at a rate of 1.3% per year. However, these advances will depend on investment capacity in infrastructure and appropriate regulations.

In economic terms, using the global levelized cost of hydrogen (LCOH) of 4.5 - 6.5 USD/kg established by the Mexican Hydrogen Association as a reference, Chile, Peru, Brazil, and Costa Rica show competitive costs in green hydrogen production due to their access to renewable energy, availability of natural resources, and developing policies to promote this technology. Other countries, such as Argentina, Colombia, Paraguay, and Uruguay, report low costs, but these values were determined using theoretical and idealized models.

The development of green hydrogen in Latin America represents a key opportunity for the decarbonization of urban transportation. However, its success will depend on strengthening infrastructure, implementing appropriate regulations, and fostering international cooperation.

Keywords: green hydrogen, urban transportation, environmental impact, economic impact, energy transition.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XX, el creciente consumo de combustibles fósiles ha generado graves daños ambientales. Como respuesta a esta problemática, se ha promovido la búsqueda de energías limpias y sostenibles. En este contexto, el hidrógeno (H₂) ha emergido como un vector energético renovable y limpio, con un gran potencial para lograr la neutralidad climática. Su capacidad para integrarse en las políticas públicas energéticas desde el 2020 resalta su papel en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles, ofreciendo una solución sostenible tanto para su producción como para reducir la dependencia de fuentes fósiles (Guo et al., 2024; Sánchez-Peñuela, 2022). Además, tecnologías como la electrólisis, la pirólisis y la gasificación, han permitido una producción eficiente y sostenible del H₂ (Moreno et al., 2022). Particularmente, el uso de electrolizadores alcalinos, con una eficiencia de hasta el 85%, facilitan la integración del HV en sistemas híbridos energéticos, diversificando la matriz energética y promoviendo la descarbonización en sectores industriales y urbanos (Ramos-Sánchez y González-Huerta, 2022; Rodriguez et al., 2022).

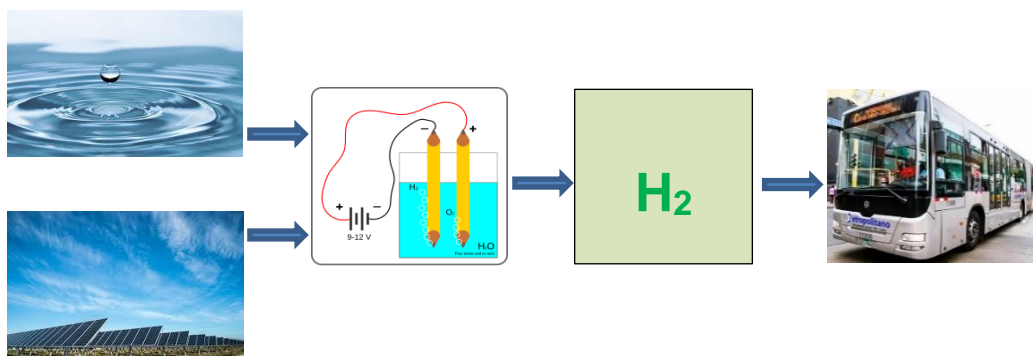
En este contexto, América Latina (LATAM) se perfila como una región estratégica en la transición energética (Benfica y Marques, 2024; Stringer y Ramírez-Melgarejo, 2024). Entre 2013 y 2022, la capacidad instalada de energías renovables aumentó un 65 %, alcanzando 265,82 MW, lo que la consolida como un actor clave en la transición energética global (IRENA, 2023). Países como Brasil, México, Chile y Argentina lideran en tecnologías solares y eólicas, mientras que Brasil y Paraguay destacan en capacidad hidroeléctrica. Además, Chile y Perú se posicionan en la producción de minerales esenciales, como el cobre y el litio, fundamentales para tecnologías de generación renovable en la transición energética (Leañez, 2022). Como se muestra en la **Figura 1**, puede realizarse con energía renovables mediante electrólisis, y su aplicación en el transporte representan una solución estratégica para la reducción de emisiones de GEI en América Latina.

Por su parte, el uso de HV en sectores estratégicos como el transporte se presenta como una solución viable para reducir la dependencia de combustibles fósiles, promoviendo simultáneamente la sostenibilidad ambiental y económica (Castro Verdezoto et al., 2019; IEA, 2023; Wang et al., 2024).

Además, la transición hacia energías renovables no solo es esencial para alcanzar metas climáticas, sino también para promover el crecimiento económico verde (Ibarra Sarlat, 2018). Un análisis de catorce países de LATAM realizado entre 2003 y 2020 confirma que esta transición fomenta el crecimiento económico al incentivar la inversión de capital, reducir la dependencia de fuentes energéticas tradicionales y fomentar un mayor consumo de electricidad residencial per cápita. Asimismo, este impacto varía según la ubicación geográfica y la dependencia de recursos naturales, destacando la necesidad de políticas diferenciadas para responder a las particularidades de cada país (Hwang y Sánchez Díez, 2024).

Figura 1

Producción del hidrógeno verde y su aplicación en el transporte.



El transporte es uno de los mayores consumidores de energía en LATAM, y el hidrógeno verde (HV) se perfila como un vector estratégico para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Aranibar y Olarte, 2024). En Argentina, la transición total de autobuses urbanos a vehículos impulsados por HV podría reducir hasta un 87 % las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), equivalente a 1,3 millones de toneladas anuales (Muñoz et al., 2022). Se proyecta que la huella de carbono de la producción de HV a partir de energía solar y eólica podría reducirse en un 90 % y 70 %, respectivamente, hacia 2050 (Freire Ordóñez et al., 2022).

A pesar de sus beneficios, la producción de HV enfrenta desafíos críticos, especialmente en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos. La electrólisis,

principal método de producción, requiere aproximadamente 9 litros de agua dulce por kilogramo de hidrógeno generado. Este elevado consumo hídrico es una barrera en regiones áridas, donde compite con usos domésticos y agrícolas, afectando especialmente a comunidades rurales vulnerables (Tunn et al., 2024).

Sin embargo, la eficiencia energética del HV puede mejorar mediante mezclas optimizadas con excedentes de gas natural, especialmente en infraestructuras existentes. Este enfoque no solo reduce costos operativos, sino que también minimiza el consumo energético en la compresión y transporte del H₂, facilitando su implementación en regiones con infraestructura limitada (Mustafa et al., 2024). Aun así, los altos costos de infraestructura, la limitada disponibilidad de recursos renovables y los riesgos ambientales por fugas durante el transporte y almacenamiento agravan los desafíos para adoptar el HV como vector energético (Rostami et al., 2024). Asimismo, la transición energética en el transporte urbano hacia tecnologías más limpias enfrenta desafíos como el financiamiento de políticas de energías renovables, la competencia con combustibles alternativos y la necesidad de apoyo a los usuarios de bajos recursos. Estos retos requieren mecanismos especializados bajo supervisión y regulación continua, que aseguren su viabilidad técnica y sostenibilidad a largo plazo (Emodi et al., 2022). Por otro lado, investigaciones recientes destacan aplicaciones prácticas del HV en diversos sectores. En Estados Unidos, se estima que los vehículos ligeros con celdas de combustible (FCEV) podrían sustituir 9,6 mil millones de galones de gasolina al aprovechar excedentes de electricidad renovable mediante electrólisis alimentada por energía eólica. Este enfoque optimiza costos operativos y reduce los impactos ambientales del consumo energético (Nagasawa et al., 2019). Paralelamente, estudios enfocados en la reducción de emisiones de GEI han evaluado tecnologías de los sistemas distribuidos de hidrógeno (DHS) para la producción, almacenamiento y transporte de H₂. Estos destacan beneficios ambientales, pero también desafíos significativos como los altos costos de producción y la infraestructura limitada. No obstante, el uso de energías renovables para la producción de H₂ y la minimización de riesgos asociados al transporte se presentan como soluciones prometedoras para regiones con abundantes recursos naturales (Cavalcanti et al., 2024; Handique et al., 2024).

Investigaciones complementarias han enfatizado la importancia de abordar

aspectos sociales en el desarrollo de tecnologías relacionadas con el HV. Una revisión sistemática de 78 publicaciones subraya que considerar los derechos y necesidades de las comunidades locales es esencial para evitar conflictos sociales y garantizar la preservación de los ecosistemas en áreas afectadas por el desarrollo tecnológico (Vallejos-Romero et al., 2023).

Por lo tanto, comprender las implicancias del HV es fundamental para diseñar políticas que impulsen una transición energética sostenible en LATAM. Este estudio documental, basado en literatura científica relevante, busca integrar perspectivas ambientales, económicas y sociales para promover tecnologías limpias y un desarrollo sostenible en la región.

1.1. Descripción del problema

El cambio climático avanza a un ritmo alarmante, impulsado principalmente por las emisiones de GEI, en las que el CO₂ desempeña un papel clave debido a la quema de combustibles fósiles (Roca Villanueva et al., 2019).

En Argentina, por ejemplo, el sector transporte demandó el 33 % de la energía nacional en 2019, generando 50,18 MtCO₂-eq, equivalentes al 26,6 % de las emisiones totales asociadas al sector energético (Muñoz et al., 2022). Asimismo, en Brasil, tecnologías como la cogeneración de H₂ y electricidad han demostrado su viabilidad para diversificar la matriz energética y mitigar la contaminación atmosférica (Cordaro et al., 2024).

En este contexto, la sustitución de autobuses propulsados por diésel por autobuses equipados con celdas de combustible de H₂ podría reducir hasta un 93 % las emisiones de CO₂, mientras que el cambio de camiones diésel por camiones con celdas de combustible de H₂ permitiría una reducción del 45 % en las emisiones de transporte de carga. Además, se estima que reemplazar la flota de autobuses diésel podría disminuir aproximadamente 1,3 millones de toneladas de CO₂-eq anuales. No obstante, la adopción masiva de estas tecnologías enfrenta desafíos económicos y tecnológicos que se prevé superar en la próxima década (Ajanovic et al., 2021; Lao et al., 2022; Muñoz et al., 2022)

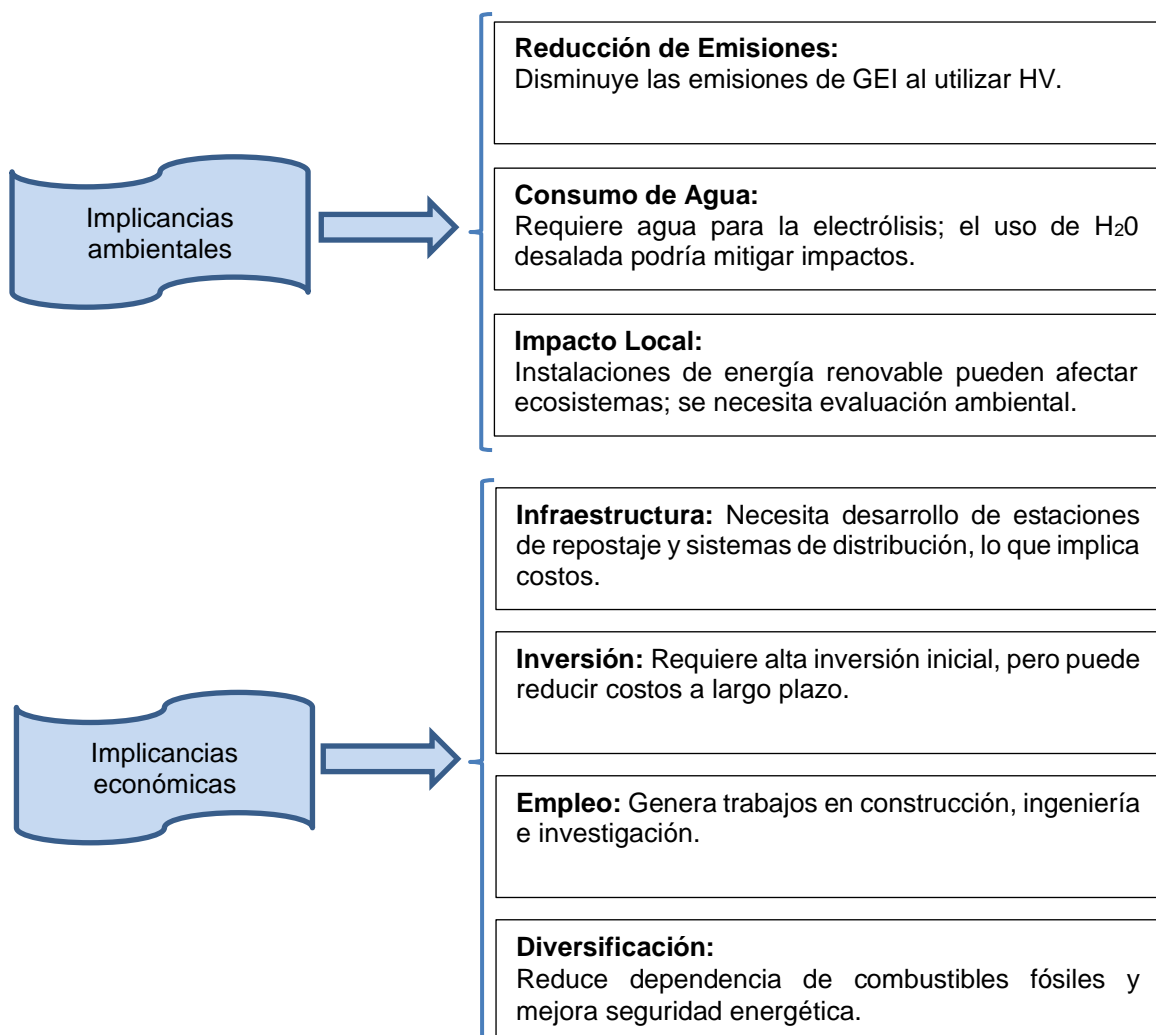
En LATAM, el transporte urbano representa una de las principales fuentes de

emisiones contaminantes debido al predominio de vehículos con motores de combustión interna (Pérez y Osal Herrera, 2020).

Dado este panorama, resulta esencial analizar las implicancias ambientales y económicas asociadas a la producción y uso del HV en el transporte urbano, considerando tanto sus beneficios como los desafíos que plantea. Como se muestra en la Figura 2, estas implicancias abarcan la reducción de emisiones de GEI, el consumo de recursos como el agua, y los desafíos económicos vinculados a la infraestructura y la inversión inicial.

Figura 2

Las implicancias ambientales y económicas al producir HV.



1.2. Formulación de la investigación

1.2.1. Problema general

¿Cuáles son las implicancias ambientales y económicas de la producción de HV como combustible para el sector del transporte urbano en LATAM?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son los impactos ambientales de la producción de HV como combustible para el sector del transporte urbano en LATAM, considerando aspectos como emisiones de GEI, uso de recursos naturales y otros efectos ecológicos?
- ¿Cuáles son las implicancias económicas de la producción de HV como combustible para el sector del transporte urbano en LATAM, haciendo una revisión documentada?
- ¿Cuál es el desempeño energético del HV verde en los países de la región, considerando su producción y uso en el sector del transporte urbano?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Determinar las implicancias ambientales y económicas, con enfoque en la reducción de GEI, de la producción del HV como combustible en el sector del transporte urbano en América Latina.

1.3.2. Objetivos específicos

Implicancias ambientales

- Evaluar las implicancias ambientales del HV, enfocándose en su capacidad para reducir GEI en el transporte urbano en LATAM, haciendo una investigación documental.
- Analizar cómo el HV puede contribuir a diversificar la matriz energética en LATAM.
- Determinar los desafíos ambientales asociados con el uso de

recursos hídricos para la producción de HV en regiones con estrés hídrico, haciendo una investigación documental.

Implicancias económicas

- Evaluar la viabilidad económica de la producción de HV en LATAM, considerando los costos actuales de producción.
- Analizar las oportunidades de empleo generadas por la implementación del HV en el transporte urbano.
- Determinar el impacto de la eficiencia energética del HV en los costos operativos del transporte urbano.
- Explorar cómo la implementación del HV puede fomentar la innovación tecnológica y la competitividad económica en la región.
- Proyectar el posicionamiento de los países latinoamericanos en el mercado global de HV.

1.4. Justificación

La producción de HV constituye una alternativa energética limpia y sostenible, esencial en la mitigación del cambio climático. Actualmente, el 96 % del hidrógeno a nivel mundial se obtiene a partir de combustibles fósiles, lo que contribuye de manera significativa a las emisiones de GEI, mientras que solo un 4 % proviene de procesos de electrólisis. La generación de HV mediante la electrólisis del agua, alimentada por fuentes de energía renovable, elimina la emisión de contaminantes, posicionándose como una solución clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible (Aranibar y Olarte, 2024; Hwang y Sánchez, 2024; Ikuerowo et al., 2024). En este contexto, América Latina cuenta con los recursos para la producción de energías renovables. Brasil, México, Argentina y Chile representan el 93 % de la capacidad de energías renovables que ha entrado en operación en la región; un insumo suficiente para la producción de HV en la región (Adekola et al., 2024; Marinkovic y Vogt-Schilb, 2024).

Aunque LATAM tiene potencial para producir HV, falta información sobre sus

implicancias ambientales y económicas en el transporte urbano, lo que dificulta decisiones y políticas para acelerar la transición energética.

1.5. Importancia

Esta investigación es importante porque aborda un desafío crítico en Latinoamérica: la transición hacia un transporte urbano sostenible mediante el uso de HV. El sector transporte es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero en la región, y el HV representa una alternativa viable para su descarbonización. Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos ambientales y económicos que requieren un análisis detallado. Dado que existen pocos estudios sobre su aplicación en el transporte urbano latinoamericano, este trabajo aporta evidencia clave para el desarrollo de políticas e inversiones estratégicas, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a la transformación del sector energético y de movilidad en la región.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1 A nivel internacional

El uso del HV en el transporte urbano ha ganado atención a nivel mundial por sus beneficios ambientales, como la reducción de emisiones de GEI (Ibarra et al., 2024; Von Zuben et al., 2022), y sus implicancias económicas, incluyendo el potencial de reducción de costos energéticos a largo plazo (Qintero Ávila et al., 2024). El siguiente apartado agrupa los antecedentes internacionales por países, destacando estudios relevantes para entender las implicancias ambientales y económicas del HV.

Unión Europea (UE)

En el contexto europeo, diversos países han desarrollado sistemas innovadores para integrar energías renovables en sectores estratégicos como el transporte y la energía. Según Sadik-Zada et al. (2023), proyectaron que el HV sería económicamente viable en el transporte público alemán a partir de 2035, impulsado por la reducción de costos de producción y el incremento en los precios del carbono. Asimismo, destacó la necesidad de subvenciones gubernamentales y la expansión de la infraestructura de repostaje como factores clave para su adopción. Estos hallazgos indicaron que, con políticas públicas adecuadas, el HV podría consolidarse como una alternativa sostenible y competitiva frente a los combustibles fósiles en el mediano y largo plazo.

Por su parte, Rose y Neumann, (2020) analizaron la integración de estaciones de repostaje de hidrógeno para vehículos pesados (HDV-HRS) con la red eléctrica en Alemania. Este análisis reveló que LCOH oscilan entre 4,83 €/kg y 5,36 €/kg, dependiendo de las configuraciones y la flexibilidad operativa. Aunque estas estaciones incrementarían la demanda eléctrica en

aproximadamente 60 TWh, permitirían reducir los costos anuales en cerca de 7 mil millones de euros al planificar conjuntamente los sectores eléctricos y de transporte, optimizando sinergias y promoviendo la sostenibilidad.

Otro estudio, realizado por Wolff et al. (2021) evaluaron la ecoeficiencia de diversas tecnologías para vehículos pesados, comparando opciones diésel, eléctricas (BEV) y de celdas de combustible (FCEV). Los resultados muestran que el H₂ producido con energías renovables podría disminuir entre un 66 % y un 86 % las emisiones de GEI en escenarios optimistas para 2030. Aunque los costos iniciales de los FCEV son elevados, estos podrían alcanzar niveles de competitividad con los vehículos diésel gracias a políticas agresivas como subsidios y gravámenes al carbono.

Peksen, (2021) destaca la importancia del HV en la transición energética alemana, específicamente en sectores como el transporte y la calefacción, donde representa una solución clave para alcanzar la neutralidad climática. Este autor también enfatiza que el transporte genera más del 50 % de las emisiones totales de movilidad en Europa, por lo que la electrificación y el uso de vehículos de celdas de combustible resultan fundamentales. Asimismo, propone un modelo de gestión del cambio en tres etapas para implementar estas tecnologías, enfrentando desafíos tecnológicos, políticos y sociales.

Por otro lado, en Suecia, Forsberg y Krook-riekkola (2021), utilizaron la herramienta de optimización energética TIMES-City para evaluar el impacto del H₂ en la reducción de emisiones de CO₂ y contaminantes urbanos. Los resultados sugieren que una infraestructura adecuada y el uso de energías renovables no solo mejoran la calidad del aire, sino que también generan importantes ahorros en costos de salud y medio ambiente.

De manera complementaria, Tang et al. (2022) investigaron el LCOH en estaciones de repostaje en Suecia, utilizando energías renovables como la solar fotovoltaica (PV) y eólica. El estudio abarcó varias ciudades suecas, incluyendo Mariestad, Halmstad, Gotemburgo y Estocolmo, bajo escenarios tanto conectados (on-grid) como desconectados (off-grid). Los resultados indicaron que, aunque los costos iniciales son elevados, el enfoque resulta

económicamente viable a largo plazo, especialmente en configuraciones con alta irradiancia solar y con el desarrollo de infraestructura adecuada.

Estados Unidos

Estados Unidos ha explorado diversas tecnologías para integrar el HV en el transporte y la industria. Tonon (2023) destacó el potencial del HV producido a partir de energías renovables como la solar y eólica para descarbonizar sectores industriales y de transporte. El estudio enfatiza que alcanzar un costo nivelado de 2 USD/kg-H₂ es crítico para su adopción masiva, con beneficios económicos significativos a medida que la tecnología madura.

Mallapragada et al. (2020) evaluaron la producción de HV a escala industrial en Estados Unidos integrando tecnologías comerciales de energía solar fotovoltaica, electrólisis y almacenamiento energético. Mediante modelado de diseño y operación de plantas de bajo costo, el estudio identificó configuraciones que pueden alcanzar costos nivelados de 2,5 USD/kg-H₂ en ubicaciones con alta irradiancia solar para 2030. Este enfoque resalta la posibilidad de sustituir el H₂ derivado de gas natural con H₂ verde, logrando costos evitados de CO₂ comparables a los de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.

Adicionalmente, Balaji y You (2024) evaluaron la viabilidad de utilizar energía eólica marina para producir HV, proyectando que esta tecnología podría satisfacer hasta el 75% de la demanda de H₂ en el país y reducir significativamente las emisiones asociadas al transporte pesado, lo que también conllevaría menores costos en infraestructura de energía convencional.

China

Song et al. (2023) realizaron un análisis económico sobre estaciones de repostaje de H₂ alimentadas por energía fotovoltaica en Shanghai. El estudio concluyó que estas estaciones pueden reducir aproximadamente 1 237 toneladas de emisiones de carbono por año y establecieron que el precio mínimo viable del H₂ es de 6,23 USD/kg para garantizar la rentabilidad económica. Este trabajo destaca cómo la integración de energías renovables permite reducir tanto costos como emisiones, recalcando la importancia de

planificaciones similares en ciudades densamente pobladas como parte de la transición energética global.

En cuanto a la planificación estratégica, Zhou et al. (2021) desarrollaron un modelo de optimización geoespacial para identificar las ubicaciones óptimas de estaciones de repostaje de H₂ en China. Este modelo consideró factores como la conveniencia del tráfico y el desarrollo económico, demostrando que una adecuada planificación puede fomentar la adopción del H₂ vehicular en áreas urbanas y reducir los costos logísticos asociados.

Por otro lado, Da Cui et al. (2022), compararon diversos tipos de vehículos en términos de emisiones de GEI, los resultados mostraron que los vehículos a H₂ poseen un alto potencial para reducir emisiones, particularmente cuando se combinan con una matriz energética descarbonizada. Además, estos vehículos generan beneficios económicos al disminuir la dependencia de combustibles fósiles.

Li y Taghizadeh-Hesary (2022) evaluaron la viabilidad económica del HV en el transporte terrestre en China. Según sus hallazgos, el costo del H₂ producido a partir de fuentes renovables varía entre 5,67 y 6,96 USD/kg, dependiendo de la tecnología empleada (solar fotovoltaica, eólica o hidráulica). Los vehículos eléctricos a celdas de combustible (FCEVs) alimentados con hidrógeno generan entre 36 y 49 g de CO₂ por kilómetro recorrido, significativamente menos que los vehículos de combustión interna (ICEVs), que producen hasta 307 g de CO₂ por kilómetro. Aunque los FCEVs enfrentan desafíos económicos frente a otras tecnologías, como los vehículos eléctricos de batería (BEVs), el estudio destaca que políticas agresivas, como subsidios y gravámenes al carbono, podrían mejorar su competitividad, especialmente en el transporte pesado. Este enfoque refuerza el rol del HV en la transición hacia un transporte sostenible.

Japón

Huan et al. (2024) exploraron las percepciones públicas y la aceptación de tecnologías de hidrógeno en Japón, identificando factores clave como la utilidad percibida del hidrógeno en la mitigación del calentamiento global y su contribución a alcanzar la neutralidad de carbono. Según el estudio, la

aceptación cognitiva de estas tecnologías, que incluyen vehículos de celdas de combustible (HFCVs) e infraestructura de repostaje (HRS), fomenta su aceptación práctica. Sin embargo, se destacaron barreras relacionadas con los riesgos percibidos, particularmente en términos de accidentes, los cuales influyen más en la aceptación pública que la probabilidad real de que ocurran. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar estrategias de comunicación efectivas y políticas que promuevan tanto la seguridad como los beneficios ambientales del hidrógeno.

Por su parte, Khan et al. (2021) analizaron los factores que impulsan la adopción temprana de vehículos a celdas de combustible (FCVs) en Japón. Su estudio evidenció que los incentivos gubernamentales, el acceso a infraestructura de repostaje y la percepción pública de los beneficios ambientales son determinantes para promover la transición hacia el HV. Sin embargo, también se identificaron obstáculos significativos, como el alto costo de los vehículos y la limitada infraestructura disponible. Estos resultados destacan la necesidad de políticas públicas más agresivas para superar estas barreras y maximizar los beneficios económicos y ambientales del HV en el transporte urbano.

En línea con este análisis, Yap y McLellan, (2024) señalaron que la aceptación pública de los FCVs en zonas urbanas depende en gran medida de una infraestructura adecuada que facilite su adopción masiva. Asimismo, enfatizaron que el desarrollo de esta tecnología tiene el potencial de reducir los costos energéticos a largo plazo, fortaleciendo la competitividad económica del sector transporte.

Los estudios revisados destacan que el progreso hacia un transporte sostenible basado en HV requiere una sinergia entre políticas públicas y avances tecnológicos, como queda demostrado en el caso de Japón. En el ámbito internacional, la implementación del HV en el transporte urbano ha mostrado avances significativos. Alemania y Suecia lideran con infraestructuras robustas y políticas de apoyo que promueven su competitividad económica, mientras que Estados Unidos y China sobresalen por sus innovaciones tecnológicas destinadas a optimizar costos y reducir emisiones. Japón, por su parte, acentúa el papel decisivo de la aceptación

pública y el respaldo gubernamental como factores clave para consolidar esta transición.

Estas experiencias internacionales destacan que el HV es una solución viable para la descarbonización del transporte y ejemplifica el impacto transformador de políticas ambiciosas y tecnologías de vanguardia, elementos esenciales para avanzar hacia un modelo de movilidad sostenible.

2.1.2 A nivel regional

El H₂ es un recurso versátil que puede obtenerse de diversas fuentes en nuestro planeta, aunque generalmente se encuentra en compuestos químicos cuya extracción implica un elevado costo energético. La fuente más abundante de H₂ es el agua, pero también puede obtenerse de combustibles fósiles y biomasa (Carlos Quinteros, 2020).

La producción de HV en LATAM está emergiendo como un pilar clave en la transición energética global gracias a sus recursos renovables y compromiso con la descarbonización. Se proyecta que podría alcanzar 6 millones de toneladas para 2030, representando más del 15 % de la producción mundial. Chile, Perú y Colombia lideran con proyectos emblemáticos: Chile en producción de acero, Perú en operaciones mineras y Colombia a través de Ecopetrol. Brasil, Uruguay y Argentina también avanzan con estrategias y proyectos clave. Aunque la electrólisis requiere un consumo significativo de agua, la región se perfila como un productor competitivo y proveedor clave para 2050 (IEA, 2023).

A continuación, se destacan los avances y desafíos de los países más representativos de LATAM.

Argentina

El HV se ha posicionado como un vector energético clave en la transición hacia fuentes de energía más limpias, especialmente en regiones como LATAM, que poseen condiciones favorables para su producción.

En este contexto, la producción de HV en Río Negro, impulsada por inversiones de Fortescue, se presenta como una oportunidad para la

transición energética y la industrialización verde. Sin embargo, ha generado conflictos con comunidades mapuches-tehuelches que se oponen a la construcción de parques eólicos en sus tierras por la falta de consulta y el riesgo de desplazamiento. Reformas institucionales han facilitado estas inversiones con incentivos fiscales y estabilidad regulatoria. Aunque se promueve como solución al cambio climático, persisten dudas sobre si beneficiará a las comunidades locales o legitimará la explotación de recursos (Malte Dorn, 2024).

En el ámbito del transporte urbano, el HV emerge como una solución prometedora para la descarbonización. Según Muñoz et al. (2022), los autobuses impulsados por celdas de H₂ podrían reducir hasta un 87 % las emisiones de GEI en comparación con los diésels tradicionales. Además, estudios realizados en Rosario han destacado que los autobuses eléctricos impulsados por HV podrían disminuir las emisiones de CO₂ en un 70 %, consolidándose como una alternativa sostenible para las ciudades Iannuzzi et al. (2021). Sin embargo, alcanzar estos beneficios requiere inversiones significativas en infraestructura y energías renovables que permitan garantizar la sostenibilidad operativa.

A pesar de estos avances, el país enfrenta desafíos estructurales que requieren una planificación equilibrada entre beneficios ambientales, económicos y sociales.

Brasil

Brasil se posiciona como un líder en la región debido a su capacidad de generación hidroeléctrica y la integración de tecnologías avanzadas. Según Cordaro et al. (2024), el uso de celdas de combustible alimentadas con etanol ha permitido la producción simultánea de HV y electricidad, contribuyendo significativamente a la descarbonización del transporte. El HV impulsa esta transición mediante FCEV y motores flex-fuel enriquecidos. Programas como Rota 2030 financian tecnologías que mejoran la eficiencia energética en automóviles y transporte público. Aunque persisten desafíos en infraestructura y almacenamiento, el HV tiene el potencial de transformar la movilidad sostenible (Chantre et al., 2022).

La implementación de autobuses impulsados por celdas de combustible de HV ha demostrado un alcance de hasta 300 km por repostaje y la capacidad de reducir hasta en un 80 % las emisiones de CO₂. No obstante, el costo total de propiedad de estos vehículos es aproximadamente un 150 % superior al de los modelos a gasolina o eléctricos, lo que limita su adopción a gran escala. Se prevé que la reducción de los costos del H₂ hacia 2050 podría mejorar su competitividad económica, acelerando la adopción de tecnologías sostenibles en el sector transporte (Silva Junior y Da Silva, 2024; Vodovozov et al., 2022; Von Zuben et al., 2022).

Chile

El HV está ganando espacio en el transporte de Chile, impulsando la movilidad de cero emisiones. La homologación del primer vehículo a pila de H₂, el Toyota Mirai, que convierte H₂ en energía eléctrica y emite vapor de agua, marca un hito. Ofrece una autonomía de 650 km y recargas de 5 a 15 minutos. Copec Voltex inauguró la primera “hidrolinera” en Santiago para abastecer un bus en faenas mineras. Aunque su costo es de 25 USD/kg, se proyecta que cubrirá el 24 % de la demanda energética en 2050 y generará 5,4 millones de empleos (Gob.cl, 2022; H2LAC-Chile, 2023).

Según Halder et al. (2024), el HV es clave para eliminar las emisiones de CO₂ en el transporte. Sin embargo, su alto costo de producción y los desafíos en almacenamiento, transporte e infraestructura de recarga limitan su viabilidad económica. Las estaciones de recarga portátiles ofrecen una solución prometedora para flotas pequeñas y medianas.

En conjunto, los recursos naturales de Chile, el desarrollo de infraestructura renovable y las estrategias energéticas implementadas posicionan a esta economía latinoamericana como un modelo eficiente en la producción de HV y en el uso de energías más limpias y sostenibles.

Colombia

Colombia ha avanzado en el desarrollo del HV en el transporte, destacando la circulación del Hyundai Nexa en Medellín. Este avance, liderado por Opex y su iniciativa *Hevolución*, ha contribuido a descarbonizar un sector responsable del 12 % de las emisiones de GEI del país. Los vehículos de HV

ofrecen autonomías de hasta 700 km y recargas en ocho minutos, superando a los vehículos eléctricos de batería. Sin embargo, persisten desafíos en almacenamiento y regulación, aunque el interés industrial está creciendo, lo que refleja un compromiso creciente con tecnologías limpias y energías sostenibles en la región (H2LAC-Colombia, 2022).

En paralelo, el HV se perfila también como un recurso estratégico para la transición energética, gracias a su producción mediante fuentes renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica y biomasa residual, especialmente en el Caribe. Este combustible es esencial para diversificar la matriz energética y alcanzar la neutralidad de carbono al 2050. Iniciativas como la Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno y los estándares de certificación refuerzan el compromiso del país con un modelo energético más limpio y competitivo, permitiendo su participación en los mercados interno e internacional (Erazo-Cifuentes et al., 2022; Moreno et al., 2022; Rodríguez-Fontalvo et al., 2023).

No obstante, para consolidar al HV como vector energético, es imprescindible superar retos en infraestructura, costos y adopción tecnológica. Esto requiere políticas públicas claras y mecanismos de incentivo económico que faciliten su implementación a gran escala y promuevan la competitividad global del sector.

Ecuador

El transporte en Ecuador representa uno de los mayores desafíos para la descarbonización energética, debido a su fuerte dependencia de combustibles fósiles y su alto consumo de energía. Este sector es el principal consumidor de energía del país, representando el 87 % del consumo total, con una significativa utilización de diésel y gasolina, lo que contribuye de manera considerable a las emisiones de GEI (Castro Verdezoto et al., 2019).

En este contexto, Chiriboga et al. (2023), destacan que la electrificación del transporte y el uso de energías renovables, como la hidroeléctrica, podrían transformar este sector hacia un modelo más eficiente y sostenible. Sin embargo, esta transición requiere la implementación de políticas públicas sólidas y tecnologías limpias. De esta manera, el uso de fuentes renovables y tecnologías como el HV se presenta como una oportunidad clave para

descarbonizar el transporte terrestre. Políticas enfocadas en la renovación de flotas vehiculares y en la promoción de combustibles sostenibles podrían reducir de manera considerable el consumo energético y las emisiones.

Por otro lado, el país ha dado pasos importantes en el desarrollo del HV con la creación de la asociación H₂ Ecuador en febrero de 2023, integrada por 11 socios fundadores. Esta iniciativa responde a la creciente demanda global de H₂ como alternativa para descarbonizar las matrices energéticas. Aunque Ecuador, tradicionalmente dependiente del petróleo, aún no produce HV, busca diversificar su matriz energética mediante la elaboración de una hoja de ruta nacional. Este plan se desarrolla en colaboración con el gobierno, el BID y la consultora alemana Fichtner, con el objetivo de crear un ecosistema local y posicionarse en el mercado internacional (H2LAC-Ecuador, 2023).

Finalmente, el HV se presenta como una alternativa clave para la descarbonización del transporte, especialmente en el sector de carga pesada, donde la sustitución del diésel por HV puede reducir significativamente las emisiones de GEI. En este caso, el uso de HV en diversos sectores, incluido el transporte, podría disminuir hasta un 35% las emisiones de GEI en el sector energético. Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos relacionados con la infraestructura de producción, almacenamiento y distribución (Posso et al., 2023)

México

El HV surge como una alternativa clave para descarbonizar el transporte en México, especialmente en el sector logístico, uno de los mayores emisores de GEI. Su adopción enfrenta desafíos como la falta de infraestructura de recarga y el alto costo de los vehículos. La creación de estaciones de carga requiere inversiones y alianzas estratégicas entre proveedores y empresas logísticas. Sin embargo, esta tecnología promete flotas más eficientes y sostenibles, mejorando la distribución, el comercio electrónico y generando oportunidades de capacitación especializada (The Logistics World, 2023). Asimismo, la producción de HV a partir de energía solar en áreas urbanas ofrece una solución para acelerar la transición hacia ciudades sostenibles. El potencial de estas zonas se debe a su abundante irradiación solar y al uso de

tecnologías accesibles, como los electrolizadores alcalinos. Esta estrategia contribuye a consolidar un modelo energético más limpio y resiliente, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles en el transporte urbano (Da Cui et al., 2022; Juárez-Casildo et al., 2022). En este contexto, se destaca el desarrollo de un prototipo híbrido por el CINVESTAV, que combina celdas de combustible PEM con baterías de litio, utilizando HV producido mediante electrólisis con fuentes renovables. Este diseño, ligero y eficiente, permite el almacenamiento de H₂ a alta presión y cuenta con una capacidad de 0,6 kW, proporcionando una autonomía considerable para aplicaciones urbanas. Así, representa un paso importante hacia la diversificación de la matriz energética y la reducción de emisiones en el transporte urbano de la región (Solorza-Feria, 2023).

Paraguay

El Parque Tecnológico ITAIPU Paraguay (PTI-PY) presentó en la Expo CREA+PY 2022 sus proyectos de HV y Movilidad Eléctrica, destacando el compromiso del país con tecnologías sostenibles en el transporte. La adopción del HV representa una alternativa prometedora frente a las limitaciones de la movilidad eléctrica, ofreciendo mayor autonomía y tiempos de recarga más rápidos. Estas iniciativas reflejan el impulso tecnológico de Paraguay para reducir las emisiones de GEI y promover soluciones eco-sostenibles en la región (ITAIPU Binacional, 2022).

Según Posso et al. (2022), el país posee un potencial significativo para la producción de HV debido a sus abundantes recursos renovables, como la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Las regiones del Chaco, al occidente del país, destacan por sus condiciones ideales para aprovechar la energía solar y eólica, mientras que las zonas cercanas a las represas hidroeléctricas de Itaipú y Yacyretá ofrecen oportunidades para generar H₂ a partir de excedentes energéticos no utilizados. De manera similar, Nadaletti et al. (2021) refuerzan que estos excedentes hidroeléctricos son fundamentales para el desarrollo del HV.

Ambos estudios coinciden en que Paraguay cuenta con ventajas estratégicas derivadas de sus recursos renovables, lo que posiciona al HV como una

oportunidad clave para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles importados.

Perú

La reciente Ley de Fomento del HV, promulgada en marzo de 2024, impulsa la producción y uso del HV como combustible y vector energético, con aplicaciones en la industria, el transporte y la generación de energía. Al promover el uso de energías renovables, la normativa busca contribuir a las metas climáticas nacionales, fomentando la colaboración público-privada e incentivando la innovación tecnológica y la generación de empleo. La integración del HV en la matriz energética peruana representa un avance significativo hacia la sostenibilidad ambiental y el desarrollo industrial (Congreso de la Republica del Perú, 2024).

En este contexto, el Gobierno Regional del Callao anunció el 3 de septiembre de 2024 la incorporación del primer vehículo impulsado por HV en la región, operativo a mediados de octubre gracias a un acuerdo con una empresa privada. El proyecto busca promover el uso del HV en el transporte y la industria, consolidando al Callao como un referente en tecnologías limpias y fortaleciendo las alianzas público-privadas en el sector energético (Gobierno Regional del Callao, 2024). Según Aranibar y Olarte (2024) en el Perú, el HV es una alternativa clave para la transición energética sostenible, con aplicaciones en sectores como el transporte urbano. La disponibilidad de recursos renovables posiciona al país como un actor estratégico en el desarrollo de esta tecnología, que diversificaría la matriz energética y mejoraría la calidad del aire. Además, su implementación podría atraer inversiones en tecnologías limpias e incentivar la innovación en sistemas de movilidad.

En el norte del país, la región de Piura destaca por su elevado potencial para la producción de HV debido a la disponibilidad de energía solar, eólica y biomasa. Estas fuentes permiten el uso de tecnologías como la electrólisis del agua para generar H₂ con un bajo impacto ambiental, contribuyendo a la descarbonización de sectores clave. Sin embargo, su adopción requiere una planificación adecuada, inversiones en infraestructura y políticas públicas que

la fomenten (Caravantes et al., 2024).

Uruguay

La producción de HV en Uruguay se sustenta en el excedente de energías renovables, principalmente eólica e hidroeléctrica. Antúnez et al. (2023) analizan su viabilidad técnica y económica, destacando su aplicación en combustibles sintéticos y fertilizantes, sin mención específica al transporte (Antúnez et al., 2023). Por otro lado, *La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Uruguay* prevé su uso en la descarbonización del transporte pesado, marítimo y aéreo, iniciando con proyectos piloto en transporte terrestre y expandiéndose a la exportación de combustibles sintéticos (MIEM, 2023). Asimismo, Nadaletti et al. (2021) confirman el potencial uruguayo en la producción de hidrógeno a partir del excedente hidroeléctrico, aunque sin referencia explícita al sector transporte

Venezuela

El país no está produciendo HV para el sector transporte, aunque se encuentra evaluando su potencial dentro del Proyecto de Ley de Energías Renovables y Alternativas. Según la Comisión Permanente de Energía y Petróleo de la Asamblea Nacional, el HV podría desempeñar un papel clave en la descarbonización del transporte y la industria, gracias a la abundante disponibilidad de agua en el país. Sin embargo, hasta el momento, el análisis se encuentra en una etapa legislativa y no hay evidencia de proyectos en marcha para su producción o implementación en el transporte. Esto indica que, aunque existe interés en su desarrollo, aún no se han establecido planes concretos ni inversiones para su uso a gran escala (Asamblea Nacional de Venezuela, 2022).

Costa Rica

El HV se perfila como una alternativa clave para la descarbonización del sector transporte, especialmente en países con una matriz energética renovable consolidada, como Costa Rica. La producción de H₂ a partir de fuentes como la energía solar y eólica permite reducir significativamente las emisiones de GEI, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales (Jiménez & Zheng, 2024). No obstante, el desarrollo de esta

tecnología enfrenta desafíos económicos, almacenamiento y distribución. Estudios recientes han demostrado que, si bien el HV tiene el potencial de disminuir la dependencia de combustibles fósiles en el transporte, su viabilidad económica está condicionada a incentivos gubernamentales, reducción de costos tecnológicos y la integración con el sistema energético existente (Godínez-Zamora et al., 2020).

En conclusión, LATAM tiene el potencial de liderar la transición energética global a través del HV. Aunque enfrenta desafíos económicos, técnicos y sociales, cuenta con ventajas como los avances tecnológicos, el compromiso gubernamental y la abundancia de fuentes de energía renovable, que la posicionan como un actor clave en la descarbonización del transporte y la industria. Sin embargo, la información sobre iniciativas en la región sigue siendo limitada, lo que resalta la importancia de este trabajo para reducir esta brecha de conocimiento y promover el desarrollo del HV en LATAM.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Implicancia ambiental

La literatura ofrece diversas definiciones del concepto de "impacto ambiental". Algunas lo describen como los cambios espaciales y temporales en un parámetro ambiental causados por una acción humana específica, en contraste con lo que ocurriría la acción. Otros lo definen como alteraciones significativas, positivas o negativas, en el ambiente derivadas de actividades humanas. En cualquier caso, es crucial establecer umbrales de aceptabilidad frente al deterioro ambiental y determinar los elementos que deben ser protegidos (Espinoza, 2006).

En las últimas décadas, las actividades humanas han generado un desequilibrio ambiental significativo como resultado de procesos como la industrialización, el uso de combustibles fósiles y las prácticas agrícolas insostenibles. Estas acciones han tenido consecuencias graves, entre las que destacan la contaminación del aire y del agua, provocada por las emisiones de gases y residuos industriales, así como la degradación de los ecosistemas, derivada de la presión constante sobre los recursos naturales y los patrones

no sostenibles de desarrollo (Edo et al., 2024). Un ejemplo claro de estos impactos es el incremento de residuos sólidos, como se ilustra en la Figura 3, donde se observa la acumulación de automóviles desechados que representan el deterioro ambiental causado por el uso indiscriminado de recursos.

Figura 3

Los efectos negativos que tienen las diferentes actividades en el medio ambiente



Nota. Tomado de contaminación vehicular: índices, causas y cómo resarcirla

[Fotografía], por Edenred México, 2022, *Edenred.mx*.

(<https://www.edenred.mx/blog/contaminacion-vehicular-indices-causas-y-como-resarcirla>.)

En este contexto, resulta fundamental evaluar, cómo las nuevas tecnologías y prácticas sostenibles, abordan desafíos ambientales, destacado en los aspectos:

Reducción de emisiones de carbono: El uso del HV en vehículos de celdas de combustible contribuye significativamente a la disminución de emisiones de GEI, debido al H₂, que se produce a partir de fuentes renovables y no genera emisiones durante su uso (Wang et al., 2024). Este impacto positivo se refleja directamente en la disminución de la huella de carbono, entendida como la cantidad de emisiones de GEI liberadas a la atmósfera a través de actividades humanas, ya sea en la producción de bienes y servicios o en las

acciones cotidianas de las personas (National Geographic, 2022).

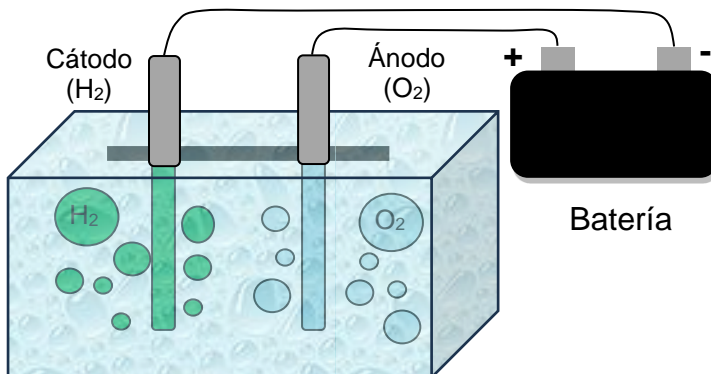
- **Consumo de Agua:** El agua desempeña un papel fundamental en la electrólisis, un proceso que utiliza electricidad, preferiblemente generada a partir de fuentes renovables como la solar o la eólica, para dividirla en H_2 y oxígeno (O_2). Mientras el H_2 se emplea como un combustible limpio en vehículos de celdas de combustible, el O_2 generado puede ser aprovechado o liberado. Este enfoque, basado en energía renovable, impulsa la sostenibilidad y contribuye a la descarbonización del sector transporte (Wang et al., 2024).
- **Impacto Local:** Las instalaciones de energía renovable pueden afectar los ecosistemas, por lo que es fundamental realizar una evaluación ambiental. El uso de HV reduciría las emisiones contaminantes de los vehículos convencionales, mejorando la calidad del aire en áreas urbanas y disminuyendo los problemas de salud relacionados con la contaminación (Castro Verdezoto et al., 2019).

2.2.2. Electrólisis del agua

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico en el que se descompone el agua en H_2 y O_2 mediante la aplicación de un voltaje externo que supera el voltaje de equilibrio del agua. El H_2 se genera en el cátodo a través de la reacción de evolución de hidrógeno, mientras que el O_2 se libera en el ánodo mediante la reacción de evolución de oxígeno (Chatenet et al., 2022). Como se muestra en la **Figura 4**, los electrodos están conectados a una batería que suministra corriente continua, permitiendo la separación de los gases.

Figura 4

Diagrama de la descomposición del agua mediante electrólisis.

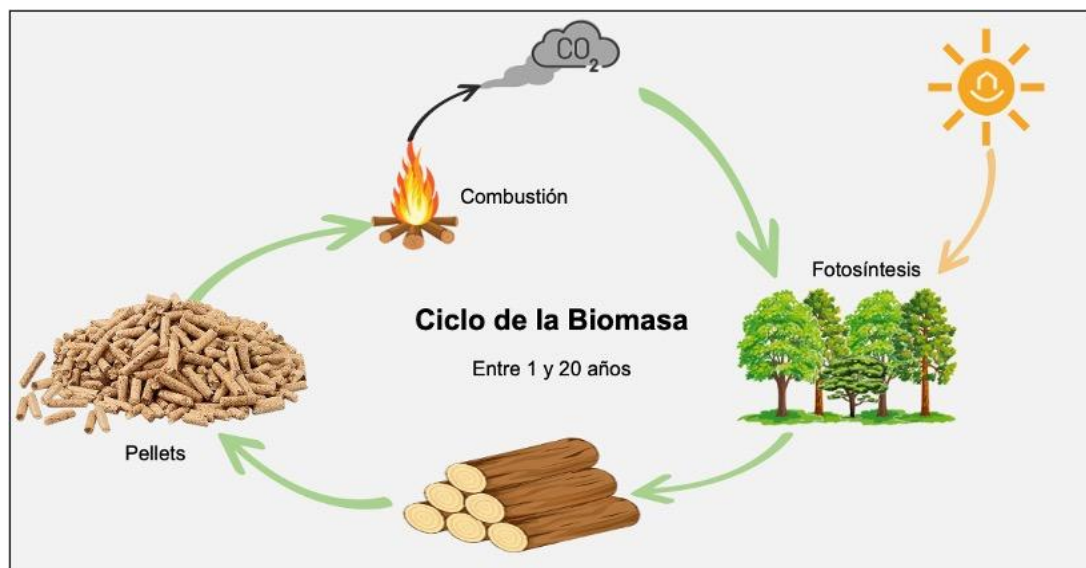


2.2.3. Biomasa

Biomasa es la materia orgánica, de origen vegetal o animal, originada en un proceso biológico, espontáneo (natural) o provocado (artificial), utilizable como fuente de energía renovable, entendiendo como tal que se consume a un ritmo igual o inferior al que se produce (Martin Lara y Calero de Hoces, 2020). El ciclo completo de la biomasa, desde la fotosíntesis hasta la combustión y la reutilización del CO₂, se describe en la **Figura 5**, evidenciando su sostenibilidad como fuente de energía renovable.

Figura 5

Ciclo de la Biomasa



Nota. Tomado de *El rol de la biomasa en las renovables* [Ilustración], por Hogarsense, 2023, *Hogarsense.es* (<https://www.hogarsense.es/calefaccion/futuro-biomasa>)

2.2.4. Energías renovables

- Las energías renovables se caracterizan por reponerse a un ritmo igual o superior al que son consumidas. Es decir, la energía hidráulica, solar y eólica son energías renovables; puesto que, se reponen de manera natural y de forma sostenible (González Velasco, 2009).
- Según Brinkworth, (2004, citado por Llanos et al., 2020, p. 37), define “energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales”.
- Energías renovables son aquellas que una vez consumidas, se pueden volver a consumir porque se reponen, no se agotan (Roldán Vilorio, 2013).

2.2.5. Implicancia económica

Diversos artículos científicos afirman que el HV representa la economía del futuro. En este contexto, la producción de H₂ tendrá importantes implicancias económicas tanto en LATAM como a nivel global. Este impacto económico se define como la contribución que una actividad genera en la economía de una región (Rivera y Molina, 2006).

La producción y uso del HV verde tiene importantes implicancias económicas, especialmente en su competitividad frente a los combustibles fósiles. Actualmente, su costo de producción oscila entre 3,1 y 15,6 USD/kg, lo que limita su adopción masiva. Sin embargo, para 2030, la combinación de energía solar y eólica podría reducir estos costos a 1,46-3,09 USD/kg, facilitando su aplicación en sectores estratégicos como el transporte y la industria pesada. A largo plazo, tecnologías como el Ciclo Rankine Orgánico (ORC) permitirían reutilizar el calor residual en industrias como la del acero y vidrio, disminuyendo aún más los costos. Su implementación contribuiría a la descarbonización y abriría nuevas oportunidades económicas, pero su viabilidad dependerá de incentivos gubernamentales, reducción del CAPEX y mejoras en eficiencia energética para consolidar su papel en la transición energética global (Baral & Šebo, 2024).

Según la ONU (2024), las energías renovables, como la solar, eólica,

hidroeléctrica y geotérmica, son clave para combatir el cambio climático, ya que reducen significativamente las emisiones de GEI. Actualmente, los combustibles fósiles generan el 75 % de estas emisiones y el 90 % del CO₂ global. En este contexto, el HV, producido a partir de fuentes renovables, se perfila como una solución esencial para la descarbonización de sectores como el transporte y la industria. Para 2030, se prevé la creación de más de 30 millones de empleos en el sector, impulsando el crecimiento económico y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. De cara a 2050, será fundamental para lograr la neutralidad de carbono y un desarrollo sostenible. Más allá de la transición energética, el HV impacta en múltiples dimensiones, desde la salud y la biodiversidad hasta la estabilidad económica global, abordando tanto desafíos como oportunidades del modelo económico actual, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Efecto económico en el medio ambiente



Nota. Tomado de *Efecto económico en el medio ambiente* [Ilustración], por La República, 2017 (<https://images.app.goo.gl/RS8s2ZWgDyo8akd36>)

A continuación, se detallan algunos de estos efectos:

- **Empleo:** La producción de HV, se define como una actividad industrial que promueve la creación de empleo en diversas etapas de su cadena de valor, incluyendo la fabricación de tecnologías de producción, la construcción de

infraestructuras para su transporte y almacenamiento, y la operación de sistemas basados en energías renovables. Este proceso fortalece capacidades técnicas y crea oportunidades laborales en la transición hacia energías sostenibles (Chantre et al., 2022)

- ***Inversión Extranjera Directa (IED)***, La Inversión Extranjera Directa (IED) es un mecanismo clave para la integración en el comercio internacional, ya que permite la expansión empresarial, la transferencia de capitales y el acceso a mercados globales. Sin embargo, su impacto en el desarrollo económico no siempre conlleva mayor equidad o bienestar social (Vallejo Almeida, 2017). Además de ser una fuente de financiación externa, la IED influye en la balanza de pagos y el crecimiento económico a largo plazo, facilitando la transferencia de tecnología, el desarrollo del capital humano y la mejora en la capacidad de gestión en las economías receptoras (Concha y Gómez, 2016)
- **Costos de producción:** Los costos de producción de HV se componen de diversos factores clave, entre ellos el costo energético derivado de las fuentes renovables utilizadas (eólica y solar), los costos de operación y mantenimiento del sistema de electrólisis, y el costo de los componentes del balance de planta, como la purificación de agua, compresión y almacenamiento de gases. Estos costos están fuertemente influenciados por la eficiencia energética y exergética del sistema y las condiciones específicas de operación (Izidoro y de Oliveira, 2023) .
- **Costos de transporte:** El costo de transporte del H₂ abarca la inversión en infraestructura (como tuberías dedicadas o compartidas con gas natural), los gastos operativos de compresión, almacenamiento y mantenimiento, así como el consumo energético del proceso (Mustafa et al., 2024)
- **Diversificación:** Reduce dependencia de combustibles fósiles y mejora seguridad energética. la diversificación se define en el contexto de integrar múltiples fuentes de energía renovable, como biomasa, energía solar y eólica, en la producción de H₂ para reducir la dependencia de combustibles fósiles y aumentar la seguridad energética (Moreno et al., 2022)

- **Infraestructura:** La infraestructura para producción y distribución de HV podría generar empleos e inversiones, impulsando el crecimiento económico local y regional (Castro Verdezoto et al., 2019)

2.2.6. Movilidad urbana y sus modalidades

Según Pérez y Osal Herrera (2020) la movilidad urbana se define como el desplazamiento de personas dentro de áreas urbanas para establecer relaciones sociales y cumplir tareas cotidianas. Este concepto integra factores como el medio de transporte, la distancia recorrida y la duración de los viajes. Además, destaca su papel esencial en el desarrollo económico y social, al conectar a las personas con actividades productivas y servicios.

2.2.7. El transporte público urbano

Según Moscoso et al. (2020), el transporte público urbano es esencial para la movilidad de millones de personas en la región, representando el 38,8% de los desplazamientos diarios. Sin embargo, este sector también contribuye significativamente al deterioro ambiental, con altos niveles de emisiones de GEI, consumo energético y congestión, lo que agrava la contaminación y aumenta el riesgo vial en las zonas urbanas.

Por otro lado, Pérez y Osal Herrera (2020) destacan las implicaciones ambientales y económicas de la movilidad urbana, señalando que el transporte individual es el principal responsable de la contaminación en las ciudades, generando el 43,9 % de las emisiones de CO₂, el 53,2 % de CO y consumiendo el 66 % de la energía utilizada por el sector transporte en LATAM. Aunque el transporte colectivo resulta menos contaminante por persona, también contribuye de manera significativa con el 50,1 % de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el 7,8 % de las partículas en suspensión (PM10), evidenciando la fuerte dependencia del sector transporte a los combustibles fósiles.

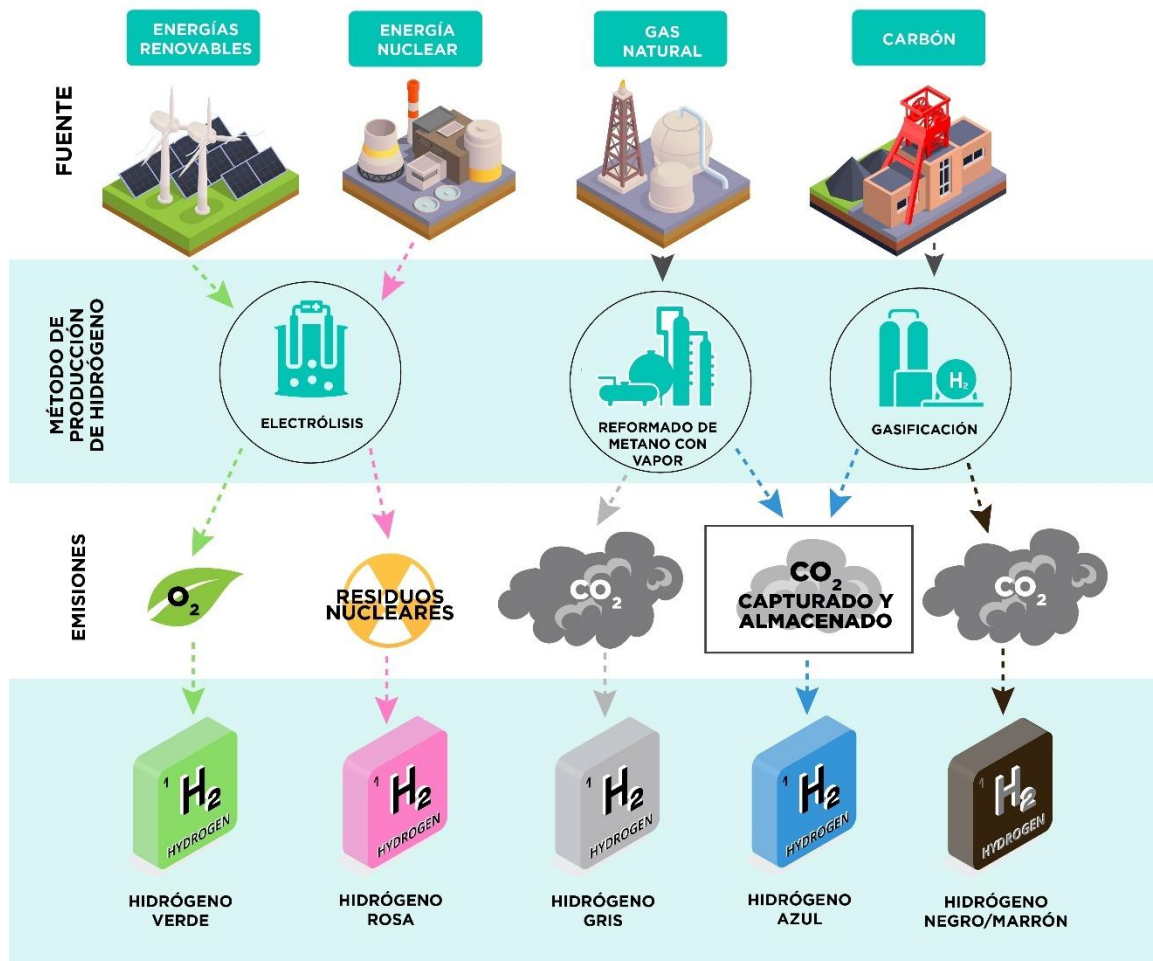
2.2.8. Hidrógeno

El H₂ es el elemento más abundante en el universo y es un vector energético que almacena energía de fuentes primarias para su posterior uso,

generalmente se encuentra combinado con otros elementos, como el oxígeno en el agua, y no puede ser aprovechado directamente (Aldana Rivera y León Peñuela, 2022). La Figura 7 muestra los métodos de producción y las emisiones asociadas a cada tipo de H₂.

Figura 7

Métodos de producción de hidrógeno y sus colores.



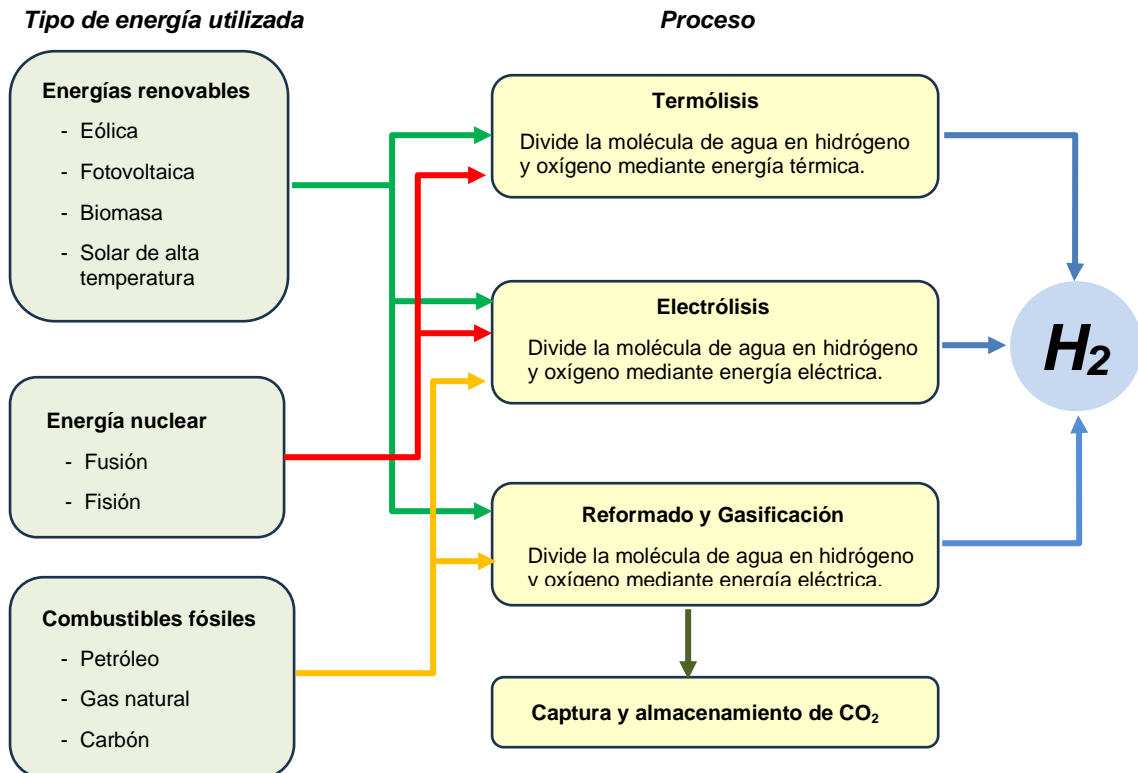
Nota. Tomado de *Métodos de producción de hidrógeno y sus colores* [Ilustración], por CIC energiGUNE, 2022 (<https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>)

El HV es aquel que se produce mediante electrólisis alimentada por fuentes de energía renovable. En algunos casos, puede involucrar el uso de gases fósiles, nucleares o residuos industriales, siempre que las emisiones de GEI se mantengan en niveles menores a 4,13 kg CO₂-eq por kg de H₂ (Moreno et al., 2022; Velazquez Abad & Dodds, 2020). La Figura 8 muestra los distintos tipos de energía utilizados en la producción de hidrógeno y sus procesos

asociados.

Figura 8

Procesos y Fuentes de Energía para la Producción de Hidrógeno.



Nota. Tomado de *El hidrógeno* [Ilustración], por Centro Nacional del Hidrógeno, 2024 (<https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/#top>)

2.2.9. Combustible

Carlos A. Franco-Salinas et al. (2023) describen los combustibles como sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso que liberan energía al transformarse químicamente. Para que ocurra la combustión, se requiere oxígeno y una fuente de calor. Este proceso genera diversas formas de energía, como mecánica, luminosa y calorífica.

2.2.10. Energía

La energía es una magnitud física fundamental que permite medir y caracterizar los sistemas. Se presenta en diversas formas como electricidad, calor, reacciones químicas, energía nuclear, luz, movimiento del aire (viento) o del agua (mareas), y se mide en unidades como joules (J), kilocalorías (kcal) y kilovatios-hora (kWh). Además, la energía puede encontrarse en formas

menos evidentes, como la posición, la forma y la masa de los objetos. Todas estas manifestaciones de energía comparten la capacidad de producir efectos, cambios y transformaciones (Ministerio de Educación de Argentina, 2007).

2.2.11. Emisiones de CO₂ de Transporte de pasajeros urbanos

La **Tabla 1** presenta la información de las emisiones de CO₂ (g CO₂/km) generadas por automóviles en función del tipo de recorrido. Los valores han sido seleccionados de manera que reflejen la relación entre el tipo de combustible, la cilindrada del vehículo y las características del recorrido urbano. Estos factores de emisión son útiles para estimar las emisiones y planificar acciones de mitigación en el sector del transporte (Oficina Catalana del Calvi Climatic, 2011).

Tabla 1

Emisiones en función del tipo de recorrido (g-CO₂/km).

Combustible del vehículo	Cilindrada en litros	Urbano
Gasolina	<1,4	192,12
	1,4 – 2,01	232,78
	>2,01	310,19
Diésel	< 2	199,81
	>2	246,06
Híbrido	Cualquiera	103,43

Nota. Adaptado de Guía práctica para el cálculo de emisiones de GEI.

2.2.12. Energías no Renovables

Las energías no renovables son aquellas fuentes de energía que provienen de recursos naturales que se agotan con su uso y cuya regeneración ocurre a una escala de tiempo extremadamente larga en comparación con la velocidad de consumo humano. Estas fuentes incluyen principalmente los combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón, así como la energía nuclear, que depende del uranio y otros materiales radiactivos. A pesar de que las energías no renovables han sido fundamentales para el desarrollo industrial y la seguridad energética de países como Alemania,

Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Japón y el Reino Unido, que conforman el Grupo de los Siete (G7), su explotación genera impactos ambientales significativos, incluyendo la contaminación del aire, el deterioro de ecosistemas y el incremento de las emisiones de GEI. Además, su disponibilidad está sujeta a factores geopolíticos y económicos, lo que puede generar fluctuaciones en los precios y afectar la estabilidad energética a nivel global (Yasmeen y Shah, 2024).

2.2.13. Matriz Energética

La matriz energética es el conjunto de recursos energéticos disponibles en un territorio determinado, que representa la cantidad de energía accesible en dicho lugar y sirve como guía para la planificación del sector energético (Polyexcel Energy In Compounds, 2020).

2.2.14. Transición Energética

La transición energética es un proceso de transformación profunda del sistema energético, impulsado por compromisos climáticos y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este cambio no se limita únicamente a la adopción de nuevas tecnologías, sino que requiere una reconfiguración integral que abarque aspectos regulatorios, sociales e institucionales. Para garantizar una transición eficiente, segura y justa, es fundamental la intervención del Estado a través de políticas públicas y cambios regulatorios. El mercado, por sí solo, no puede dirigir este proceso, por lo que se necesita un marco normativo que promueva la equidad social y facilite la integración de tecnologías limpias, asegurando así una transformación sostenible e inclusiva (Skewes et al., 2025).

2.2.15. Seguridad Energética

La seguridad energética es la capacidad de un sistema para garantizar un suministro continuo, accesible y asequible de energía, asegurando la disponibilidad de recursos energéticos diversificados y sostenibles. Esta seguridad implica minimizar la dependencia de importaciones, reducir la vulnerabilidad a crisis externas y garantizar una estabilidad en los costos

energéticos, promoviendo al mismo tiempo la eficiencia y el uso de fuentes renovables para mitigar impactos ambientales (Anwar y Ullah Khan, 2025) .

2.2.16. Diversificación de la Matriz Energética

La diversificación de la matriz energética se refiere a la distribución equilibrada del consumo de diferentes fuentes de energía en un sistema, con el objetivo de reducir la dependencia de una única fuente y mejorar la seguridad energética. Este proceso no solo implica la incorporación de múltiples fuentes de energía renovables y no renovables, sino también la optimización de la distribución de los recursos energéticos en función de su disponibilidad, impacto ambiental y viabilidad económica. La diversificación contribuye a minimizar vulnerabilidades en el suministro energético y facilita la transición hacia modelos más sostenibles y resilientes (Triguero-Ruiz et al., 2023)

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

La investigación desarrollada es de tipo documental y no experimental, diseñada para analizar y sintetizar información secundaria sobre la producción de HV en el transporte urbano de LATAM. Este enfoque se eligió debido a la limitada disponibilidad de datos primarios y la necesidad de consolidar la literatura existente, incluyendo investigaciones científicas, normativas técnicas y reportes de estudios previos.

Para ello, se consultaron diversas fuentes, incluidas bases de datos científicas como ScienceDirect, Scopus y Web of Science, así como plataformas complementarias como SciELO, Google Académico y otras bibliotecas digitales. Siguiendo protocolos metodológicos como los propuestos por Martínez-Corona et al. (2023, pp. 70-71), que garantizan la rigurosidad del análisis. Este tipo de investigación facilita la generación de un estado del arte que identifica tendencias, vacíos y oportunidades en campos emergentes como las energías renovables, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos planteados.

3.2. Métodos de la investigación

Según Bernal Torres et al. (2006), la investigación documental se centra en la recolección, análisis e interpretación de información secundaria obtenida de diversas fuentes como artículos científicos, informes técnicos y documentos institucionales. En este estudio, el proceso metodológico incluyó:

1. **Recolección de información:** Se consultaron bases de datos científicas reconocidas (ScienceDirect, Scopus, Web of Science) y otras fuentes como SciELO, Google Académico e internet en general, utilizando palabras clave relacionadas con "hidrógeno verde", "producción sostenible" y "transporte urbano".

2. **Clasificación de fuentes:** La información recopilada se categorizó en función de su relevancia para los objetivos de la investigación, diferenciando entre fuentes utilizadas para el análisis de hallazgos sobre producción de HV y aquellas empleadas para el marco teórico. Se priorizaron los artículos científicos publicados en los últimos cinco años.
3. **Análisis de contenido:** Este paso se llevó a cabo siguiendo los principios descritos por Bernal Torres et al. (2006), identificando patrones, relaciones y vacíos de conocimiento.

3.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo documental, basado en el análisis de información escrita con el propósito de establecer relaciones, diferencias y el estado actual del conocimiento sobre el objeto de estudio (Bernal Torres et al., 2006, pp. 110-11). Este diseño, de enfoque **no experimental**, utiliza exclusivamente información secundaria y observa fenómenos en su contexto natural, sin intervenciones directas (Arispe Alburquerque et al., 2020, p.69). Además, es **transversal**, dado que la recolección de información se llevó a cabo en un momento temporal definido (Bernal Torres et al., 2006, p. 119), y **descriptivo**, permitiendo detallar las implicancias ambientales y económicas de la producción de HV (Hernández Sampieri et al. 2014, p. 155).

El diseño planteado tiene como objetivo analizar de manera sistemática las implicancias ambientales y económicas del HV en el transporte urbano, facilitando la identificación de patrones, tendencias y vacíos de conocimiento. Este enfoque fue seleccionado por su capacidad para garantizar un análisis riguroso y alineado con los objetivos establecidos.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población:

La población de esta investigación incluye todos los artículos científicos, informes, libros, documentales y documentos en línea que abordan temas relacionados con la producción de HV y sus implicancias ambientales y económicas en LATAM, publicados en bases de datos indexadas

ScienceDirect, Scopus y Web of Science, así como plataformas complementarias como SciELO, Google Académico y otras bibliotecas digitales

3.4.2. Muestra:

La muestra estuvo conformada por los artículos y documentos que cumplieron con los siguientes criterios:

- Publicados en bases de datos indexadas o fuentes reconocidas.
- Relacionados específicamente con la producción de HV.
- Considerados relevantes para el análisis de implicancias ambientales y económicas de la producción de HV en LATAM.
- Los artículos científicos se limitaron a los publicados en los últimos cinco años, mientras que otras fuentes, como libros y documentales, no estuvieron restringidas temporalmente debido a la necesidad de contextualizar y complementar definiciones teóricas.

Además, se realizaron nuevas búsquedas en Scopus, utilizando ecuaciones de búsqueda específicas. Sin embargo, algunos artículos adicionales fueron encontrados de forma exploratoria en otras fuentes mediante términos relacionados con el título de la investigación. Esta estrategia combinada asegura la pertinencia y calidad de las fuentes utilizadas para sustentar los hallazgos de esta investigación.

A continuación, se presenta la **Tabla 3**, que compila los estudios identificados en Latinoamérica relacionados con el HV, incluyendo su impacto ambiental y económico. Esta recopilación de datos permite contextualizar los hallazgos de la investigación y validar la pertinencia de las fuentes utilizadas.

Tabla 2

Ficha de recolección de datos en LATAM que incluye información relacionada a las investigaciones y a las variables de estudio

	AUTOR	TÍTULO	PAIS	AÑO	IMPLICANCIA AMBIENTAL					IMPLICANCIA ECONÓMICA				
					CE	EGEI	UA	UMR	IED	CP	CI	CT	PTM	BEA
1	Antonio Galvan et. al	Exporting sunshine: Planning South America's electricity transition with green hydrogen	America del sur	2022	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
2	Nadaletti et al.	Green hydrogen-based pathways and alternatives: Towards the renewable energy transition in South America's regions e Part A.	America del sur	2021	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
3	Nadaletti et al.	Green hydrogen-based pathways and alternatives: Towards the renewable energy transition in South America's regions e Part B	America del Sur	2022	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4	Leonardo Iannuzzi et al.	Life Cycle Assessment (LCA) for use on renewable sourced hydrogen fuel cell buses vs diesel engines buses in the city of Rosario, Argentina	Argentina	2021	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI
5	Horacio R. Corti	Polymer electrolytes for low and high temperature PEM electrolyzers	Argentina	2022	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
6	Correa et. al	Evaluation of levelized cost of hydrogen produced by wind electrolysis: Argentine and Italian production scenarios	Argentina	2022	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
7	Pedro Munoz et. al	Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses	Argentina	2022	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
8	Malte Dorn, 2024	Decarbonization or dispossession? The political economy of lithium and green hydrogen in Argentina	Argentina	2024	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI

	AUTOR	TÍTULO	PAIS	AÑO	IMPLICANCIA AMBIENTAL					IMPLICANCIA ECONÓMICA				
					CE	EGEI	UA	UMR	IED	CP	CI	CT	PTM	BEA
9	Cordaro et al.	Electricity and hydrogen production by cogeneration system applied in a fuel station in Brazil: Energy analysis of a combined SOFC and ethanol steam reforming model	Brasil	2024	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI
10	Chantre et al.	Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception	Brasil	2022	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
11	Von Zuben et al.	Is Hydrogen Indispensable for a Sustainable World? A Review of H2 Applications and Perspectives for the Next Years	Brasil	2022	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI
12	Germescheidt et al.	Hydrogen Environmental Benefits Depend on the Way of Production: An Overview of the Main Processes Production and Challenges by 2050	Brasil	2021	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI
13	Maciel et al.	Environmental studies of green hydrogen production by electrolytic process: A comparison of the use of electricity from solar PV, wind energy, and hydroelectric plants	Brasil	2023	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI
14	Ciotta et al.	Hydrogen storage in depleted offshore gas fields in Brazil: Potential and implications for energy security	Brasil	2023	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
15	Izidoro et al.	Exergoeconomic assessment of green hydrogen production via high-temperature electrolysis powered by solar and wind energy	Brasil	2023	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO
16	De Almeida et al.	Techno-Economic Analysis of Offshore Green Hydrogen Production	Brasil	2024	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI

	AUTOR	TÍTULO	PAIS	AÑO	IMPLICANCIA AMBIENTAL					IMPLICANCIA ECONÓMICA				
					CE	EGEI	UA	UMR	IED	CP	CI	CT	PTM	BEA
17	Hunt et al.	Possible pathways for oil and gas companies in a sustainable future: From the perspective of a hydrogen economy	Brasil	2022	SI	SI	No	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI
18	Danyelle M. de Araujo et al.	Produced water electrolysis with simultaneous green H2 generation: From wastewater to the future of the energetic industry	Brasil	2024	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI
19	Cavalcanti et al.	Hydrogen in Burners: Economic and Environmental Implications	Brasil	2024	NO	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
20	Nadaleti et al.	The potential of hydrogen production from high and low-temperature electrolysis methods using solar and nuclear energy sources the transition to a hydrogen economy in Brazil	Brasil	2022	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI
21	Macedo et al.	Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage A case study of the Brazilian electric power sector	Brasil	2022	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI
22	David Rodríguez-Fontalvo et al.	Green hydrogen potential in tropical countries_ The colombian case	Colombia	2023	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI
23	Arne Burdack et al.	Techno-economic calculation of green hydrogen production and export from Colombia	Colombia	2022	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI
24	Juan Moreno et al.	Role of low carbon emission H2 in the energy transition of Colombia: Environmental assessment of H2 production pathways for a certification scheme	Colombia	2022	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI

	AUTOR	TÍTULO	PAIS	AÑO	IMPLICANCIA AMBIENTAL					IMPLICANCIA ECONÓMICA				
					CE	EGEI	UA	UMR	IED	CP	CI	CT	PTM	BEA
25	Yovany Arley Erazo-Cifuentes et. al	Technoeconomic Comparison of Scenarios for the Configuration of the Renewable Hydrogen Supply Chain in Colombia	Colombia	2022	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI
26	Carvalho et al.	Mixtures of heavy fuel oil and green hydrogen in combustion equipment: Energy analysis, emission estimates, and economic prospects	Chile	2023	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI
27	Salazar, I. et al.	Chile and its Potential Role Among the Most Affordable Green Hydrogen Producers in the World	Chile	2022	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
28	Marco Antonio Gallegos	Puerto Lirquén y su descarbonización: Aplicando medidas de mitigación basado en la reconversión de equipamiento portuario a Hidrógeno verde	Chile	2023	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI
29	Matías García G. y Sebastián Oliva H	Technical, economic, and CO2 emissions assessment of green hydrogen production from solar/wind energy: The case of Chile	Chile	2023	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI
30	Yunesky Masip Macía et al.	Green Hydrogen Value Chain in the Sustainability for Port Operations: Case Study in the Region of Valparaíso, Chile	Chile	2021	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI
31	B.E. Lebrouhi et al.	Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview	Chile y otros	2022	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI
32	Julien Armijo et al.	Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina	Chile-Argentina	2019	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI

	AUTOR	TÍTULO	PAIS	AÑO	IMPLICANCIA AMBIENTAL					IMPLICANCIA ECONÓMICA				
					CE	EGEI	UA	UMR	IED	CP	CI	CT	PTM	BEA
33	Fausto Posso et al.	Towards The Hydrogen Economy: Estimation of green hydrogen production potential and the impact of its uses in Ecuador as a case study	Ecuador	2022	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
34	Pedro L. Castro Verdezoto et al.	Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: Energy efficiency policies in the transportation sector	Ecuador	2019	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
35	Gonzalo Chiriboga et. Al	Useful energy is a meaningful approach to building the decarbonization: A case of study of the Ecuadorian transport sector	Ecuador	2023	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO	SI
36	Juárez-Casildo et. al	Solar hydrogen production in urban areas of Mexico: towards hydrogen cities.	México	2022	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO	NO
37	Javier de la Cruz-Soto et. al	A techno-economic study for a hydrogen storage system in a microgrid located in baja California, Mexico. Levelized cost of energy for power to gas to power scenarios.	México	2022	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI
38	Solorza-Feria	Green Hydrogen, PEM Fuel Cells, and Li-ion Batteries in a Vehicular Transport Prototype	México	2023	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
39	Fausto Posso et al.	Towards the Hydrogen Economy in Paraguay: Green hydrogen production potential and end-uses	Paraguay	2022	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI
40	Nahui-Ortiz et al.	Energy-Environmental Modelling of a PEM-Type Fuel Cell for Hydrogen Production	Perú	2021	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI
41	César Celis et al.	Clean energy transition in Peru: A green hydrogen perspective	Perú	2022	SI	SI	si	si	SI	NO	NO	NO	NO	SI

	AUTOR	TÍTULO	PAIS	AÑO	IMPLICANCIA AMBIENTAL					IMPLICANCIA ECONÓMICA				
					CE	EGEI	UA	UMR	IED	CP	CI	CT	PTM	BEA
42	Caravantes et al.	Estimation of hydrogen production potential from renewable resources in northern Peru	Perú	2024	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI
43	Antúñez, J., et al.	Analysis of Green Hydrogen Generation Potential in Uruguay from Surplus Renewable Energies	Uruguay	2023	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI
44	Jiménez y Zheng, 2024	Fueling Costa Rica's green hydrogen future: A financial roadmap for global leadership	Costa Rica	2024	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO	SI

Donde:

CE : Consumo de energía para producir HV.

EGEI : Emisiones de GEI o huella de carbono.

UA : Uso de agua para producir HV.

UMR : Uso de recursos y materiales

IED : Inversión Extranjera Directa.

CP : Costos de producción.

CI : Costos de infraestructura.

CT : Costos de transporte.

PTM : Precios y tarifas de mercado.

BEA : Beneficios económicos adicionales.

Criterios de selección:

Criterios de inclusión

- Artículos científicos producidos revistas científicas indexadas a las bases de datos consideradas en la presente investigación.
- Artículos científicos publicados en LATAM durante los años 2019 – 2024

Criterios de exclusión:

Artículos científicos que se encuentren incompletos, que no se relacionen con el título y no sean recuperables.

3.5. Operacionalización de las variables

Operacionalización o categorización de la variables

Variable independiente

VI = Producción de HV

Variables Dependientes

VD = Implicancias Económicas,

VD = Implicancias Ambientales.

La **Tabla 3** muestra la definición conceptual y operativa de cada variable, así como sus dimensiones específicas para el análisis.

Tabla 3

Operacionalización de las variables

Definición conceptual	Definición operacional	Variable	Dimensiones
<p>Producción de HV: Producción de hidrógeno generado mediante fuentes renovables, como la electrólisis del agua utilizando energía solar o eólica. (Velazquez Abad & Dodds, 2020).</p>	<p>Producción de HV Proceso que incluye la implementación de tecnologías de electrólisis y otras metodologías para generar hidrógeno de manera sostenible (Aldana Rivera & León Peñuela, 2022 17-18)</p>	<p>Variable independiente: Producción de HV</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Método de producción: Electrólisis, biomasa, etc. - Uso de fuentes de energías renovables
<p>Implicancias ambientales: Es el impacto que una actividad humana produce en el medio ambiente, provocando un desequilibrio en el ecosistema (Editorial RS y S, 2022)</p>	<p>Implicancias ambientales Se refiere a cómo se miden y evalúan los efectos de actividades, procesos o productos en el medio ambiente. Esto incluye establecer parámetros específicos para cuantificar emisiones, uso de recursos y cambios en los ecosistemas, lo que facilita la gestión y monitoreo de impactos para cumplir con regulaciones y promover la sostenibilidad (Gestión-Calidad, 2009-2023)</p>	<p>Variable dependiente: Implicancias Ambientales</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de emisiones de GEI o huella de carbono - Uso de agua para producir HV
<p>Implicancias Económicas: La producción de HV, se usa como materia prima en combustible y enfrenta altos costos actuales debido a la tecnología e infraestructura. Se prevé que disminuyan con el tiempo, aumentando su competitividad y una transición hacia fuentes de energía más sostenibles (García Bernal, 2021).</p>	<p>Implicancias Económicas de la producción de HV abarca la evaluación de los costos y beneficios asociados con la producción de hidrógeno mediante energías renovables (García Bernal, 2021)</p>	<p>Variable dependiente: Implicancias Económicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Inversión Extranjera Directa - Costos de producción - Costos de infraestructura - Costos de transporte - Precios y tarifas de mercado - Beneficios económicos adicionales

3.6. Técnicas e instrumentos de la investigación

Para el procesamiento de los datos se utilizará el análisis de revisión sistemática, se presentarán los resultados de la depuración de artículos mediante el diagrama de flujo PRISMA; Posteriormente de los artículos seleccionados se extraerá información relevante y se presentará mediante tablas.

3.7. Procedimiento para la recolección de datos

- **Búsqueda de investigaciones sobre producción de HV en LATAM:**

Se consultaron fuentes de datos científicas como *ScienceDirect* (42 artículos), *Scopus* (149 artículos) y *Web of Science* (17 artículos), obteniendo un total de 206 artículos científicos relacionados.

- **Búsqueda de investigaciones sobre producción de HV fuera de LATAM:**

Se utilizó la base de datos *Scopus*, identificando un total de 85 artículos científicos relevantes.

- **Búsqueda complementaria en otras plataformas:**

Se realizaron consultas en bases como *SciELO*, *Google Académico* y otras bibliotecas digitales, obteniendo 25 registros.

- **Estrategia de búsqueda:**

Se diseñó y optimizó una ecuación de búsqueda específica para cada base de datos científica, con el fin de maximizar la relevancia de los resultados obtenidos.

Búsqueda de artículos en LATAM

Ecuación de la primera búsqueda en Scopus:

(TITLE-ABS-KEY (hidrogeno AND verde) OR TITLE-ABS-KEY (green AND hydrogen)) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Spanish") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Portuguese")) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Mexico") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Colombia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Chile") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Argentina") OR LIMIT-

TO (AFFILCOUNTRY , "Peru") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Ecuador") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Paraguay") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Uruguay") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Venezuela"))

Ecuación de la segunda búsqueda en Scopus (23 de noviembre 2024)

(TITLE-ABS-KEY (hidrogeno AND verde) OR TITLE-ABS-KEY (green AND hydrogen)) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final")) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Mexico") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Colombia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Chile") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Argentina") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Peru") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Ecuador") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Paraguay") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Uruguay") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Venezuela") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Brazil")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"CENG") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE,"Spanish") OR LIMIT-TO (LANGUAGE,"Portuguese")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Hydrogen Production") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Green Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Electrolysis") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Renewable Energies") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Decarbonisation") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Renewable Energy") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"CO 2 Emission") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Transportation Sector") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Urban Transportation") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Latin America") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Hydrogen-evolution") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"H 2 Production")) AND (LIMIT-TO (AF-ID,"Universidade Federal do Rio de Janeiro" 60000036) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidad Nacional de Córdoba" 60000658) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidad de Concepcion" 60001282) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidad de Buenos Aires" 60001563) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidad Autónoma del Estado de México" 60002281) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidade Estadual do Oeste do Paraná" 60005993) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho" 60006028) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidade de São Paulo" 60008088) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidade Federal de Mato Grosso do Sul" 60009160) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidade de Brasília" 60024989) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidade Estadual de Campinas" 60029570) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidad Nacional de Ingeniería, Lima" 60071255) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidad de Piura" 60071257) OR LIMIT-TO (AF-ID,"Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa" 60089535))

Búsqueda de artículos a nivel global

Ecuación de la tercera búsqueda en Scopus (8 de diciembre de 2024)

(TITLE-ABS-KEY (hydrogen) AND TITLE-ABS-KEY (energy) AND TITLE-ABS-KEY (history)) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrogen Fuels"))

Ecuación de la cuarta búsqueda en Scopus (9 de diciembre de 2024)

TITLE-ABS-KEY (evolution AND of AND green AND hydrogen AND ion AND vehicles) AND PUBYEAR > 2022 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrogen Production") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Water Electrolysis") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrogen-evolution") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Energy Inputs") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Green Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Fuel Cells") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Fossil Fuels"))

Ecuación de quinta búsqueda en Scopus (13 de diciembre de 2024)

TITLE-ABS-KEY (production AND of AND green AND hydrogen AND for AND urban AND vehicles) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Fuel Cells") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Urban Transportation"))

Ecuación de la sexta búsqueda en Scopus (13 de diciembre de 2024)

TITLE-ABS-KEY (green AND hydrogen AND for AND public AND transportation) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "China") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "United States") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Japan")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))

Ecuación de la séptima búsqueda en Scopus (14 de diciembre de 2024)

TITLE-ABS-KEY (production AND of AND green AND hydrogen AND in AND the AND united AND states) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "United States")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrogen Production") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Green Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Electrolysis")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))

Ecuación de la octava búsqueda en Scopus (14 de diciembre de 2024)

TITLE-ABS-KEY (green AND hydrogen AND for AND vehicles) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Germany") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Sweden") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Japan"))

Ecuación de la novena búsqueda en Scopus (15 de diciembre de 2024)

TITLE-ABS-KEY (green AND hydrogen AND for AND vehicles) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2022 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Fuel Cells") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrogen Production")) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Germany"))

Búsqueda de Artículos en LATAM

Ecuación para Sciencedirect

- Green hydrogen production for urban transport of buses in Chile
- Green hydrogen production for urban transport of buses in Argentina
- Green hydrogen production for urban transport of buses in Brazil

Ecuación para Web of Science:

- Green hydrogen production and urban transport

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos

- **Técnicas:** Se aplicará el análisis documental de revistas científicas. Es decir, se analizará artículos científicos de la base de datos como Scimedirect, Scopus y Web of Science con información relevante para la investigación.
- **Instrumentos:** Se usará una ficha de recolección de datos que será creada por el autor, la misma que incluirá información relacionada a las investigaciones y a las variables de estudio.
- **Identificación de resultados**

Identificación:

Se buscó en tres bases de datos, en los cuales se realizó 2 búsquedas en Scopus obteniendo un total de 149 registros en LATAM, En ScienceDirect obteniendo 42 registros, webofScience obteniendo 17 registros. En otras fuentes se obtuvo 25 registros. Registrando un total de 233 registros

Selección

Se eliminaron 30 registros duplicados, quedando un total de 203 registros

Elegibilidad

Se incluyeron registros utilizando las siguientes palabras clave: 'producción de hidrógeno verde', 'hidrógeno verde para transporte', 'hidrógeno verde con economía', 'hidrógeno verde con el medio ambiente', 'producción de hidrógeno', 'impacto ambiental', 'impacto económico' y 'transporte'. Esto resultó en un total de 105 registros eliminados.

Legibilidad

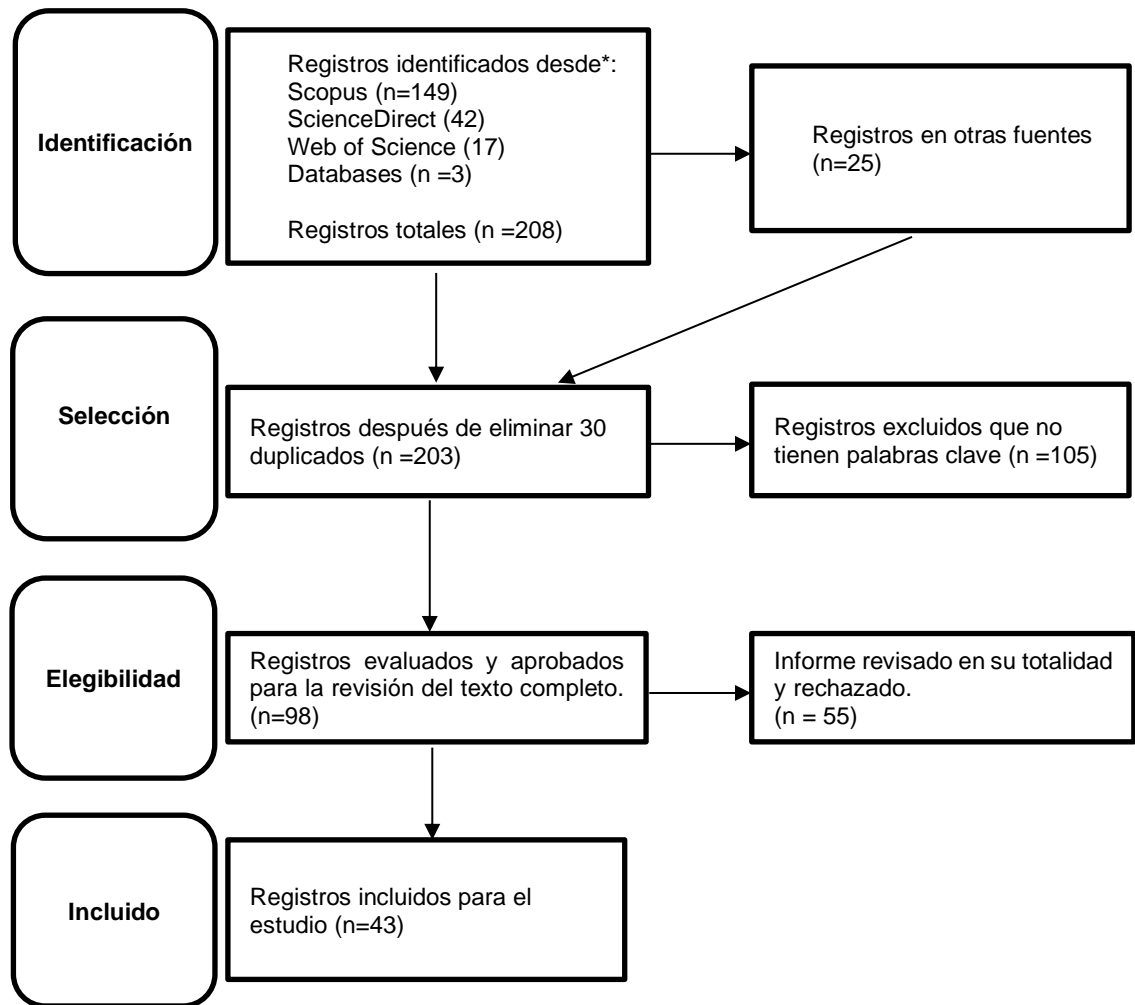
Después de excluir los registros por palabras clave quedaron 98 registros para su legibilidad de texto completo, de los cuales se rechazan 55 registros.

Inclusión

Después de excluir los registros por texto completo quedaron 43 registros.

Figura 9

Identificación de estudios basados a datos y registros



Nota. A continuación, se adapta un diagrama basado en el método del PRISMA (Sánchez-Serrano et al., 2022).

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Sector ambiental en LATAM

4.1.1. Argentina

En la **Tabla 4** se presentan los principales parámetros ambientales y energéticos relacionados con la producción de HV en Argentina, destacando su potencial energético, el uso de recursos, las emisiones asociadas y el consumo de agua, con base en los datos más relevantes extraídos de investigaciones recientes

Tabla 4

Parámetros para el sector ambiental en Argentina.

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	Tiene gran potencial en la generación de HV, especialmente en hidroeléctrica desaprovechada en instalaciones como Yacretá y Salto Grande. Se estima que con el excedente de energía hidroeléctrica se podría producir hasta $3,44 \times 10^{10}$ kg-H ₂ al año.	Nadaleti et al., 2021
	Consumo energético para el electrolizador de 47,6 kWh/kg H ₂ , considerando una eficiencia de 70% basada en el poder calorífico inferior (LHV) del H ₂ .	Armijo y Philibert, 2020
	La producción de hidrógeno mediante electrólisis consume 52,4 kWh por kg de H ₂ , con un factor de capacidad del 54,9%, utilizando energía eólica con una capacidad instalada de 1,13 GW.	Muñoz et al., 2022
	Producción inicial de 40 000 t/año de HV con expansión a 1,36 millones de t/año para 2038.	Malte Dorn, 2024
	Argentina tiene potencial para la generación de HV, evidenciado por su capacidad de producir 93 729 t/año utilizando 5 436 GWh/año de energía eólica.	Correa, et al., 2022
	A través de electrólisis del agua, podría generar H ₂ con un consumo de 218,1 MJ/kg H ₂ en un escenario centralizado o 194,4 MJ/kg H ₂ en uno descentralizado. La gasificación de biomasa alcanza valores de 383,5 MJ/kg H ₂ y 382,8 MJ/kg H ₂ , mientras que la reforma de biogás requiere 260,7 MJ/kg H ₂ .	Iannuzzi et al., 2021

Indicador	Hallazgos	Fuente
Emisiones de GEI	A pesar del creciente interés por el H ₂ como fuente de energía limpia y versátil, su producción sigue dependiendo principalmente de combustibles fósiles.	Correa, et al., 2022
	Entre 2019 y 2030, los autobuses de gas natural comprimido podrían reducir las emisiones de CO ₂ en un 10,07%. La transición a vehículos de celda de combustible de H ₂ podría disminuir las emisiones de GEI hasta en un 87%.	Nadaleti et al., 2021
	Los autobuses eléctricos podrían reducir el consumo de energía entre un 25% a 38%, y las emisiones de CO ₂ entre un 52% a 61%, equivalente a una reducción anual de aproximadamente 0,93 Mt de CO ₂ equivalente.	Muñoz et al., 2022
	El transporte público urbano, mayormente impulsado por combustible diésel, emite 15,5% del total de GEI en 2017, equivalente a 56,15 millones de t/CO ₂ eq, de un total declarado de 386,3 millones de t/CO ₂ eq. Sin embargo, la transición hacia autobuses eléctricos alimentados por HV podría reducir estas emisiones hasta en un 70%.	Iannuzzi et al., 2021
	Al convertir flotas de buses urbanos a HV se reduce en el 87% en emisiones de GEI.	Muñoz et al., 2022
Uso de recursos y materiales	Uso de recursos eólicos en la Meseta Somuncura para generar energía requerida para la producción de HV de forma sostenible y sin emisiones de carbono.	Malte Dorn, 2024
Consumo de agua	Durante los años entre 2016 y 2020, las instalaciones hidroeléctricas en Argentina desaprovecharon un total de 4,08x10 ¹⁸ J de energía hidráulica por año, acompañado de un volumen promedio de agua no utilizado estimado en 2,61x10 ¹³ m ³ anualmente.	Nadaleti et al., 2021

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **tabla 4**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en Argentina. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, el uso de recursos y materiales, y el consumo de agua.

Producción de HV y energía requerida

Argentina se posiciona como un actor clave en la generación de HV, gracias a sus recursos renovables abundantes y un potencial de crecimiento significativo. Según Nadaleti et al. (2021), el país podría utilizar el excedente de energía hidroeléctrica de instalaciones como Yacyretá y Salto Grande para producir hasta 3,44×10¹⁰ kg-H₂ anuales. Asimismo, Correa et al. (2022) resaltan la capacidad de generar 93 729 t/año utilizando 5 436 GWh/año de energía eólica, especialmente en la Patagonia, una región con condiciones óptimas para la generación renovable.

Por otro lado, en términos de procesos específicos, Muñoz et al. (2022)

destacan la eficiencia de la electrólisis, que requiere 52,4 kWh por kg de H₂ con un factor de capacidad del 54,9 %, apoyándose en una capacidad instalada de 1,13 GW de energía eólica. En esta línea, Armijo y Philibert et al. (2020) aportan datos complementarios al señalar un consumo energético para el electrolizador de 47,6 kWh/kg H₂, asociado a una eficiencia del 70 % basada en el poder calorífico inferior (LHV) del H₂. Además, Malte Dorn (2024) proyecta un crecimiento sostenible en la industria, anticipando una expansión de la producción desde 40 000 t/año a 1,36 Mt para 2038.

En este contexto, Iannuzzi et al. (2021) aportan un análisis detallado sobre las rutas tecnológicas para producir H₂ en Argentina. Por ejemplo, mediante electrólisis del agua, se podrían alcanzar consumos energéticos de 218,1 MJ/kg H₂ en un esquema centralizado y 194,4 MJ/kg H₂ en uno descentralizado. Asimismo, destacan la viabilidad de la gasificación de biomasa, con consumos de 383,5 MJ/kg H₂ y 382,8 MJ/kg H₂, y de la reforma de biogás, que requiere 260,7 MJ/kg H₂. Estos estudios reflejan no solo el potencial técnico del país, sino también su capacidad para escalar una industria robusta y sostenible de HV, alineándose con la transición energética global y la descarbonización.

Emisiones de gases GEI

El impacto del HV en la reducción de emisiones de GEI se presenta como un componente esencial en la transición energética de Argentina. Nadaletti et al. (2021) destacan que, entre 2019 y 2030, la transición a vehículos de celda de combustible de H₂ podría reducir las emisiones de GEI hasta en un 87 %, un cambio significativo en comparación con los autobuses impulsados por gas natural comprimido, que solo logran una reducción del 10,07% en emisiones de CO₂. Este potencial transformador se complementa con los hallazgos de Muñoz et al. (2022), quienes enfatizan que la conversión de flotas urbanas a HV puede lograr reducciones de emisiones comparables del 87 %. Además, Iannuzzi et al. (2021) indican que el transporte público urbano, actualmente responsable del 15,5% de las emisiones totales de GEI en Argentina, podría disminuir sus emisiones hasta en un 70% si se adopta HV como combustible. Por otro lado, los autobuses eléctricos podrían contribuir a una reducción de emisiones entre un 52% y 61%, lo que equivale a 0,93 Mt de CO₂eq al año

Muñoz et al., 2022). Estos datos destacan la relevancia del HV no solo como una alternativa energética limpia, sino también como una herramienta clave para cumplir con los objetivos de descarbonización en sectores críticos como el transporte.

Uso de recursos y materiales

El uso eficiente de recursos renovables es esencial para el desarrollo del HV en Argentina. Según Malte Dorn (2024), la Meseta Somuncurá es una región clave para la producción de HV debido a su potencial eólico, el cual permite un proceso sostenible y libre de emisiones de CO₂. Este recurso natural, combinado con la infraestructura energética existente y la experiencia técnica disponible, refuerza la capacidad del país para generar hidrógeno HV de manera sostenible.

Consumo de agua

La producción de H₂ mediante electrólisis implica un consumo significativo de agua, lo que exige un manejo eficiente de este recurso. Nadaleti et al. (2021) estiman que entre 2016 y 2020, las instalaciones hidroeléctricas desaprovecharon un promedio de 2.61×10^{13} m³ de agua al año, junto con una energía hidráulica equivalente a 4.08×10^{18} J. Este recurso hídrico no utilizado representa una oportunidad clave para integrar la producción de HV, optimizando el uso de la infraestructura hidroeléctrica disponible y contribuyendo a un enfoque más sostenible en la gestión del agua.

En conclusión, los aportes de Nadaleti et al. (2021), Correa et al. (2022), Muñoz et al. (2022), Malte Dorn (2024), y Lannuzzi et al. (2021) evidencian que Argentina posee los recursos, la infraestructura y la capacidad técnica para desarrollar una industria de HV competitiva y sostenible. Desde el aprovechamiento de recursos hidroeléctricos y eólicos hasta las proyecciones de crecimiento y reducción de emisiones de GEI, el país está bien posicionado para liderar la transición energética global hacia un futuro más limpio y eficiente.

4.1.2. Brasil

En la **Tabla 5** se presentan los principales parámetros ambientales y energéticos relacionados con la producción de HV en Brasil, destacando su potencial energético, el uso de recursos, las emisiones asociadas y el consumo de agua, con base en los datos más relevantes extraídos de investigaciones recientes.

Tabla 5

Parámetros para el sector ambiental en Brasil.

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	El reformador es un dispositivo clave que utiliza vapor de agua y etanol para producir H ₂ mediante reacciones de reformado de vapor. Este proceso requiere un suministro de energía térmica de 31,72 kW para generar 1 kg de H ₂ .	Cordaro et al., 2024
	Tiene capacidad de almacenamiento de HV en campos de gas offshore agotados hasta 5483 TWh. Esto es, 10 veces el consumo eléctrico anual en 2021.	Ciotta et al., 2023
	La planta de producción de HV en Pecém, que utiliza celdas de electrólisis de alta temperatura (SOEC) alimentadas por energía solar y eólica, requiere 17,67 MW de energía eléctrica, equivalente al 92,3 % de su demanda total, para producir 4,13 toneladas diarias de HV.	Izidoro y de Oliveira, 2023
	El proyecto en Porto do Açu contempla una planta diseñada para la producción de HV, que demandará 300 MW de energía renovable para alimentar el proceso de electrólisis. Este HV será posteriormente utilizado como insumo para la generación de 250 000 toneladas de amoníaco verde.	Chantre et al., 2022
	El H ₂ producido mediante electrólisis representa solo el 5% del total global, y su producción depende significativamente de fuentes de energía renovable.	Von Zuben et al., 2022
	Utilizando un prototipo experimental, se demostró la viabilidad de generar HV mientras se trata agua producida, empleando densidades de corriente de 7; 13 y 26 mA/cm ² , un voltaje de 27 V y una duración de 10 horas. El sistema alcanzó una eficiencia farádica superior al 95 %, produciendo 1,27 L de H ₂ seco por cada 0,5 L de agua tratada. Además, al escalar este sistema en Brasil, podría generar hasta 14 402 millones de m ³ de HV al día.	M. de Araujo et al., 2024
	El potencial de energía solar excedente en Brasil se estima en 4,29x10 ⁷ kWh/día, usado para producción de H ₂ .	Nadaleti, Gomes de Souza, et al., 2022
	El consumo de energía para producir H ₂ se calcula a 39,5 kWh/kg con sistemas basados en energía eólica y solar.	Macedo & Peyerl, 2022
	Para producir 1kg de HV se necesitan 59kWh de energía eléctrica, provenientes de fuentes renovables.	Maciel et al., 2023
	Considerando fuentes renovables predominantes, el potencial de producción de HV en el norte es de 224,51 toneladas por hora y en el noreste de 634 toneladas por hora, según la capacidad instalada y generación de energía de estas regiones.	Silva Junior y da Silva, 2024
Tiene un potencial de generación de energía eólica marina estimado de 697 GW de capacidad instalada en áreas con profundidades de hasta 50 metros.	Ciotta et al., 2023	

Indicador	Hallazgos	Fuente
Emisiones de GEI	Los combustibles sintéticos basados en H ₂ pueden emitir aproximadamente un 40 % menos de CO ₂ que los combustibles fósiles tradicionales.	Chantre et al., 2022
	El HV no genera emisiones directas de CO ₂ y puede reducir significativamente las emisiones en sectores como el transporte y la industria del acero	Von Zuben et al., 2022
	El HV en Brasil puede reducir significativamente las emisiones de CO ₂ , especialmente en sectores industriales y de transporte. Se destaca una posible reducción de hasta 97 % en emisiones comparado con combustibles fósiles.	Cavalcanti et al., 2024
	El documento menciona que el HV contribuye a la mitigación de GEI, pero no proporciona cifras específicas.	Macedo & Peyerl, 2022
	El HV puede contribuir a reducir las emisiones de GEI si se produce utilizando fuentes renovables; el impacto depende de la energía usada.	Germscheidt et al., 2021
	El GWP en la electrólisis varía según la fuente de energía renovable. La hidroeléctrica tiene un GWP de 4,6 a 15 kgCO ₂ eq/MWh con embalse, y de 2 a 11 kgCO ₂ eq/MWh sin embalse. La energía eólica alcanza entre 4,6 y 41 kgCO ₂ eq/MWh, afectada por el ciclo de vida de las turbinas. En tanto, la solar fotovoltaica registra un promedio de 52,3 kgCO ₂ eq/MWh, debido principalmente a la fabricación de los paneles.	Maciel et al., 2023
Se estima una reducción del 80 % en emisiones de CO ₂ al convertir flotas de transporte a HV.	Silva Junior y da Silva, 2024	
Uso de recursos y materiales	Se emplean SOEC que operan a 850°C y utilizan materiales avanzados, lo que mejora la eficiencia y velocidad de reacción en comparación con otros métodos de electrólisis, posicionándolas como una opción prometedora para la producción de HV a gran escala.	Izidoro & de Oliveira, 2023
	Tiene una alta disponibilidad de recursos renovables, con un 84,8% de la matriz eléctrica proveniente de fuentes renovables en 2020.	Chantre et al., 2022
	Uso de PEM y BDD	M. de Araujo et al., 2024
	La región de Pecém, con sus altos vientos y cercanía a puertos estratégicos, se posiciona como un punto clave para la producción de HV. Este proceso requiere electrolizadores PEM y sistemas de desalación para garantizar agua purificada. La infraestructura varía según la profundidad: estructuras fijas como monopiles y jackets se utilizan en aguas de hasta 80 m, mientras que plataformas flotantes son esenciales en profundidades mayores.	De Almeida et al., 2024
	Uso de materiales como membranas avanzadas y tecnología de electrólisis. Integración con sistemas renovables.	Hunt et al., 2022
	El estudio considera recursos tecnológicos como plantas solares y nucleares existentes	Nadaleti, Gomes de Souza, et al., 2022
	Los recursos incluyen sistemas híbridos de energía solar y eólica, y almacenamiento en tanques a alta presión.	Macedo & Peyerl, 2022
	La producción de HV mediante electrólisis tiene una eficiencia de entre el 40% y el 60%, dependiendo de las condiciones del sistema.	Germscheidt et al., 2021
El impacto ambiental incluye el uso de materiales como acero y concreto en infraestructura renovable.	Maciel et al., 2023	

Indicador	Hallazgos	Fuente
Consumo de agua	El reformador requiere 2,23 kg de agua en forma de vapor para producir 1 kg de H ₂ , ya que el proceso también obtiene H ₂ del etanol (C ₂ H ₅ OH) utilizado como reactivo.	Cordaro et al., 2024
	La planta de producción de HV ubicada en Pecém, que utiliza SOEC alimentada por energía solar y eólica, produce 4,13 toneladas diarias de HV y 23,7 toneladas diarias de O ₂ , con un consumo promedio de 36,8 m ³ de agua por día."	Izidoro y de Oliveira, 2023
	Se proyecta que, si se escala para tratar los 5 670 millones de m ³ de agua producida generados diariamente en Brasil, el sistema podría producir un volumen significativo de HV lo que representa un alto potencial económico en aplicaciones energéticas y de transporte.	M. de Araujo et al., 2024
	El sistema utiliza aproximadamente 0,82 litros de agua por Nm ³ de H ₂ producido. Se integra un sistema de desalación por ósmosis inversa con un consumo energético de 0,0030 MWh/m ³ .	De Almeida et al., 2024

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 5**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en Brasil. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, el uso de recursos y materiales, y el consumo de agua.

Producción de HV y energía requerida

Brasil presenta un enorme potencial para la producción de HV debido a sus abundantes recursos renovables. Ciotta et al. (2023) indican que el país tiene una capacidad de almacenamiento en campos de gas offshore agotados de hasta 5483 TWh, equivalente a diez veces el consumo eléctrico anual de 2021. Además, Nadaleti, Gomes de Souza et al. (2022) estiman un excedente diario de energía solar de $4,29 \times 10^7$ kWh/día, que puede ser utilizado para la producción de HV.

El consumo de energía para producir 1 kg de HV varía considerablemente, dependiendo de la tecnología empleada. Cordaro et al. (2024) reportan un consumo de 31,72 kWh utilizando reformadores con vapor de agua y etanol, mientras que Maciel et al. (2023) mencionan un requerimiento de 59 kWh al considerar fuentes renovables predominantes. Silva Junior y da Silva (2024) destacan un potencial de producción regional de 224,51 toneladas por hora en el norte y 634 toneladas por hora en el noreste, basado en la capacidad

instalada y generación de energía. Macedo y Peyerl (2022) también identifican un consumo promedio de 39,5 kWh/kg al integrar energía eólica y solar. En el caso de electrólisis de alta temperatura (SOEC), Izidoro y de Oliveira (2023) destacan que se requieren 17,67 MW de energía eléctrica, representando el 92,3% de la demanda total del sistema. Chantre et al. (2022) mencionan que el proyecto en Porto do Açú demanda 300 MW de energía renovable para producir HV destinado a la generación de amoníaco verde.

Emisiones de GEI

La producción de HV tiene un impacto positivo en la reducción de emisiones de GEI. Según Cavalcanti et al. (2024), el uso de HV puede disminuir las emisiones de CO₂ hasta en un 97 % en comparación con los combustibles fósiles, especialmente en los sectores industriales y de transporte. Además, Von Zuben et al. (2022) destacan que el HV no genera emisiones directas de CO₂ durante su utilización. Sin embargo, Maciel et al. (2023) advierten que el impacto ambiental del HV depende de las fuentes de energía utilizadas. Por ejemplo, la hidroeléctrica tiene un GWP de 2-15 kgCO₂eq/MWh, mientras que la solar fotovoltaica alcanza 52,3 kgCO₂eq/MWh debido a la fabricación de paneles. Silva Junior y da Silva (2024) destacan que la conversión de flotas de transporte a HV podría reducir las emisiones en un 80 %.

Uso de Recursos y Materiales

Brasil se beneficia de una matriz eléctrica donde el 84,8 % proviene de fuentes renovables (Chantre et al., 2022). En regiones como Pecém, De Almeida et al. (2024) destacan la utilización de electrolizadores PEM y sistemas de desalación, aprovechando las condiciones únicas de viento y proximidad a puertos estratégicos.

El uso de tecnologías avanzadas, como las celdas de SOEC, optimiza la eficiencia y sostenibilidad de la producción de HV (Izidoro y de Oliveira, 2023). Además, M. de Araujo et al. (2024) destacan el uso de membranas avanzadas, mientras que Macedo y Peyerl (2022) recalcan la integración de sistemas híbridos de energía solar y eólica.

Consumo de Agua

El consumo de agua es un aspecto crítico para evaluar la sostenibilidad de la producción de HV. Cordaro et al. (2024) mencionan que los reformadores requieren 2,23 kg de agua para producir 1 kg de H₂. En Pecém, Izidoro y de Oliveira (2023) reportan un consumo promedio de 36,8 m³/día de agua para producir 4,13 toneladas diarias de HV mediante SOEC.

Por otro lado, M. de Araujo et al. (2024) destacan que el tratamiento de los 5670 millones de m³ de agua producida diariamente en Brasil podría generar volúmenes significativos de HV, lo que representa una gran oportunidad económica. De Almeida et al. (2024) enfatizan la necesidad de sistemas de desalación por ósmosis inversa para garantizar el suministro de agua purificada.

En conclusión, los indicadores evaluados muestran que Brasil tiene un potencial excepcional para liderar la producción de HV. Sin embargo, es necesario abordar los desafíos relacionados con la eficiencia energética, el manejo de recursos y la sostenibilidad ambiental para garantizar un desarrollo competitivo y respetuoso con el medio ambiente.

4.1.3. Colombia

En la **Tabla 6** se presentan los principales parámetros ambientales y energéticos relacionados con la producción de HV en Colombia, destacando su potencial energético, el uso de recursos, las emisiones asociadas y el consumo de agua, con base en los datos más relevantes extraídos de investigaciones recientes.

Tabla 6

Parámetros para el sector ambiental en Colombia

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	Para 2050, Colombia podría producir hasta 9 Mt/a de HV, con 3,3 Mt/a mediante electrólisis y 5,7 Mt/a a partir de biomasa residual. Esta producción cubrirá la demanda nacional estimada en 1,85 Mt/a, dejando un excedente de 7,15 Mt/a para exportación, equivalente al 1,2% de la demanda global proyectada.	Rodríguez-Fontalvo et al., 2023
	En La Guajira, las FLH alcanzan 6081 h/año para la energía eólica y 1897 h/año para la energía solar. La Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia proyecta una demanda nacional de 1850 kt de H ₂ para el año 2050.	Burdack et al., 2022
	El potencial de producción de HV en la región del Caribe colombiano está ligado a la demanda proyectada y a la capacidad instalada de energías renovables, como la eólica y solar. Se proyecta una demanda diaria de aproximadamente 2164 toneladas para 2030 y 5 068 toneladas para 2040, lo que recalca la necesidad de desarrollar infraestructura adecuada y ampliar la capacidad de generación de energías renovables para impulsar un transporte más limpio y sostenible.	Erazo-Cifuentes et al. 2022
	Se proyecta producir anualmente 120 kt de HV para 2030, 790 kt para 2040 y 1,850 kt para 2050. La electrólisis alimentada por energía solar y eólica es la tecnología más prometedora, requiriendo capacidades de generación de 1,3 GW (solar) y 2,6 GW (eólica) para 2030.	Moreno et al., 2022
Emisiones de GEI	Colombia se ha propuesto reducir sus emisiones de GEI en un 51% para 2030. La transición del hidrógeno gris al HV tiene el potencial de disminuir significativamente las emisiones en sectores clave como el transporte y la industria. Además, el país planea implementar 600 000 vehículos eléctricos para 2030, como parte de su estrategia de descarbonización del sector transporte. No obstante, para cumplir plenamente con los compromisos del Acuerdo de París, sería necesario que todos los vehículos en Colombia operaran con sistemas de cero emisiones para 2035.	Burdack et al., 2022
	Se prevé un aumento significativo en la demanda de HV en los próximos años, con estimaciones que sugieren alcanzar 120; 790 y 1 850 kt para los años 2030, 2040 y 2050, respectivamente, según la planificación del Ministerio de Minas y Energía. Esta transición hacia el H ₂ , particularmente el H ₂ de bajo C, podría contribuir a reducir hasta el 22 % de las emisiones de GEI a nivel nacional, según lo definido en la CND.	Moreno et al., 2022
	Según los criterios establecidos por la Unión Europea a través del esquema CertifHy, se establece que la huella de carbono del HV en Colombia debe ser inferior a 4,13 kg CO ₂ -eq/kgH ₂ , lo que resalta la imperiosa necesidad de adoptar fuentes de energía renovable para su producción.	Rodríguez-Fontalvo et al., 2023
	Se proyecta que el uso de HV en transporte podría reducir significativamente las emisiones de GEI en Colombia, especialmente en el Caribe.	Erazo-Cifuentes et al. 2022
	La huella de carbono para tecnologías basadas en biomasa como el bagazo de caña es negativa (-9,8 kg CO ₂ -eq/kg H ₂). Electrólisis alimentada por energía eólica tiene 0,84 kg CO ₂ -eq/kg H ₂ , mientras que la solar presenta 3,88 kg CO ₂ -eq/kg H ₂ .	Moreno et al., 2022

Indicador	Hallazgos	Fuente
Uso de recursos y materiales	El enfoque principal está en el uso de recursos energéticos renovables como viento y sol en regiones estratégicas como La Guajira y Cesar.	Burdack et al., 2022
	Uso de AEC, PEM y SOEC, así como de materiales para compresión y almacenamiento como el LOHC, el LH ₂ y el GH ₂ .	Erazo-Cifuentes et al. 2022
	Los recursos clave para la producción de H ₂ mediante gasificación son el bagazo de caña y paja de arroz. Además, se utiliza energía solar y eólica para la electrólisis.	Moreno et al., 2022
Uso de agua	El elevado consumo de agua requerido durante el proceso de electrólisis genera preocupaciones sobre su sostenibilidad ambiental a largo plazo. En promedio, se necesitan 11 kg de agua para producir 1 kgH ₂ .	Rodríguez-Fontalvo et al., 2023
	Consumo teórico mínimo de agua es 0,009 m ³ /kg de H ₂ . Se considera un exceso del 25%, resultando en 0,01125 m ³ /kg.	Erazo-Cifuentes et al. 2022
	Se requiere agua pura para el proceso de electrólisis. Colombia tiene acceso a agua de mar, pero necesita procesos de ósmosis inversa para purificación, especialmente en zonas costeras.	Moreno et al., 2022

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 6**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en Colombia. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, el uso de agua y los recursos y materiales necesarios.

Producción de HV y energía requerida

Colombia posee un extraordinario potencial para la generación de HV, especialmente en la región del Caribe, donde abundan recursos naturales como la energía solar y eólica. Se estima una producción de hasta 9 Mt anuales para 2050, con planes específicos para generar 3,3 Mt/año mediante energía fotovoltaica, 1,893 Mt/año mediante energía eólica y 5,7 Mt/año de HV mediante de biomasa (Rodríguez-Fontalvo et al., 2023). En La Guajira, las FLH alcanzan 6 081 h/año para la energía eólica y 1 897 h/año para la energía solar, destacando el potencial de los recursos energéticos de la región. Además, se proyecta una demanda de 1 850 kt de H₂ para el año 2050 (Burdack et al., 2022).

El desarrollo de HV también está ligado a la capacidad de energías renovables instaladas, como solar y eólica, para satisfacer una demanda proyectada de 2 164 toneladas diarias en 2030 y 5 068 toneladas en 2040 (Erazo-Cifuentes

et al., 2022). Para 2030, se proyecta producir 120 kt de HV, alcanzando 1 850 kt en 2050, lo que requerirá capacidades de generación de 1,3 GW de energía solar y 2,6 GW de energía eólica (Moreno et al., 2022).

Mitigación de Emisiones de GEI

Según Moreno et al. (2022), la transición al HV tiene un impacto importante en la reducción de emisiones de GEI en Colombia. Ellos estiman que el uso de H₂ de bajo carbono podría contribuir a reducir hasta un 22 % de las emisiones nacionales de GEI, en línea con la NDC. Además, Rodríguez-Fontalvo et al. (2023) sostienen que la huella de carbono del HV debe ser inferior a 4,13 kg CO₂-eq/kg H₂, según los estándares europeos de CertifHy, lo que marca la necesidad de energía renovable en el proceso.

Las tecnologías basadas en biomasa como el bagazo de caña logran huellas de carbono negativas (-9.8 kg CO₂-eq/kg H₂), mientras que la electrólisis alimentada por energía eólica y solar registra valores bajos de 0,84 kg CO₂-eq/kg H₂ y 3,88 kg CO₂-eq/kg H₂, respectivamente (Moreno et al., 2022). Asimismo, el transporte eléctrico, con 600 000 vehículos proyectados para 2030, es una parte integral de esta estrategia (Burdack et al., 2022)

Consumo de Agua y Sostenibilidad

El consumo de agua es un desafío importante en la producción de HV. El proceso de electrólisis requiere un promedio de 11 kg de agua por cada kilogramo de H₂ producido (Rodríguez-Fontalvo et al., 2023). Se calcula un consumo teórico mínimo de 0,009 m³/kg, con un margen adicional del 25 %, resultando en 0,01125 m³/kg (Erazo-Cifuentes et al., 2022). Aunque Colombia tiene acceso a agua de mar, esta requiere procesos de purificación como la ósmosis inversa, lo que implica retos económicos y energéticos (Moreno et al., 2022).

Es fundamental optimizar los procesos tecnológicos y adoptar fuentes alternativas como agua de mar purificada para garantizar la sostenibilidad hídrica de la producción de HV.

Recursos y Materiales

El desarrollo del HV en Colombia se apoya en el aprovechamiento de energías renovables como viento y sol, principalmente en regiones como La Guajira y Cesar (Burdack et al., 2022). Además, se destacan tecnologías avanzadas como las AEC), PEM y SOEC, complementadas con materiales innovadores como el LOHC, LH₂ y GH₂ (Erazo-Cifuentes et al., 2022).

En conclusión, la **Tabla 6** destaca el extraordinario potencial de Colombia para desarrollar una industria de HV sostenible. Aprovechar los recursos renovables, mitigar las emisiones de GEI y optimizar el consumo de agua son acciones esenciales para consolidar este sector en el país. Integrar tecnologías avanzadas y subproductos agrícolas será clave para garantizar una transición energética efectiva y ambientalmente responsable.

4.1.4. Chile

En la **Tabla 7** se presentan los principales parámetros ambientales y energéticos relacionados con la producción de HV en Chile, destacando su potencial energético, el uso de recursos, las emisiones asociadas y el consumo de agua, con base en los datos más relevantes extraídos de investigaciones recientes.

Tabla 7

Parámetros para el sector ambiental en Chile

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	Chile destaca su potencial ambiental para producir y exportar HV, aprovechando sus abundantes recursos de energía renovable, como el sol y el viento. Cuenta con más de 3 000 horas de sol al año.	Lebrouhi et al., 2022
	La producción de HV mediante electrólisis en los casos analizados requiere una demanda de 339 GWh/año de electricidad de fuente fotovoltaica.	Carvalho et al., 2023
	El consumo de energía necesario para producir HV está directamente relacionado con el LCOE, el cual se estima en un rango de 7,5 a 16,1 €/MWh para energía solar y de 7,3 a 16,7 €/MWh para sistemas híbridos solar-eólico hacia el año 2050. A nivel nacional, se dispone de más de 1 200 GW de energía solar fotovoltaica, 550 GW de energía solar centrada y 14,5 GW de energía eólica, lo que resalta el potencial renovable del país.	Acosta et al., 2022
	Electrolizador de 7 MW, producción menor a 1 240 kg de H ₂ al día. Consumo total de 240 kWh/día.	Gallegos, 2023
	Electrolizador con una eficiencia de 61 kWh/kg H ₂ para producir 250 t/año usando energía solar y eólica combinada.	García G. y Oliva H., 2023
	Posee un impresionante potencial solar y eólico, con una capacidad de generación energética diversificada que alcanza los 23,3 GW. Esta capacidad proviene de una combinación de energía solar, eólica, hidroeléctrica y biomasa, lo que contribuye a una producción anual total de alrededor de 80 TWh	Armijo & Philibert, 2020
	Para generar 60 kg de H ₂ , se requiere 3,08 MWh de energía eléctrica utilizando un electrolizador PEM con eficiencia del 65%.	(Masip Macía et al., 2021)
Emisiones de GEI	El país destaca su potencial ambiental para contribuir a la reducción de las emisiones de GEI mediante la producción y exportación de HV. No se proporciona información específica	Lebrouhi et al., 2022
	La sustitución de 1 tonelada de combustibles pesados por H ₂ reduce las emisiones de CO ₂ en 3,24 toneladas.	Carvalho et al., 2023
	Reducción de emisiones de GEI hasta 2 500 kt de CO ₂ para 2050 por el uso de H ₂ en camiones de minería de alta capacidad.	Acosta et al., 2022
	Se estima una reducción de 630,9 toneladas de CO ₂ equivalente anualmente mediante combustión dual en remolcadores.	Gallegos, 2023
	La producción de HV generan emisiones de 1,06 a 1,57 kg CO ₂ e/kg-H ₂ en plantas híbridas (Mejillones, Taltal, Tiltil y Licanten); significativamente menor que el proceso de reformado de metano con vapor (SMR) con hasta 10 kg CO ₂ e/kg H ₂ .	García G. y Oliva H., 2023
	Reducción significativa de emisiones de CO ₂ al usar HV frente a generadores diésel. Emisiones evitadas no cuantificadas específicamente.	Masip Macía et al., 2021

Indicador	Hallazgos	Fuente
Consumo de agua	La producción masiva de H ₂ requiere una considerable cantidad de agua, aproximadamente 9L-H ₂ O/kg-H ₂ . Sin embargo, Chile cuenta con una diversidad de fuentes hídricas que podrían mitigar los impactos ambientales, desde las regiones áridas del norte hasta el sur con abundancia de agua.	Lebrouhi et al., 2022
	El consumo de agua en plantas de electrólisis es aproximadamente 0,0112 m ³ por kg de H ₂ producido	Carvalho et al., 2023
	Las plantas desalinizadoras en el norte del país proporcionan agua para los procesos de electrólisis.	Acosta et al., 2022
Usos de recursos y materiales	El uso de agua es considerado de bajo costo y no influye significativamente en los costos de producción.	García G. y Oliva H., 2023
	El análisis incluye materiales necesarios para la infraestructura de combustión dual.	Carvalho et al., 2023
	Requiere electrolizadores, compresores de H ₂ , y sistemas de almacenamiento; incluye kits de reconversión.	Gallegos, 2023
	Requiere sistemas de paneles solares, turbinas eólicas, y electrolizadores; las pérdidas técnicas rondan el 15% en ambos sistemas.	García G. y Oliva H., 2023
	Requiere paneles fotovoltaicos, electrolizadores PEM y sistemas de almacenamiento a alta presión (300-700 bar).	Masip Macía et al., 2021

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 7**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en Chile. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, el consumo de agua y los desafíos tecnológicos asociados.

Producción de HV y energía requerida

Chile se posiciona como un país líder en el desarrollo de HV gracias a sus excepcionales recursos renovables. Su capacidad para aprovechar más de 3 000 horas de sol anuales y la abundancia de viento le otorgan una ventaja significativa en la producción y exportación de este recurso energético sostenible (Lebrouhi et al., 2022). Estas condiciones únicas, combinadas con una disponibilidad nacional de más de 1 200 GW de energía solar y 14,5 GW de energía eólica, acentúan el enorme potencial energético del país (Acosta et al., 2022). El desarrollo de HV en el país también está respaldado por una infraestructura tecnológica avanzada. Por ejemplo, un electrolizador de 7 MW permite una producción diaria de hasta 1 240 kg de H₂ con un consumo energético de 240 kWh/día (Gallegos, 2023). Además, los sistemas híbridos de energía solar y eólica presentan una eficiencia destacada, alcanzando 61

kWh/kg H₂, lo que permite una producción anual de 250 toneladas (García G. y Oliva H., 2023).

Mitigación de Emisiones de GEI

Chile destaca su potencial ambiental en la mitigación de emisiones de GEI a través de la producción y exportación de HV. Si bien no se proporciona una cuantificación específica sobre el impacto total de la producción de HV en la reducción de GEI, los datos existentes reflejan importantes beneficios ambientales. Por ejemplo, la sustitución de una tonelada de combustibles pesados por H₂ puede reducir las emisiones de CO₂ en 3,24 toneladas (Carvalho et al., 2023), lo que representa una solución viable para sectores altamente contaminantes. En el ámbito de la minería, se proyecta que el uso de HV podría evitar hasta 2 500 kt de CO₂ para el año 2050 en camiones de alta capacidad (Acosta et al., 2022). Además, en aplicaciones marítimas, el uso de sistemas de combustión dual en remolcadores podría reducir anualmente 630,9 toneladas de CO₂ equivalente (Gallegos, 2023). Esto evidencia la versatilidad del HV como una solución sostenible no solo en tierra, sino también en actividades marítimas y de transporte pesado.

Otro aspecto importante es el impacto relativo de las tecnologías de producción de HV en comparación con métodos tradicionales. Por ejemplo, las emisiones asociadas con plantas híbridas de producción de H₂ (ubicadas en Mejillones, Taltal, Tiltil y Licantén) se sitúan entre 1,06 y 1,57 kg CO₂e/Kg-H₂, lo que es significativamente menor que las emisiones del reformado de metano con vapor (SMR), que pueden alcanzar hasta 10 kg de CO₂e/Kg-H₂ (García G. y Oliva H., 2023). Finalmente, aunque no se han cuantificado todas las emisiones evitadas, el uso de HV frente a generadores diésel también representa una contribución significativa para la reducción de CO₂ (Masip Macía et al., 2021).

Consumo de Agua y Sostenibilidad

El consumo significativo de agua que conlleva la producción de HV es un aspecto crítico destacado en la **Tabla 7**. Este consumo se estima en aproximadamente 9 litros por cada kilogramo de H₂ producido (Lebrouhi et al., 2022). Este análisis resalta la relevancia de gestionar eficientemente los

recursos hídricos, un aspecto especialmente crítico en un país como Chile, que combina regiones áridas en el norte con una abundancia de fuentes hídricas en el sur. En términos técnicos, el consumo de agua en las plantas de electrólisis es de aproximadamente 0,0112 m³ por kilogramo de hidrógeno producido, lo que evidencia la necesidad de implementar tecnologías optimizadas que minimicen los requerimientos de agua durante el proceso de producción (Carvalho et al., 2023).

Esta cantidad, aunque considerable, puede gestionarse mediante el uso de plantas desalinizadoras en las regiones del norte, que ya están diseñadas para proveer agua a procesos industriales como la electrólisis (Acosta et al., 2022). Esto asegura que el uso de agua dulce para la producción de hidrógeno sea mínimo en áreas donde este recurso es escaso. Adicionalmente, el costo asociado al consumo de agua se considera bajo y no representa un factor significativo en los costos totales de producción (García G. y Oliva H., 2023). En conclusión, aunque el consumo de agua es un componente clave en la producción de HV, Chile cuenta con las condiciones y la infraestructura necesarias para minimizar los impactos negativos. Sin embargo, es esencial que la planificación estratégica contemple el equilibrio entre la disponibilidad de agua y las demandas locales de otros sectores como la agricultura y el consumo humano, especialmente en regiones con estrés hídrico.

Desafíos Tecnológicos y Materiales

La **Tabla 7** también detalla los recursos y materiales necesarios para la implementación de infraestructuras sostenibles, poniendo en evidencia la complejidad técnica y material inherente a las tecnologías emergentes. Carvalho et al. (2023) destacan la importancia de incluir materiales específicos en infraestructuras como la combustión dual, lo que implica un enfoque integral en la planificación de recursos. Por otro lado, Gallegos (2023) insiste en la necesidad de componentes fundamentales como electrolizadores, compresores de H₂ y sistemas de almacenamiento, integrando además kits de reconversión. Esto refleja un avance técnico hacia la adaptabilidad y escalabilidad, aunque también plantea retos logísticos y económicos en la adquisición y mantenimiento de estos equipos.

En la misma línea, García G. y Oliva H. (2023) hacen hincapié en la integración de sistemas solares, turbinas eólicas y electrolizadores, con pérdidas técnicas estimadas del 15%. Este dato es importante, ya que muestra cómo la eficiencia técnica sigue siendo un desafío en la transición hacia fuentes de energía renovable. Tales pérdidas pueden impactar significativamente la viabilidad operativa de estos sistemas. Finalmente, Masip Macía et al. (2021) resaltan el papel de los paneles fotovoltaicos, electrolizadores PEM y sistemas de almacenamiento de alta presión (300-700 bar). Este enfoque ilustra cómo las tecnologías de almacenamiento avanzadas pueden jugar un papel esencial en la estabilización de redes energéticas basadas en fuentes renovables, aunque requieren altos niveles de inversión inicial y condiciones específicas para su implementación efectiva.

4.1.5. Ecuador

Se han analizado diversos estudios centrados en el sector ambiental, en la producción y uso del HV en Ecuador, la **Tabla 8** ofrece un resultado de los hallazgos obtenidos en base a los indicadores propuestos, brindando una perspectiva integral de los avances y desafíos en la transición hacia una modelo energética más sostenible.

Tabla 8*Parámetros para el sector ambiental en el Ecuador*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	Eólica: Capacidad instalada de 21,15 MW en Galápagos y Loja, con un potencial de 1 691 MW según el Atlas Eólico.	Castro Verdezoto et al., 2019
	Solar: 26 MW instalados, principalmente en Galápagos para promover sostenibilidad.	
	Biomasa: Genera 134,40 MW, principalmente para el sector industrial.	
	Hidroeléctrica: Proyección de 63 513 GWh para 2030, triplicando la generación de 2010.	
	Ecuador tiene un potencial de generación de HV equivalente a $3,23 \times 10^6$ kg H ₂ /año. Esto se logra mediante el uso de tecnologías renovables como solar fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica, siendo la mayor contribución proveniente de las fuentes hidroeléctricas.	Contreras-Vásquez, 2022
Emisiones de GEI	Ecuador tiene un potencial estimado de producción de HV de $4,39 \times 10^8$ t/año, respaldado por su alta densidad de producir 1 550 t/km ² , lo que demuestra la viabilidad significativa del país para incorporar el HV verde en su matriz energética.	Posso et al., 2023
	Ecuador, con más del 90% de su matriz renovable y solo un 20% de su potencial hidroeléctrico usado, puede ampliar su generación limpia para producir HV mediante electrólisis. Proyecciones incluyen 296 MW en eólica, 678 MW en geotérmica y 85 GWh de biomasa, reforzando su liderazgo en sostenibilidad.	Chiriboga et al., 2023
	En 2016, el transporte en Ecuador fue responsable del 70,63% de las emisiones de GEI relacionadas con el consumo de energía, debido a su alta dependencia de combustibles fósiles como diésel y gasolina.	Castro Verdezoto et al., 2019
Producción de vapor de agua	La producción de HV puede reducir las emisiones de GEI en el sector energético en un 35%. Además, el uso de H ₂ como combustible elimina contaminantes como Dióxido de carbono (CO ₂), Óxidos de Nitrógeno (NO _x) y Dióxido de Azufre (SO ₂).	Posso et al., 2023
	La incorporación de HV en el transporte podría reducir hasta 17,67 millones de toneladas de CO ₂ eq para 2050.	Chiriboga et al., 2023
Usos de recursos y materiales	El cambio hacia el HV implica un aumento del 150% en la producción de vapor de agua en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, este elemento tiene una permanencia breve en la atmósfera en comparación con el CO ₂	Posso et al., 2023
	El excedente eléctrico hasta 2030 podría usarse para fomentar la adopción de vehículos eléctricos y electrificar sectores industriales.	Castro Verdezoto et al., 2019
	La energía solar fotovoltaica se destaca como una tecnología adecuada en la producción de HV, permitiendo la generación de electricidad mediante el proceso de electrólisis del agua.	Posso et al., 2023

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 8**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la

producción de HV en Ecuador. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, el vapor de agua y los desafíos tecnológicos asociados.

Producción de HV y energía requerida

El análisis realizado sobre el sector energético de Ecuador muestra un panorama prometedor para la generación de HV aprovechando recursos renovables. Según Castro Verdezoto et al. (2019), el país cuenta con instalaciones destacadas en energía eólica y solar, como los 21,15 MW en Galápagos y Loja y los 26 MW solares en Galápagos, que apuntalan su sostenibilidad. Además, la biomasa contribuye con 134,40 MW al sector industrial, mientras que la proyección hidroeléctrica para 2030 asciende a 63 513 GWh, triplicando los niveles de 2010.

Por otro lado, Posso et al. (2023) destacan la viabilidad del país para la producir $4,39 \times 10^8$ t/año de HV con una densidad estimada de 1 550 t/Km², posicionando a Ecuador como líder en sostenibilidad gracias a que más del 90% de su matriz energética proviene de fuentes renovables. Asimismo, Contreras-Vásquez (2022) señala que, mediante electrólisis, Ecuador podría generar hasta $3,23 \times 10^6$ kg de H₂ al año, destacando que las fuentes hidroeléctricas representan la mayor contribución dentro de este potencial. Finalmente, Chiriboga et al. (2023) complementan que la infraestructura puede incrementarse con proyecciones de 296 MW eólicos, 678 MW geotérmicos y 85 GWh de biomasa, lo que solidifica la posibilidad de generar HV mediante electrólisis.

Emisiones de GEI

El transporte es una de las principales fuentes de emisiones de GEI en Ecuador, representando el 70,63 % de las emisiones relacionadas con el consumo energético debido al uso intensivo de combustibles fósiles (Castro Verdezoto et al., 2019). Sin embargo, la transición hacia HV podría transformar este panorama. Posso et al. (2023) indican que la producción de HV puede reducir las emisiones energéticas en un 35 %, además de eliminar contaminantes como Dióxido de carbono (CO₂), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Dióxido de Azufre (SO₂).

En este sentido, Chiriboga et al. (2023) proyectan que la implementación de HV en el transporte podría reducir hasta 17,67 millones de toneladas de CO₂eq para 2050, estableciendo una meta ambiciosa pero alcanzable que refuerza la importancia del HV como solución a largo plazo.

Producción de vapor de agua

El cambio hacia el HV como fuente energética genera un aumento del 150% en la producción de vapor de agua comparado con los combustibles fósiles, como señalan Posso et al. (2023). A pesar de este incremento, la permanencia del vapor de agua en la atmósfera es mucho más breve que la del CO₂, lo que minimiza su impacto climático directo. Este aspecto refuerza la percepción de sostenibilidad de HV, aunque también insiste la necesidad de continuar evaluando posibles implicaciones ambientales.

Usos de recursos y materiales

El excedente eléctrico previsto hasta 2030 es una oportunidad estratégica para promover la electrificación de sectores industriales y la adopción de vehículos eléctricos (Castro Verdezoto et al., 2019). Por su parte, Posso et al. (2023) destacan que la energía solar fotovoltaica es particularmente adecuada para la producción de HV a través de electrólisis, consolidando su papel en la transición energética sostenible de Ecuador.

Este análisis integral muestra que Ecuador tiene un camino claro hacia la sostenibilidad energética mediante el aprovechamiento de sus recursos renovables, la reducción de emisiones y la producción de HV, aunque se requiere una planificación robusta para maximizar su potencial y minimizar posibles impactos ambientales.

4.1.6. México

Se han analizado diversos estudios centrados en el sector ambiental, en la producción y uso del HV en México, la **Tabla 9** ofrece un resultado de los hallazgos obtenidos en base a los indicadores propuestos, brindando una perspectiva integral de los avances y desafíos en la transición hacia un modelo energética más sostenible.

Tabla 9*Parámetros para el sector ambiental en México*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	El potencial de producción de H ₂ solar en zonas urbanas de México es de 9,39 Mt/año, suficiente para sustituir el 51,6% de la gasolina utilizada en transporte ligero en 2025 y el 54,7% en 2030. Para cubrir completamente el consumo de gasolina, se necesitarían 4,84 Mt de HV en 2025 y 5,14 millones en 2030.	Juárez-Casildo et al., 2022
	La eficiencia de la división del agua depende de electrocatalizadores avanzados. La capacidad del tanque de HV es de 136 atm para alimentar el prototipo híbrido vehicular México evalúa una microred en Puertecitos, Baja California, equipada con un sistema fotovoltaico de 54,4 kW y una turbina eólica de 5 kW, alcanzando una penetración renovable del 55% al 60% con tecnologías de H ₂ y del 51,6% sin ellas. La integración del sistema de H ₂ reduce los excedentes de energía renovable de 45 000 kWh a un rango de 6 000 a 30 000 kWh, optimizando el uso de energías limpias para promover la sostenibilidad en comunidades rurales.	Solorza-Feria, 2023 Cruz-Soto et al., 2022
Emisiones de GEI	Se evitarán aproximadamente 124,38 Mt de CO ₂ anuales en 2025, lo que representa el 23% de las emisiones totales del transporte en México. Para 2030, se espera una reducción de emisiones de CO ₂ a unos 147,52 Mt/año.	Juárez-Casildo et al., 2022
	El uso de celdas de combustible PEM en transporte híbrido reduce las emisiones de carbono a prácticamente cero cuando se utiliza HV y oxígeno del aire. Se reporta una reducción de emisiones de CO ₂ de hasta un 27% al incorporar tecnologías de almacenamiento de H ₂ en la microred.	Solorza-Feria, 2023 Cruz-Soto et al. 2022
Consumo de agua	El porcentaje de agua renovable requerida para producir HV en áreas urbanas es de 0,08% a nivel nacional. La producción nacional requiere 7,27% del agua de lluvia disponible.	Juárez-Casildo et al., 2022
	El proceso de electrólisis utiliza agua con electrolizadores avanzados y puede ser alimentado con fuentes renovables como solar y eólica.	Solorza-Feria, 2023
Usos de recursos y materiales	La producción utiliza energía solar y sistemas de electrólisis con una eficiencia del 75%. Los electrolizadores son alimentados por paneles solares instalados en techos urbanos.	Juárez-Casildo et al., 2022
	El prototipo vehicular incorpora materiales avanzados como PEM y electrocatalizadores basados en alternativas como boruros de metales no preciosos, MOF y aleaciones de níquel, diseñados para sustituir los metales nobles como el platino, reduciendo costos y promoviendo la sostenibilidad tecnológica. Se utilizan electrolizadores PEM con eficiencia del 70%-80%, tanques de hidrógeno a 350 bar para almacenamiento seguro y celdas de combustible para convertir el hidrógeno en electricidad limpia y eficiente.	Solorza-Feria, 2023 Cruz-Soto et al. 2022

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 9**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en México. Estos indicadores incluyen aspectos

relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, el consumo de agua y los desafíos tecnológicos asociados.

Producción de HV y energía requerida

México posee un alto potencial para incorporar el HV como una alternativa sostenible en el sector transporte. De acuerdo con Juárez-Casildo et al. (2022), el HV podría sustituir el 51,6 % de la gasolina requerida para transporte ligero en 2025 y alcanzar un 54,7 % en 2030. Para lograrlo, serían necesarios 4,84 Mt/año de HV en 2025 y hasta 5,14 Mt/año en 2030. Complementariamente, Cruz-Soto et al. (2022) destacan un proyecto de microred en Puertecitos, Baja California, equipada con sistemas fotovoltaicos y turbinas eólicas que permiten una penetración renovable del 55 % - 60 % al integrar tecnologías de H₂, reduciendo los excedentes de energía renovable de 45 000 kWh a un rango de 6 000 a 30 000 kWh. Estos avances subrayan la capacidad del HV para transformar la matriz energética de México, optimizando el uso de energías limpias y promoviendo la sostenibilidad en comunidades rurales y urbanas.

Emisiones de GEI

El impacto ambiental del HV se refleja en su capacidad para disminuir las emisiones de GEI. Según Juárez-Casildo et al. (2022), su aplicación podría evitar la emisión de 124,38 Mt de CO₂ en 2025, lo que representa el 23% de las emisiones totales del sector transporte, y alcanzaría 147,52 Mt/año en 2030. Además, el uso de celdas de combustible PEM en transporte híbrido, descrito por Solorza-Feria (2023), puede reducir las emisiones de carbono a casi cero cuando se emplea HV. Por su parte, Cruz-Soto et al. (2022) reportan una reducción de emisiones de CO₂ de hasta un 27 % mediante la incorporación de tecnologías de almacenamiento de H₂ en microredes, consolidando al HV como una solución clave en la mitigación del cambio climático.

Consumo de agua

El consumo de agua para la producción de HV es mínimo y sostenible. Juárez-Casildo et al. (2022) calculan que solo el 0,08 % del agua renovable nacional y el 7,27 % del agua de lluvia disponible serían necesarios para satisfacer la

demanda de producción. Solorza-Feria (2023) complementa esta información destacando el uso de electrolizadores avanzados alimentados por fuentes renovables como la energía solar y eólica, lo que garantiza la sostenibilidad hídrica del proceso.

Usos de recursos y materiales

La producción de HV en México utiliza tecnologías innovadoras y materiales avanzados. Juárez-Casildo et al. (2022) mencionan la implementación de sistemas de electrólisis alimentados por paneles solares urbanos con una eficiencia del 75 %. Además, Solorza-Feria (2023) resalta el uso de materiales alternativos a los metales nobles, como boruros de metales no preciosos, MOF y aleaciones de níquel, lo que reduce los costos y mejora la sostenibilidad tecnológica. Cruz-Soto et al. (2022) destacan el empleo de electrolizadores PEM de alta eficiencia (70 % - 80 %), tanques de almacenamiento de hidrógeno a 350 bar y celdas de combustible que permiten convertir el hidrógeno almacenado en electricidad de manera limpia y eficiente.

Por lo tanto, Los hallazgos reflejan el potencial de México para liderar la transición hacia una economía de H₂, con beneficios en reducción de emisiones, optimización de recursos y avance tecnológico. La integración del H₂ en el transporte es clave para lograr sostenibilidad ambiental y energética, promoviendo una movilidad más limpia y eficiente.

4.1.7. Paraguay

Se han analizado estudios sobre el sector ambiental y el uso del HV en Paraguay. La **Tabla 10** resume los hallazgos según los indicadores propuestos, ofreciendo una visión integral de los avances y desafíos hacia un modelo energético más sostenible.

Tabla 10*Parámetros para el sector ambiental en el Paraguay*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	El potencial total de producción de HV verde en Paraguay se estima en 22.5 Mt/año, impulsado principalmente por 2 695 petajulio (PJ) de energía primaria proveniente de la energía solar fotovoltaica.	Posso et al., 2022
	Tiene alto potencial para la producción de HV, gracias a sus abundantes recursos hidroeléctricos, especialmente en las plantas de Itaipú y Yacyretá. Entre 2016 y 2020, estas plantas desperdiciaron un promedio anual de $6,31 \times 10^{18}$ Joules de energía hidráulica y $2,61 \times 10^{13}$ m ³ de agua debido al vertido de excedentes. Este desperdicio podría haberse aprovechado para producir hasta $5,32 \times 10^{10}$ kg de HV por año, de los cuales $2,87 \times 10^{10}$ kg corresponderían a Itaipú y $2,45 \times 10^{10}$ kg a Yacyretá, mediante procesos de electrólisis.	Nadaleti et al., 2021
Emisiones de GEI	La utilización de HV en autobuses híbridos eléctricos de celdas de combustible permite un ahorro aproximado del 96% en las emisiones de CO ₂ en comparación con los autobuses diésel.	Posso et al., 2022
	Según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de Paraguay, el sector de energía y transporte representa el 16,28% de las emisiones totales de GEI en el país. De este porcentaje, el 89,01% proviene específicamente del sector transporte.	(Euroclima, 2023)
Consumo de agua	La huella hídrica de la producción de H ₂ verde mediante electrólisis se establece en 9 kgH ₂ O/kgH ₂ , contrastando con valores de 13 a 85 kgH ₂ O/kgH ₂ para métodos tradicionales basados en fuentes fósiles.	Posso et al., 2022
	En el proceso de electrólisis del agua para obtener H ₂ limpio, se producen 0,9 litros de agua adecuada por cada metro cúbico tratado mediante ósmosis.	Posso et al., 2022
	Hacia el 2050, se estima que el consumo de agua asociado con la producción de HV representaría entre 7 y 9 mil millones de metros cúbicos anuales, equivalente al 0,25% del consumo de agua dulce.	Posso et al., 2022
Usos de recursos y materiales	La producción de HV utiliza agua y energía renovable (solar, eólica e hidroeléctrica) en sistemas de electrólisis PEM con una eficiencia del 73,3%. Requiere materiales avanzados como electrodos de níquel y platino, y sistemas de almacenamiento de alta resistencia para asegurar sostenibilidad y eficiencia.	Posso et al., 2022
	Se aprovecha el excedente de agua de las plantas hidroeléctricas para la producción de HV, utilizando tecnología avanzada como electrolizadores de alta capacidad, capaces de generar 50 000 Nm ³ /h de H ₂ con una pureza del 99,999%.	Nadaleti et al., 2021

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 10**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en Paraguay. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, consumo de agua y los desafíos tecnológicos asociados.

Producción de HV y energía requerida

Paraguay cuenta con un alto potencial para la generación de HV, aprovechando principalmente sus recursos hidroeléctricos y solares. Según Nadaleti et al. (2021), las plantas hidroeléctricas de Itaipú y Yacyretá desperdician anualmente un promedio de $6,31 \times 10^{18}$ Joules de energía hidráulica y $2,61 \times 10^{13}$ metros cúbicos de agua, lo que podría utilizarse para producir hasta $5,32 \times 10^{10}$ kg de HV por año, de los cuales $2,87 \times 10^{10}$ kg corresponderían a Itaipú y $2,45 \times 10^{10}$ kg a Yacyretá mediante electrólisis. Por otro lado, Posso et al. (2022) estima un potencial total de producción anual de 22,5 Mt de HV impulsado principalmente por 2695 PJ de energía primaria proveniente de la energía solar fotovoltaica. Estos hallazgos resaltan las oportunidades de Paraguay para diversificar su matriz energética y consolidar su papel en la transición hacia una economía de H₂ sostenible.

Emisiones de GEI

El sector transporte en Paraguay representa el 89,01 % de las emisiones de GEI dentro del sector energético, según Euroclima (2023). Este porcentaje refleja la importancia de adoptar tecnologías limpias para reducir emisiones. Posso et al. (2022) señala que la implementación de HV en autobuses híbridos eléctricos con celdas de combustible permitiría una reducción aproximada del 96% en las emisiones de CO₂ en comparación con los autobuses diésel. La transición del transporte público hacia tecnologías basadas en HV no solo contribuiría a mitigar las emisiones de GEI, sino que también mejoraría la calidad del aire en zonas urbanas.

Consumo de agua

La producción de HV mediante electrólisis en Paraguay presenta una huella hídrica considerablemente baja en comparación con métodos tradicionales. Según Posso et al. (2022), la producción de HV mediante electrólisis presenta una huella hídrica significativamente baja, requiriendo 9 kg de agua por cada kg de H₂ producido, en comparación con los métodos tradicionales basados en combustibles fósiles, que consumen entre 13 y 85 kg de agua por kg de H₂ producido. Además, se proyecta que, hacia 2050, el consumo de agua asociado a la producción de HV representará apenas el 0,25 % del consumo

total de agua dulce, reforzando su viabilidad como una solución sostenible y ambientalmente responsable.

Usos de recursos y materiales

La producción de HV en Paraguay utiliza recursos clave como agua y energía renovable (solar, eólica e hidroeléctrica). Nadaleti et al. (2021) destaca el uso de tecnología avanzada, incluyendo electrolizadores de alta capacidad con una eficiencia del 73,3 % y una capacidad de producción de 50 000 Nm³/h de H₂ con una pureza del 99,999 %. Además, Posso et al. (2022) menciona el empleo de materiales avanzados como electrodos de níquel y platino, esenciales para garantizar la sostenibilidad y la eficiencia del proceso de electrólisis y almacenamiento.

En conclusión, los resultados analizados en los estudios de Posso et al. (2022) y Nadaleti et al. (2021) demuestran que Paraguay tiene un potencial significativo para la producción de HV, utilizando sus recursos renovables de manera eficiente. La reducción de emisiones de GEI en el sector transporte y la baja huella hídrica asociada al proceso refuerzan la viabilidad ambiental del HV. Además, el uso de tecnologías avanzadas y materiales especializados posiciona a Paraguay como un actor clave en la transición hacia una economía energética más sostenible.

4.1.8. Perú

Se han analizado estudios sobre el sector ambiental y el uso del HV en Perú. La **Tabla 11** resume los hallazgos según los indicadores propuestos, ofreciendo una visión integral de los avances y desafíos hacia un modelo energético más sostenible.

Tabla 11*Parámetros para el sector ambiental en el Perú*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	Se necesitan 56,1 kWh para producir 1 kg de hidrógeno mediante electrólisis utilizando una celda PEM.	Nahui-Ortiz et al., 2021
	MMEX Resources Corporation anunció el primer proyecto de producción de HV en Perú, con una planta en la costa sur capaz de producir hasta 55 toneladas diarias utilizando 160 MW de energía renovable. Este proyecto destaca por el gran potencial de recursos renovables del país, que incluye 70 GW de hidroelectricidad, 25 GW de energía solar y 20 GW de energía eólica, aún en gran parte subutilizados.	Celis et al., 2022
	La producción de HV mediante electrólisis del agua requiere 39 kWh/kg-H ₂ en condiciones ideales. Con un electrolizador PEM al 75% de eficiencia, el consumo asciende a 52 kWh/kg-H ₂ , lo que permite generar 947202,28 t/año en Piura aprovechando fuentes solares, eólicas y de biomasa.	(Caravantes et al., 2024)
Emisiones de GEI	Reducción estimada de 496,7 kg de CO ₂ al año debido a la sustitución parcial de combustibles fósiles.	Nahui-Ortiz et al., 2021
	El HV contribuye significativamente a la reducción de emisiones de GEI.	Celis et al., 2022
	La sustitución de combustibles fósiles por HV verde en el transporte de la región de Piura reduciría las emisiones de GEI en 1 606 454 t CO ₂ e/año, equivalente al 66,42% de las emisiones totales del sector transporte en la región. Sustituir el uso de Diesel B5 reduciría 896 333 t CO ₂ e/año, lo que representa el 37,06% de las emisiones del transporte.	Caravantes et al., 2024
Consumo de agua	La electrólisis utiliza agua como materia prima principal para producir hidrógeno y oxígeno, según la ecuación química: 2H ₂ O→2H ₂ +O ₂ .	Nahui-Ortiz et al., 2021
	El HV, producido a través de electrólisis, utiliza agua como materia prima principal y requiere energía de fuentes renovables para separar el hidrógeno del oxígeno.	Celis et al., 2022
Usos de recursos y materiales	Se utilizan recursos renovables como energía solar y eólica para generar electricidad destinada al proceso de electrólisis.	Nahui-Ortiz et al., 2021
	Se requiere agua y energía renovable, como solar, eólica o hidráulica. En Perú, la abundancia de estos recursos, junto con el acceso al océano, facilita la producción y exportación de HV.	Celis et al., 2022
	Recursos necesarios: electricidad generada a partir de energía solar, eólica y biomasa. Materiales: electrolizadores PEM, paneles solares modelo ESPSC 400 M PERC y turbinas eólicas Siemens Gamesa SG 2.1e114. Residuos agrícolas (arroz, maíz, etc.) y estiércol (vacuno, porcino y aves) son clave para generación de biomasa.	Caravantes et al., 2024

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 11**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en Perú. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, consumo de agua y los desafíos tecnológicos asociados.

Producción de HV y energía requerida

La producción de HV mediante electrólisis depende de diversos factores técnicos y contextuales. Según Caravantes et al. (2024), producir 1 kg de H₂ requiere un consumo energético de 52 kWh cuando se utiliza un electrolizador PEM con una eficiencia del 75 %. Esto permite alcanzar una producción anual de 947 202,28 toneladas anuales en la región de Piura, aprovechando principalmente fuentes de energía solar, eólica y biomasa. Por otro lado, Nahui-Ortiz et al. (2021) reporta un consumo energético de 56,1 kWh/kg bajo condiciones locales, sin especificar la eficiencia del electrolizador utilizado. Estas cifras destacan la necesidad de optimizar los procesos para aprovechar el gran potencial renovable de Perú. Según Celis et al. (2022), el país cuenta con 70 GW de hidroelectricidad, 25 GW de energía solar y 20 GW de energía eólica, en su mayoría subutilizados. Además, resalta que el proyecto anunciado por MMEX Resources Corporation, con una planta diseñada para producir 55 toneladas diarias de H₂, posiciona al Perú como un líder potencial en la producción de HV en la región.

Emisiones de GEI

El HV tiene un impacto significativo en la reducción de emisiones de GEI. Según Nahui-Ortiz et al. (2021), la sustitución parcial de combustibles fósiles por HV podría reducir hasta 496,7 kg de CO₂ al año. Caravantes et al. (2024) proyectan que el uso de HV en el sector transporte de la región de Piura podría evitar 1 606 454 t-CO₂/año, lo que representa el 66,42 % de las emisiones de este sector. Además, la sustitución del Diesel B5 por H₂ podría reducir 896 333 t-CO₂/año, demostrando el gran potencial del HV para descarbonizar este sector estratégico.

Consumo de agua

La electrólisis utiliza agua como materia prima principal, descomponiéndola en hidrógeno y oxígeno. Este proceso requiere tanto recursos hídricos como energía renovable. Caravantes et al. (2024) y Nahui-Ortiz et al. (2021) coinciden en señalar que el agua es un recurso esencial para la producción de H₂, lo que posiciona a Perú, con su acceso al océano y abundancia de recursos renovables, como un lugar adecuado para su desarrollo. Sin

embargo, ambos estudios también resaltan la necesidad de gestionar el agua de manera sostenible para evitar conflictos con otros usos esenciales.

Uso de recursos y materiales

La producción de HV en Perú depende de recursos renovables como energía solar, eólica e hidráulica (Nahui-Ortiz et al., 2021; Celis et al., 2022). Además, requiere tecnologías avanzadas como electrolizadores PEM, paneles solares y turbinas eólicas (Caravantes et al., 2024). Según Celis et al. (2022) destacan que la combinación de acceso al océano y recursos renovables en Perú facilita no solo la producción de HV, sino también su potencial exportación, mientras que Caravantes et al. (2024) recalcan el papel de los residuos agrícolas y estiércol para la generación de biomasa, fomentando una economía circular.

Por tanto, los hallazgos reflejan que Perú tiene un gran potencial para desarrollar la producción de HV gracias a su abundancia de recursos renovables y condiciones geográficas favorables. Sin embargo, es importante optimizar la eficiencia de los procesos, gestionar de manera sostenible los recursos hídricos y priorizar sectores estratégicos como el transporte para maximizar los beneficios económicos y ambientales del HV.

4.1.9. Uruguay

Se han analizado diversos estudios centrados en el sector ambiental, en la producción y uso del HV en Uruguay, la **Tabla 12** ofrece un resultado de los hallazgos obtenidos en base a los indicadores propuestos, brindando una perspectiva integral de los avances y desafíos en la transición hacia una modelo energética más sostenible.

Tabla 12*Parámetros para el sector ambiental en Uruguay*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Producción de HV y energía requerida	Durante el periodo de estudio (2016-2020), las plantas hidroeléctricas en Uruguay, incluyendo la central de Salto Grande, desaprovecharon anualmente un total de $2,60 \times 10^{18}$ J de energía hidráulica. Esta energía desperdiciada representa un recurso significativo, con un potencial de generar hasta $2,19 \times 10^{10}$ kg de HV al año.	Nadaleti et al., 2021
	Uruguay tiene un potencial máximo anual de producción de HV de entre 2 350 y 2 500 toneladas a partir de excedentes eólicos, y entre 13 000 y 14 000 toneladas utilizando excedentes hidroeléctricos. Además, el consumo energético específico para producir 1 kg de hidrógeno con un electrolizador PEM es de 55 kWh/kg.	Antúnez et al., 2023
Emisiones de GEI	Uruguay debe reducir las emisiones de GEI para mitigar el cambio climático, ya que el consumo de combustibles fósiles, que representa el 78% de la matriz energética global, es la principal fuente de emisiones de CO ₂ , cuya concentración supera las 400 partes por millón (ppm). Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), es necesario reducir estas emisiones en un 45% para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono para 2050.	Antúnez et al., 2023
Consumo de agua	Durante el periodo de estudio (2016-2020), las plantas hidroeléctricas en Uruguay, desaprovecharon un volumen promedio de agua de $9,59 \times 10^{12}$ m ³ /año.	Nadaleti et al., 2021
	Uruguay, con una abundante disponibilidad de agua dulce y una precipitación promedio anual de 1 320 mm, cuenta con condiciones altamente favorables para la producción de HV mediante electrólisis del agua.	Antúnez et al., 2023
	Uruguay dispone de abundantes recursos hídricos y condiciones favorables para la producción de HV, gracias a su disponibilidad de agua dulce y al uso de tecnologías avanzadas como la electrólisis PEM.	Antúnez et al., 2023

La presente discusión se fundamenta en los datos presentados en la **Tabla 12**, la cual resume los principales indicadores ambientales y energéticos para la producción de HV en Uruguay. Estos indicadores incluyen aspectos relacionados con el potencial energético, las emisiones de GEI, consumo de agua y los desafíos tecnológicos asociados.

Producción de HV y energía requerida

Uruguay presenta un notable potencial para la generación de HV mediante el aprovechamiento de excedentes energéticos de fuentes renovables. Según Nadaleti et al. (2021), las plantas hidroeléctricas desaprovechan $2,60 \times 10^{18}$ J de energía hidráulica anualmente, lo que podría transformarse en hasta $2,19 \times 10^{10}$ kg de HV al año, especialmente en la central hidroeléctrica de Salto

Grande. Asimismo, Antúnez et al. (2023) estiman que el país puede producir entre 2 350 y 2 500 toneladas de hidrógeno anuales a partir de excedentes eólicos, y entre 13 000 y 14 000 toneladas utilizando energía hidroeléctrica excedente. Estos resultados destacan el rol estratégico de Uruguay en la transición hacia una matriz energética sostenible, aunque es necesario desarrollar infraestructura avanzada como electrolizadores PEM, que presentan un consumo energético de 55 kWh por kg de H₂ producido.

Emisiones de GEI

El consumo de combustibles fósiles sigue siendo una fuente significativa de emisiones de CO₂ en Uruguay, como señala Antúnez et al. (2023), representando el 78 % de la matriz energética global. Con concentraciones de CO₂ que superan las 400 ppm, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) insiste la urgencia de reducir las emisiones en un 45% para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono en 2050. En este contexto, la producción de HV puede desempeñar un papel importante, reemplazando combustibles fósiles en sectores estratégicos como transporte e industria, y contribuyendo así a los compromisos climáticos internacionales.

Consumo de agua

El desperdicio de agua en plantas hidroeléctricas en Uruguay alcanza un promedio anual de $9,59 \times 10^{12}$ m³ (Nadaleti et al., 2021), lo que representa una oportunidad significativa para reutilizar este recurso en la producción de HV mediante electrólisis. Además, Antúnez et al. (2023) destacan que Uruguay cuenta con condiciones favorables, como una precipitación promedio de 1 320 mm al año y abundante disponibilidad de agua dulce, lo que fortalece su capacidad para la producción sostenible de H₂. Tecnologías como la electrólisis PEM son esenciales para maximizar la eficiencia y minimizar la huella hídrica en este proceso.

Desafíos tecnológicos

A pesar de los avances, persisten desafíos asociados a la implementación de tecnologías avanzadas y la integración de estas en la matriz energética nacional. Antúnez et al. (2023) señalan la necesidad de políticas públicas que promuevan la inversión en electrolizadores PEM y otros equipos necesarios para la producción de HV. Asimismo, la creación de un mercado competitivo para el H₂, tanto a nivel local como internacional, es fundamental para consolidar a Uruguay como un actor clave en el mercado de energías limpias.

En conclusión, los datos analizados muestran que Uruguay tiene las condiciones para convertirse en un referente en la producción de HV en América del Sur. Sin embargo, el éxito de esta transición energética dependerá de superar los desafíos tecnológicos y económicos, como señalan Nadaleti et al. (2021) y Antúnez et al. (2023), y de implementar políticas efectivas que promuevan la sostenibilidad y la competitividad en el sector.

4.1.10. Costa Rica

se analiza el potencial de Costa Rica para la producción de HV, los requerimientos energéticos necesarios para su desarrollo, su impacto en la reducción de emisiones y los desafíos en la gestión de recursos hídricos.

Producción de HV y Energía Requerida

Costa Rica, con una matriz eléctrica 98% renovable y un potencial de 244 TWh anuales de energía hidroeléctrica, solar, eólica y geotérmica, se proyecta como líder en producción de HV. Para 2050, podría generar hasta 5,2 millones de toneladas anuales, aprovechando su excedente energético. No obstante, la electrólisis demanda entre 50 y 60 kWh/kg-H₂, lo que requiere ampliar la capacidad renovable para evitar impactos en la red eléctrica. Su desarrollo dependerá de una expansión estratégica de infraestructura energética (Jiménez y Zheng, 2024).

Reducción de Emisiones de GEI

El uso de HV podría reducir hasta un 87% las emisiones de CO₂ en los sectores de transporte y energía para 2050, impulsando la movilidad eléctrica y otras tecnologías de cero emisiones. Además, se proyecta una disminución del 25% en la demanda de energía primaria, lo que reduciría significativamente la intensidad de carbono en comparación con un escenario sin intervención. Para lograrlo, será necesario instalar 4.4 GW adicionales, ya que la producción de hidrógeno mediante electrólisis requiere un suministro estable y abundante de electricidad limpia para evitar impactos en la red y garantizar su sostenibilidad (Godínez-Zamora et al., 2020).

El HV es una solución clave para sectores difíciles de electrificar, como la industria del cemento y el transporte de carga pesada, responsables de una parte significativa de las emisiones del país. En este sentido, el proyecto impulsado por la GIZ y la Mitigation Action Facility (MAF) busca establecer hubs de hidrógeno que agrupen iniciativas de producción, almacenamiento y certificación para reducir al máximo las emisiones en estos sectores estratégicos (H2LAC-Costa Rica, 2024).

Consumo de Agua en la Producción de HV

El consumo de agua es crucial en la producción de HV, ya que el proceso de electrólisis requiere 9 litros por kilogramo de hidrógeno. Esto supone un desafío en la gestión sostenible del agua, especialmente en regiones afectadas por fenómenos climáticos extremos. Aunque Costa Rica tiene una matriz hídrica robusta, la producción de HV debe optimizar el uso del agua y minimizar su impacto ambiental (Jiménez y Zheng, 2024).

Para garantizar su sostenibilidad, el gobierno y la cooperación internacional destacan la importancia de fortalecer capacidades técnicas e institucionales para regular y gestionar el recurso hídrico. Esto implica evaluar los impactos ambientales, incorporar tecnologías para la reutilización del agua y adoptar estándares de certificación que aseguren el cumplimiento de criterios de sostenibilidad a nivel internacional (H2LAC-Costa Rica, 2024).

4.1.11. Honduras

El HV es una tecnología emergente con un papel clave en la transición energética global, especialmente en la reducción de emisiones y la descarbonización de sectores industriales y de transporte (IRENA-Honduras, 2023). En línea con estos objetivos, Honduras ha comenzado a evaluar su potencial dentro de su estrategia de diversificación energética y reducción de la dependencia de los combustibles fósiles (Secretaría de Estado en el Despacho de Energía de Honduras, 2021). A continuación, se analizan las estrategias del país para la implementación del HV, los desafíos que enfrenta y su impacto en la reducción de emisiones de GEI.

Estrategia para la Incorporación del HV

Según la "Hoja de Ruta 2050", el HV forma parte de la visión energética a largo plazo del país. Aunque actualmente no se ha incorporado en la matriz energética del país, existe una clara intención de incluirlo en el futuro. La Secretaría de Energía ha enfatizado la necesidad de promover la innovación y desarrollar políticas públicas que faciliten su integración junto con otras tecnologías sostenibles como la electromovilidad y los biocombustibles (Secretaría de Estado en el Despacho de Energía de Honduras, 2021)

El informe de IRENA-Honduras (2023) señala que el país está explorando el potencial del HV como una alternativa energética viable, con una estrategia centrada en la electrólisis del agua utilizando energía solar y eólica.

Viabilidad del HV

Estudios recientes indican que la electrólisis con tecnología PEM, combinada con energías renovables, representa una opción viable para la producción de HV en el país. Su integración en plantas de cogeneración o pilas de combustible permitiría generar electricidad para sectores estratégicos como la industria, hospitales, escuelas y servicios públicos. Además, el HV se presenta como una alternativa más económica y sostenible frente a los combustibles fósiles, fortaleciendo la seguridad energética y la resiliencia ante desastres naturales (Tabora Oyuela y Silva Quiñones, 2024).

Otra posibilidad identificada es el aprovechamiento del excedente de energía renovable no utilizada, conocido como energy shedding, para la producción de hidrógeno. La implementación de plantas Power-to-Power permitiría convertir este excedente en hidrógeno, facilitando su almacenamiento y posterior uso en la generación eléctrica durante períodos de baja producción renovable (Parada et al., 2023)

Impacto en la Reducción de Emisiones de GEI

La "Hoja de Ruta 2050" estima que en 2015 Honduras contribuyó con el 0.026% de las emisiones globales, de las cuales el 41% provinieron del sector energético. Aunque las emisiones han crecido debido al aumento de la población y el desarrollo económico, el país ha avanzado en la diversificación de su matriz energética, favoreciendo fuentes más limpias y sostenibles (Secretaría de Energía de Honduras, 2021). Según Parada et al. (2023), el uso HV a partir de excedentes de energía renovable podría mitigar aproximadamente 7,9 millones de kilogramos de CO₂ anualmente, reforzando su papel en la estrategia de descarbonización del país.

Por lo tanto, Honduras se encuentra en una etapa inicial en la evaluación e incorporación del HV en su matriz energética.

4.2. Impacto ambiental en LATAM

4.2.1. Emisiones de GEI

La transición al HV en LATAM ha mostrado un impacto significativo en la reducción de GEI y CO₂, con estudios que destacan su papel en sectores como transporte, industria y energía. Aunque los valores varían según los contextos nacionales y las fuentes reemplazadas, los resultados confirman el potencial del HV en la descarbonización regional.

La **Tabla 13** presenta los promedios de reducción de emisiones de GEI y CO₂, junto con proyecciones futuras hasta 2030 y 2050, recopilados de estudios realizados en países de LATAM, resaltando avances y oportunidades de mitigación climática.

Tabla 13*Promedio de la reducción de emisiones de GEI y CO₂ en LATAM*

País	Promedio de reducción GEI	Promedio de reducción CO ₂	Proyección de reducción de GEI			Fuente
			2030	2035	2050	
Argentina	70% - 87%	10,07% - 56,5%	349 MtCO ₂ eq comparado al 2016 (27,7%)	-	-	Nadaleti et al., 2021 ; Lannuzzi et al., 2021; Muñoz et al., 2022 ; Ge Mengpin et al., 2021; Argentina Presidencia, 2021
Brasil	48% en relación con las emisiones de 2005.	40% - 97%	53% para 2030, en relación con las emisiones de 2005.	850 -1050 MtCO ₂ eq comparado al 2005 (del 59 % al 67 %)	-	Chantre et al., 2022; Cavalcanti et al., 2024 ; Silva Junior y da Silva, 2024; Ge Mengpin et al., 2021 ; Brazil's NCD, 2024 ;Climatetracker.org, 2024
Colombia	22%	-	51 %	-	-	Burdack et al., 2022; Moreno et al., 2022 ; Ge Mengpin et al., 2021; Gov.co, 2022
Chile	-	3,24 tCO ₂ /tH ₂ ; 630,9 t	95MtCO ₂ eq (14,5% respecto a 2022-2030)	-	Hasta 2 500 kt	Carvalho et al., 2023; Acosta et al., 2022; Gallegos, 2023; Ge Mengpin et al., 2021 ; RACC, 2024
Ecuador	35%	-	8% al 2035 con apoyo internacional	-	Hasta 17,67Mt/año	Posso et al., 2023; Chiriboga et al., 2023 ; República Del Ecuador, 2025 ; Ge Mengpin et al., 2021
México	23%	124,38 Mt/año ; 27%	147,52 Mt/año	-	-	Juárez Casildo et al., 2022; Cruz-Soto et al. 2022; Ge Mengpin et al., 2021
Paraguay	-	96%	-	-	-	Posso et al., 2022; Ge Mengpin et al., 2021
Perú	62,42%	496,7 kg/año	-	-	-	Caravantes et al., 2024 ; Nahui-Ortiz et al., 2021 ; Ge Mengpin et al., 2021
Uruguay	-	-	A una tasa del 1,3% anual	-	-	Republica de Uruguay, 2022

Según la **Tabla 13**, se observa una heterogeneidad en los compromisos de reducción de GEI y CO₂ entre los países de LATAM, reflejando diferencias en capacidades tecnológicas, estructuras económicas y niveles de compromiso con los acuerdos climáticos internacionales. Brasil, como principal emisor, establece una meta de reducción del 48% de GEI respecto a 2005 y del 40% al 97% de CO₂, denotando una estrategia robusta para mitigar sus impactos ambientales. Argentina plantea una reducción de entre 70% y 87% de GEI y de 10,07% a 56,5% de CO₂, alineándose con los objetivos del Acuerdo de París.

Por otro lado, Colombia y Ecuador presentan metas más conservadoras, con reducciones del 22% y 35% de GEI, posiblemente por limitaciones tecnológicas o financieras que dificultan la implementación de políticas de descarbonización. México y Perú exhiben enfoques intermedios; México reporta una reducción del 23% de GEI y 124,38 Mt/año de CO₂, mientras que Perú proyecta una disminución del 62,42% de GEI y una reducción anual de 496,7 kt de CO₂, reflejando un compromiso sostenido con la transición hacia energías renovables. Paraguay, a pesar de reportar una reducción del 96% de CO₂, no proporciona información sobre la reducción de GEI, lo que limita la evaluación de sus políticas climáticas.

La mayoría de los países concentran sus objetivos en 2030, con algunos casos extendiéndose hacia 2035 y 2050. Brasil proyecta una reducción de entre 850 y 1050 MtCO₂eq para 2035, lo que representa una disminución del 59% al 67% respecto a 2005. Chile y Ecuador establecen metas para 2050, con reducciones de hasta 2500 kt y 17,67 Mt/año, respectivamente. En contraste, Uruguay adopta estrategias de reducción gradual, con una disminución anual del 1,3% para 2030, lo que, aunque refleja compromiso, puede ser insuficiente para alcanzar los objetivos globales de mitigación del cambio climático.

La diversidad en la forma de reportar los datos dificulta la comparación entre países, subrayando la necesidad de una armonización metodológica en la región.

4.2.2. Capacidad de producción de HV en países de LATAM

El HV se ha consolidado como un componente estratégico en la transición energética en LATAM, permitiendo la diversificación de las fuentes energéticas y contribuyendo a la reducción de emisiones de carbono. Basándose en investigaciones documentales de los últimos cinco años, se han recopilado datos clave sobre la capacidad potencial de producción de HV, así como proyecciones futuras necesarias para su desarrollo. A partir de la información contenida en las Tablas 4 a 13, se calculan la capacidad de producción de HV según los requerimientos energéticos de cada país. Estos cálculos se realizan aplicando las conversiones necesarias. Tomando en cuenta que 1 MJ es equivalente a 0,2778 kWh, se elabora la **Tabla 14**, que presenta los requerimientos energéticos para la producción de 1 kg de HV en LATAM según la fuente de energía.

Tabla 14

Energía requerida en LATAM para producir 1kg de HV con diferentes fuentes energéticas

Fuente energética	Energía para producir 1kgH		Fuente
	En Megajulios (MJ)	En Kilovatio hora (kwh)	
Electrólisis del agua en una única planta	218,1	60,58	Iannuzzi et al. 2021
Electrólisis del agua en múltiples estaciones	194,4	54,00	Iannuzzi et al. 2021
Gasificación de biomasa	382,8	106,53	Iannuzzi et al. 2021
Reforma de biogás	260,7	72,42	Iannuzzi et al. 2021
Eólica	-	47,6	Armijo y Philibert 2020
Solar y eólica	-	39,5	Macedo & Peyerl, 2022
Hidroeléctrica, solar y eólica	-	59	Maciel et al. 2023
Solar y eólica	-	56,1	Nahui-Ortiz et al. 2021
Promedio		61,97	

El promedio obtenido en la **Tabla 14**, junto con las conversiones de unidades de masa (asumiendo una densidad del H₂ es de 0,08988 kg/Nm³ a

condiciones normales) y energía, se utilizará para estimar de manera aproximada la producción de HV en países con capacidad conocida de generación de energía limpia, y con esta información se elaborarán las tablas que se presentan a continuación, las cuales sintetizan datos sobre la capacidad estimada de producción de HV en distintos países de LATAM, como Argentina. A continuación, la **Tabla 15** presenta la capacidad estimada de producción de HV en países de LATAM, considerando sus fuentes de energía renovable disponibles.

Tabla 15

Capacidad de producción de HV en LATAM

País	Producción de HV (Mt/a)	Fuente de energía	Fuente
Argentina	0,04 – 3,44	Eólica - Hidroeléctrica	Correa, G. et al. 2022; P. Muñoz et al. 2022; Nadaleti et al. 2021; Malte Dorn, 2024
Brasil	0,0015 -98,53	Solar y eólica - Hidroeléctrica	Izidoro y de Oliveira, 2023; Chantre et al.,2022; Nadaleti, Gomes de Souza, et al., 2022 ; Silva Junior y da Silva, 2024; Ciotta et al., 2023
Colombia	0,033 – 11,12	Biomasa - Hidroeléctrica	Nadaleti et al., 2022; Moreno et al. 2022
Chile	2,05 – 169,93	Eólica- Solar Fotovoltaica	Carvalho et al., 2023; Acosta et al., 2022
Ecuador	0,003 - 439	Eólico – Energías renovables	Castro Verdezoto et al., 2019; Posso et al., 2023
México	9,39	Solar	Juárez-Casildo et al., 2022
Paraguay	5,32-22,5	Solar – Hidraulica	Posso et al., 2022 - Nadaleti et al. 2021
Perú	0,95 – 15,43	Solar, eólica y biomasa - Energía renovable	Caravantes et al., 2024; Celis et al., 2022
Uruguay	0,013 – 2,19	Hidroeléctrica	Nadaleti et al. 2021; Antúnez et al., 2023
Venezuela	1,32 – 2,55	Hidroeléctrica	Nadaleti et al. 2022

De la **Tabla 15** se evidencia que la capacidad de producción de HV en LATAM presenta una considerable variabilidad entre los diferentes países, reflejando tanto las diferencias en infraestructura como en el acceso a recursos energéticos renovables. La producción de HV oscila entre valores mínimos de 0,0015 Mt/a en Brasil hasta alcanzar 439 Mt/a en Ecuador, lo que denota la diversidad de condiciones y estrategias implementadas en la región.

Esta heterogeneidad en la capacidad de producción está influenciada por

factores como la disponibilidad de recursos naturales, el grado de desarrollo tecnológico y las políticas energéticas nacionales. En algunos países, la integración de energías renovables como la solar, eólica e hidroeléctrica ha permitido expandir significativamente la producción de HV, mientras que, en otros, la dependencia de fuentes tradicionales o la falta de infraestructura adecuada limita su crecimiento.

Es relevante destacar que la diversificación de fuentes energéticas juega un papel crucial en la sostenibilidad del desarrollo del HV en la región. La incorporación de biomasa, como en el caso de Perú, no solo contribuye a la reducción de emisiones de GEI, sino que también promueve la valorización de residuos locales, generando beneficios económicos y ambientales. Además, el aprovechamiento de recursos hídricos y eólicos en países con condiciones geográficas favorables refuerza la capacidad de la región para posicionarse como un actor clave en la transición hacia energías limpias.

En resumen, la producción de HV en LATAM está en pleno desarrollo, con países como Brasil y Chile liderando el camino gracias a sus amplios recursos naturales y marcos regulatorios favorables. Sin embargo, otros países también están avanzando en la adopción de tecnologías renovables, lo que sugiere un potencial de crecimiento significativo en toda la región. La diversificación de fuentes energéticas y la valorización de recursos locales son claves para un desarrollo sostenible y equitativo del HV verde en LATAM.

La **Tabla 16** muestra la capacidad de producción proyectada de HV en diversos países de América Latina. La información presentada proviene de una revisión documental de artículos científicos recientes. Es importante señalar que no se encontraron datos para algunos países como Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela en las fuentes consultadas. Esta ausencia no implica que dichos países carezcan de proyecciones o iniciativas relacionadas con el HV, sino que refleja una limitación en el alcance de la información disponible en los artículos revisados. Es posible que existan datos relevantes en otras bases de datos o publicaciones no incluidas en esta investigación.

Tabla 16*Capacidad de producción proyectada de HV en LATAM en Mt/a*

País	2025	2030	2038	2040	2050		Fuente
Argentina	-		1,36			Eólica	Malte Dorn, 2024
Brasil	-	-	-	-	-	-	-
Colombia		0,03 – 0,80		18,50	18,50 – 57.90	Biomasa , Hidroeléctrica, Eólica, Solar Fotovoltaica; Turbinas eólicas Onshore y offshore, y Residuos biomásicos procesados	Moreno et al. 2022 ; Rodríguez- Fontalvo et al., 2023;
Chile	-	0,12	-	0,79	1,85		Moreno et al., 2022
Ecuador	-	239,04 – 1024,90	-	-	1,37 - 95.84	Eólico ; Hidroeléctrico; Geotérmico y Biomasa	Juárez- Casildo et al., 2022
México	4,84	5,14	-	-	-	Solar	Castro Verdezoto et al., 2019
Paraguay	-	-	-	-	-	-	-
Perú	-	-	-	-	-	-	-
Uruguay	-	-	-	-	-	-	-
Venezuela	-	-	-	-	-	-	-

Como se observa en la **Tabla 16**, Ecuador y Colombia lideran las proyecciones de producción de HV hacia 2050, impulsados por una diversificación de fuentes renovables como la biomasa, la energía hidroeléctrica y la eólica. La ausencia de datos en algunos países podría reflejar tanto limitaciones en la disponibilidad de información como posibles brechas en la planificación o desarrollo de proyectos en estas regiones. Sin embargo, futuros estudios podrían explorar otras fuentes para obtener un panorama más completo del potencial de HV en LATAM.

4.3. Sector económico en LATAM

4.3.1. Argentina

Argentina se destaca en la transición energética global gracias a sus abundantes recursos naturales, especialmente en la Patagonia, que ofrece condiciones ideales para el desarrollo de energías renovables. Este potencial ha atraído inversiones significativas en proyectos de HV, consolidando al país como un actor clave en la producción y exportación de este vector energético sostenible (Armijo y Philibert, 2020; Dorn, 2024). La **Tabla 17** presenta un

resumen de los hallazgos económicos relacionados con el HV en Argentina, destacando aspectos como costos, inversiones y beneficios proyectados.

Tabla 17

Resumen de los hallazgos para el sector económico en Argentina

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión Extranjera Directa o Indirecta.	Argentina tiene un gran potencial para atraer inversión extranjera directa en energías renovables, especialmente en la producción de HV y amoníaco, gracias a los recursos eólicos de clase mundial en la Patagonia y costos competitivos de producción.	Armijo y Philibert et al., 2020
	En noviembre de 2021, durante la COP26, se anunció la inversión extranjera directa de 8 400 millones de USD anunciada por Fortescue para proyectos de HV en Río Negro. La inversión incluye la construcción de una planta de HV, parques eólicos en la Meseta Somuncura, una planta industrial cerca de Sierra Grande y una instalación portuaria en Playa Dorada.	Malte Dorn, 2024
Costos para producir el HV.	El costo nivelado de hidrógeno (LCOH) en la región de Patagonia Argentina es de 2,33 USD/kg. Este valor incluye los costos de producción mediante electrólisis, el costo de electricidad generada por energía eólica, los costos de infraestructura relacionados con la instalación de los electrolizadores y el parque eólico, y los costos de operación y mantenimiento. Este cálculo no incluye costos de almacenamiento, transporte ni distribución del hidrógeno.	Armijo y Philibert et al., 2020
	Costo inicial de H ₂ en 2019: 11,8 USD/kg con proyección a disminuir a la mitad en 10 años	Muñoz et al., 2022
	El costo de producción de HV es de 4,57 €/kgH ₂ , mientras que el LCOH, que incluye producción, almacenamiento y transporte, pero no distribución, asciende a 8,60 €/kgH ₂ .	Correa et al., 2022
Costos de infraestructura para producir el HV.	El costo de producción y almacenamiento de H ₂ es de 0,2263 US\$/m ³ .	Nadaleti et al. 2021
	El costo estimado de inversión inicial (CAPEX) para un electrolizador es de 600 dólares por cada kilovatio (kW) de capacidad instalada. Este equipo tiene una vida útil proyectada de 30 años.	Armijo y Philibert et al., 2020
	Una estación de recarga de hidrógeno para 100 vehículos cuesta entre 6-7 millones de USD	Muñoz et al., 2022
Costos de transporte del HV.	Almacenamiento de H ₂ en tanques: 400 USD/kg H ₂ a 60 bar	Armijo y Philibert et al., 2020
	los costos de transporte son elevados debido a compresión y almacenamiento	Muñoz et al., 2022
	El costo total de transporte del HV producido en Patagonia, desde el sitio de producción hasta Italia (incluyendo transporte terrestre al puerto argentino y transporte marítimo a Italia), asciende a 0,75 €/kgH₂ .	Correa et al., 2022

Indicador	Hallazgos	Fuente
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV	Precio del H ₂ 2 USD/kg en comparación con alternativas fósiles (1-1.5 USD/kg)	Armijo y Philibert et al., 2020
	El costo proyectado del HV, entre 10 y 14 USD/kg, es determinante para la viabilidad económica de los buses con celdas de combustible de hidrógeno (FCHEV), ya que su competitividad depende directamente de este precio.	Muñoz et al., 2022
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV	Reducción de costos por hibridación de energía solar y eólica; Oportunidades en exportación de H ₂ y NH ₃	Armijo y Philibert et al., 2020
	Se espera que el proyecto de Fortescue en Río Negro genere 15 mil empleos directos y 40 mil empleos indirectos, contribuyendo significativamente a la revitalización de la economía de una región estructuralmente débil en la Patagonia.	Malte Dorn, 2024
	El uso de HV en buses de combustión promueve la descarbonización y aporta beneficios económicos al incentivar la integración de energías renovables en la matriz energética. Esto refuerza la independencia energética, disminuye los costos relacionados con combustibles fósiles y crea oportunidades de exportación, consolidando al HV como un pilar para el desarrollo económico sostenible.	Muñoz et al., 2022
	La producción de HV en Patagonia requiere infraestructura como parques eólicos y plantas de electrólisis, generando empleos y fortaleciendo economías locales. Su exportación a mercados como Italia diversifica los ingresos del país y fomenta el crecimiento económico.	Correa et al., 2022

De la **Tabla 17** se destaca que la transición energética hacia el HV en Argentina tiene profundas implicancias económicas, sociales y tecnológicas.

Implicancias Económicas

Desde el punto de vista económico, Argentina tiene un potencial único para liderar el mercado de HV debido a sus recursos eólicos de clase mundial y costos de producción competitivos, estimados en 2,33 USD/kg en la Patagonia (Armijo y Philibert, 2020). Además, la inversión extranjera directa anunciada por Fortescue durante la COP26, que asciende a 8 400 millones de USD, acentúa el atractivo de Argentina como destino para grandes proyectos energéticos. Esta inversión incluye la construcción de infraestructura clave, como parques eólicos y plantas de HV, y promete generar 15 000 empleos directos y 40 000 indirectos, con un impacto significativo en las economías regionales de la Patagonia (Malte Dorn, 2024). Por otro lado, la exportación de HV a mercados internacionales, como Italia, también representa una oportunidad económica significativa. Sin embargo, los costos logísticos, que alcanzan los 0,75 €/kgH₂ para el transporte desde la

Patagonia hasta Europa, destacan la necesidad de optimizar las cadenas de suministro para maximizar la competitividad internacional (Correa et al., 2022).

Implicancias Sociales

En términos sociales, los proyectos de HV tienen el potencial de transformar las dinámicas económicas y sociales en ciertas regiones de la Patagonia. Según Malte Dorn (2024), el proyecto de Fortescue en Río Negro busca generar empleo y estimular el desarrollo en áreas que han enfrentado desafíos históricos debido a la falta de diversificación económica y oportunidades laborales. La creación de empleos directos e indirectos no solo mejorará las condiciones económicas locales, sino que también fomentará la cohesión social al fortalecer las economías regionales. Además, la integración del HV en el transporte público, como los autobuses con celdas de combustible, contribuye a la descarbonización y mejora de la calidad del aire, beneficiando directamente a las comunidades locales al reducir la contaminación (Muñoz et al., 2022). Estos desarrollos también refuerzan la independencia energética del país, proporcionando estabilidad frente a las fluctuaciones de los precios de los combustibles fósiles.

Implicancias Tecnológicas

En el ámbito tecnológico, Argentina está adoptando tecnologías avanzadas para la producción y manejo del HV. Los electrolizadores, con costos estimados de 600 USD/kW y una vida útil de 30 años, reflejan el compromiso del país con la adopción de soluciones tecnológicas sostenibles (Armijo & Philibert, 2020). No obstante, los desafíos persisten en el transporte y almacenamiento de H₂, como los elevados costos asociados al almacenamiento en tanques a alta presión y la compresión (Armijo & Philibert, 2020; Correa et al., 2022). Superar estas barreras requerirá inversiones en investigación y desarrollo para optimizar estas tecnologías y reducir los costos logísticos.

En conclusión, los hallazgos analizados demuestran que la transición hacia el HV en Argentina tiene el potencial de transformar el país en un líder global en energías renovables, con beneficios económicos, sociales y tecnológicos. No obstante, para consolidar este liderazgo, será esencial abordar los desafíos

actuales mediante políticas públicas que impulsen la colaboración internacional, el desarrollo tecnológico y la integración social. Así, Argentina podrá maximizar su capacidad para aprovechar el HV como un motor de desarrollo sostenible.

4.3.2. Brasil

Brasil se perfila como un actor clave en el desarrollo del HV, aprovechando su potencial para diversificar la matriz energética, reducir emisiones y generar oportunidades económicas. Con importantes inversiones nacionales y extranjeras, el país está desarrollando proyectos estratégicos como los puertos de Pecém y Açú, que refuerzan su capacidad de producción y exportación de HV.

A continuación, en la **Tabla 18**, se resumen los hallazgos más relevantes sobre el impacto económico del desarrollo del HV en Brasil. La Tabla presenta información clave relacionada con las inversiones extranjeras y nacionales, destacando los proyectos estratégicos en infraestructura, así como los beneficios económicos asociados al crecimiento del sector.

Tabla 18

Resumen de los hallazgos para el sector económico en Brasil

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión Extranjera Directa o Indirecta.	Los principales proyectos nacionales relacionados con HV en Brasil, como los puertos de Pecém (Ceará) y Açú (Río de Janeiro), están financiados por empresas extranjeras enfocadas en la exportación de hidrógeno y sus derivados.	Von Zuben et al., 2022
	La Unión Europea ha anunciado inversiones de hasta 2 000 millones de euros en Brasil para proyectos de HV incluyendo iniciativas en la región noreste.	Cavalcanti et al., 2024
Inversión nacional	Brasil realizó una inversión de 34 millones de reales brasileños (BRL), equivalentes a 6,2 millones de dólares estadounidenses (USD) en 2022, en proyectos asociados con el H ₂ y las celdas de combustible durante el período de 2013 a 2018.	Chantre et al., 2022

Indicador	Hallazgos	Fuente
Costo para producir el HV.	El costo de producción de HV es de 3,89 kJ/kJ para la configuración del parque eólico SOEC y 7,53 kJ/kJ para energía fotovoltaica SOEC.	Izidoro et al., 2023
	Se menciona que los costos de producción de HV pueden reducirse hasta un 85% debido a mejoras tecnológicas y economías de escala.	Chantre et al., 2022
	La producción de HV es significativamente más costosa que el H ₂ producido a partir de combustibles fósiles, debido al precio de la electricidad renovable y la tecnología de electrólisis.	Von Zuben et al., 2022
	Costo estimado de USD \$4–6/kg de HV usando agua limpia; los costos se reducen al usar agua residual.	M. de Araujo et al., 2024
	En el noreste de Brasil, el menor LCOH estimado fue de \$4,76/kg, cerca del puerto de Pecém, con alta velocidad de viento, agua poco profunda (49.88 m) y proximidad a los puertos (<100 km). En el sudeste y sur, los valores mínimos oscilan entre \$5 y \$6/kg, siendo en alta mar generalmente más bajos debido a menores costos de transmisión y pérdidas eléctricas, dependiendo de las condiciones locales. Basado en el informe del IEA, el LCOH para hidrógeno eólico marino podría oscilar entre \$2 y \$5/kg para 2030.	De Almeida et al., 2024
	El costo de producción de HV a partir de energía solar excedente, analizado en estados como Bahía, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte y São Paulo, varía en torno a 1,07 USD/kWh, destacando el potencial regional para desarrollar esta tecnología sostenible.	Nadaleti, Gomes de Souza, et al., 2022
	El costo de producción de HV oscila entre USD 19,4 y USD 57,9/kg, según las tecnologías empleadas y las condiciones operativas, como se observa en los casos de estudio en Bahía y Rio Grande do Norte.	Macedo y Peyerl, 2022
El Índice LCOH Brasil de Clean Energy Latin America (CELA) indica que es posible producir HV en Brasil con un coste nivelado entre 2,87 y 3,56 dólares/kg, que podría reducirse hasta 1,69 dólares/kg con optimización e incentivos, siendo competitivo frente al hidrógeno gris.	Magazine, 2023	
Costos de infraestructura para producir el HV.	Se menciona que la mejora en la tecnología en electrolizadores para la electrólisis del agua y el escalamiento de la producción de electrolizadores son esenciales para reducir los costos generales.	Von Zuben et al., 2022
	El costo del parque eólico marino es de \$1 441 725/MW. El costo de los electrolizadores PEM de 20 MW es \$1 150 000/MW. Se consideran costos adicionales para sistemas de transporte, plataformas y desalación.	De Almeida et al., 2024
	El costo de los electrolizadores modulares se estima en 2 millones USD por unidad, con una capacidad de 4,8 MW y una producción de 1000 Nm ³ /h de H ₂ . Estas unidades forman parte de plantas de electrólisis fija, cuyo costo total puede ascender a 417 millones USD para una instalación completa.	Hunt et al., 2022
	El costo estimado para la producción de HV en Brasil está en un rango de USD 2,25–7,27/kg dependiendo de la tecnología utilizada.	Cavalcanti et al., 2024
	El gasto de capital (CAPEX) de los electrolizadores se estima en un rango de USD 650 a 1100 por kilovatio eléctrico (kWe), e incluye los costos totales asociados a tanques de almacenamiento y sistemas auxiliares necesarios.	Macedo y Peyerl, 2022

Indicador	Hallazgos	Fuente
Costos de transporte del HV.	El costo de almacenamiento del H ₂ es elevado debido a que aproximadamente el 40% de su energía se pierde durante el proceso de licuefacción. Además, el transporte comúnmente requiere condiciones extremas, como altas presiones (>700 bar) o bajas temperaturas (20 K), lo que incrementa de manera significativa los costos asociados	Von Zuben et al., 2022
	El uso de barcos de electrólisis para flexibilizar la producción y transporte de H ₂ , reduciendo los costos asociados a infraestructuras fijas.	Hunt et al., 2022
	El transporte de H ₂ , especialmente a largas distancias, presenta desafíos importantes. Una de las opciones exploradas es su conversión a amoníaco para facilitar su traslado; no obstante, este proceso aún requiere mejoras para optimizar su eficiencia y reducir costos.	Cavalcanti et al., 2024
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	El precio de venta del HV estimado en el mercado está entre 0,95 y 1,95 USD/m ³ .	Nadaleti, Gomes de Souza, et al., 2022
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	La producción de HV fomenta la adopción de vehículos eléctricos con celdas de combustible (FCEV), generando oportunidades económicas mediante la instalación y operación de estaciones de producción descentralizada, lo que impulsa la generación de empleos locales.	Cordaro et al., 2024
	Además, el HV tiene el potencial de posicionar a Brasil como líder en el mercado internacional, generando ingresos a través de exportaciones y fortaleciendo la seguridad energética del país.	Ciotta et al., 2023
	El HV, producido en Pecém, Brasil, puede beneficiarse de la infraestructura portuaria e industrial existente, lo que facilita su integración en aplicaciones económicas y logísticas. Además, puede contribuir a descarbonización en sectores industriales y de transporte.	Izidoro et al., 2023
	En 2019, el mercado internacional del HV alcanzó un volumen de USD 9,97 mil millones; Brasil contribuyó con USD 446 millones en exportaciones (4,47 %) y USD 48,5 millones en importaciones (0,49 %).	Chantre et al., 2022
	El uso de HV en procesos industriales puede generar beneficios económicos al reducir las emisiones y los costos operativos a largo plazo.	Von Zuben et al., 2022
	El manejo de aguas residuales (subproducto de los procesos industriales de extracción de petróleo y gas) puede costar entre USD \$2 y \$20 por barril, dependiendo del transporte y almacenamiento. La integración del tratamiento de estas aguas con la generación de HV elimina costos asociados, como los derivados del transporte y el tratamiento independiente. Además, al utilizar las sales disueltas naturalmente presentes en las aguas residuales, se evita la necesidad de añadir electrólitos de soporte, reduciendo así la dependencia de insumos químicos externos. Este enfoque simplifica la operación y optimiza los costos generales del proceso.	M. de Araujo et al., 2024
	Se destacan beneficios como la diversificación de la matriz energética y el almacenamiento de energía excedente, posicionando al hidrógeno como una alternativa clave para la seguridad energética y la transición hacia una economía de bajas emisiones en Brasil.	Nadaleti, Gomes de Souza, et al., 2022

De la **Tabla 18** se desprende que la transición energética hacia el HV en Brasil no solo representa un cambio estratégico en su matriz energética, sino que también tiene implicancias económicas, sociales y tecnológicas que podrían transformar tanto el panorama interno como su posicionamiento global.

Implicancias Económicas

El desarrollo del HV en Brasil representa un avance significativo para la economía del país, permitiendo captar inversiones nacionales e internacionales. Por ejemplo, la Unión Europea anunció un aporte de hasta 2 000 millones de euros para proyectos de HV en regiones estratégicas como el noreste del país (Cavalcanti et al., 2024). Además, Brasil invirtió 34 millones de reales brasileños entre 2013 y 2018 para impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías relacionadas con el HV (Chantre et al., 2022). Estas inversiones son fundamentales para posicionar al país en el mercado global del HV, que en 2019 alcanzó un valor de 9,97 mil millones de dólares, con una contribución de Brasil del 4,47 % en exportaciones (Chantre et al., 2022).

En términos de costos, el LCOH en Brasil muestra valores competitivos. Según Clean Energy Latin America, la producción de HV puede oscilar entre 2,87 y 3,56 dólares por kilogramo, reduciéndose hasta 1,69 dólares con incentivos y optimización tecnológica, lo que lo hace competitivo frente al hidrógeno gris (PV Magazine LatAm, 2023) Asimismo, la integración de aguas residuales en la producción reduce costos asociados al tratamiento de agua, optimizando recursos (M. de Araujo et al., 2024).

Implicancias Sociales

La transición hacia el HV también genera oportunidades sociales importantes, como la creación de empleo a través de proyectos descentralizados de producción y exportación (Cordaro et al., 2024). En particular, la infraestructura portuaria en lugares como Pecém y Açú facilita la generación de empleos locales mientras impulsa el desarrollo de la economía regional (Izidoro et al., 2023). Adicionalmente, el fortalecimiento de la seguridad energética del país beneficia a comunidades más vulnerables al proporcionar acceso a fuentes de energía sostenibles y diversificadas (Nadaleti, Gomes de Souza, et al., 2022).

Implicancias Tecnológicas

Desde el punto de vista tecnológico, Brasil enfrenta desafíos importantes relacionados con los costos de producción, transporte e infraestructura. La optimización de electrolizadores y el escalamiento de la producción de estos dispositivos son esenciales para reducir costos generales (Von Zuben et al., 2022). Por ejemplo, el costo de los electrolizadores modulares de 4,8 MW se estima en 2 millones de dólares por unidad, lo que evidencia la necesidad de mejoras tecnológicas para hacerlos más asequibles (Hunt et al., 2022). Adicionalmente, la conversión del HV a amoníaco para facilitar su transporte a largas distancias presenta una oportunidad para superar barreras logísticas, aunque requiere avances para optimizar su eficiencia (Cavalcanti et al., 2024).

4.3.3. Colombia:

La producción de HV se perfila como una solución estratégica para enfrentar los retos de la transición energética global, posicionándose como un vector energético clave para reducir las emisiones de carbono y diversificar las matrices energéticas. En este contexto, Colombia emerge como un actor potencialmente competitivo debido a su abundancia en recursos naturales renovables, como la energía solar, eólica e hidroeléctrica, que pueden ser aprovechados para la producción sostenible de H₂.

En este marco, la **Tabla 19** sintetiza los principales hallazgos relacionados con los costos, beneficios y proyecciones económicas de la producción de HV en Colombia, destacando su impacto en el desarrollo económico y energético del país. A continuación, se presentan los datos clave que sustentan esta visión.

Tabla 19

Resumen de los hallazgos para el sector económico en Colombia

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión Extranjera Directa o Indirecta.	Se estima que la producción de HV en Colombia alcanzará hasta 9 megatoneladas por año para 2050, con una inversión proyectada que supera los 244 mil millones de dólares estadounidenses. La inversión se divide en 138 mil millones para electrólisis y 106 mil millones para biomasa.	Rodríguez-Fontalvo et al., 2023
	Los costos totales por kilogramo de HV oscilan entre 2,9 y 17,6 USD/kg, dependiendo del escenario y la tecnología utilizada.	Erazo-Cifuentes et al., 2022
	Los costos de producción pueden oscilar entre 2,05x10 ⁵ USD/kWh y 4,10x10 ⁵ USD/kWh, dependiendo de la producción diaria que varíe entre 3,39x10 ⁸ Nm ³ y 7,11x10 ⁸ Nm ³ respectivamente.	Nadaleti et al., 2022.
Costo para producir el HV.	Los LCOH son los siguientes: para energía eólica; 1,63 USD/kgH ₂ en 2030 y 1,11 USD/kgH ₂ en 2050; mientras que, para energía solar, se estiman en 3,72 USD/kgH ₂ en 2030 y 1,89 USD/kgH ₂ en 2050.	Burdack et al., 2022
	El costo del H ₂ producido a partir de reformado de gas natural es de aproximadamente 2 USD/kg, mientras que el de fuentes renovables como solar y eólica varía entre 6 y 14 USD/kg H ₂ dependiendo de los costos de electricidad y tecnología.	Moreno et al., 2022
Costos de infraestructura para producir el HV.	El costo de infraestructura incluye 857 USD/kW para paneles solares y 1325 USD/kW para turbinas eólicas.	Rodríguez-Fontalvo et al., 2023
	Los costos de infraestructura son implícitos a través de los costos de inversión en energías renovables (Capex): 1200 USD/kW para energía eólica y 440 USD/kW para energía solar en 2050.	Burdack et al., 2022
	Los costos de CAPEX para infraestructuras de energía renovable varían según el escenario y está respaldada explícitamente en el PDF de Erazo-Cifuentes. Los costos para energía eólica en 2030 oscilan entre 700 y 1000 USD/kW, dependiendo de los escenarios optimista, moderado y conservador	Erazo-Cifuentes et al., 2022
	Requerirá una inversión considerable en infraestructura para la producción y transporte de HV.	Nadaleti et al., 2022.
	Para 2030, Colombia necesita desarrollar infraestructura que permita incrementar la capacidad instalada de generación de energía renovable, proyectando aumentar la energía solar de los 146,4 MW actuales a 1,3 GW y la energía eólica de los 18,4 MW actuales a 2,6 GW.	Moreno et al., 2022
Costos de transporte del HV.	El costo de transporte de hidrógeno líquido (LH2) desde Colombia a Europa se estima en 503 USD/tonelada para 2030 y se reduce a 474 USD/tonelada para 2050, destacando la competitividad logística de Colombia en el mercado internacional.	Burdack et al., 2022
	Los costos de transporte varían según el método empleado, como hidrógeno gaseoso comprimido a 200 bar (GH200), hidrógeno gaseoso comprimido a 350 bar (GH350), hidrógeno líquido criogénico (LH2) o portadores orgánicos líquidos de hidrógeno (LOHC), oscilando entre 2,3 y 3,4 USD/kg en 2030 y entre 2,4 y 2,7 USD/kg en 2050, según la distancia recorrida y la demanda diaria.	Erazo-Cifuentes et al., 2022

Indicador	Hallazgos	Fuente
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	Los precios proyectados para la producción de HV en Colombia son de 1,5 y 1,02 USD/kgH ₂ en 2030 y 2050 utilizando energía eólica, y de 3,24 y 1,65 USD/kgH ₂ en los mismos años con energía solar. Esto posiciona a Colombia como un proveedor competitivo y promotor de HV para los mercados asiáticos y europeos, destacando por sus costos reducidos en producción y transporte.	Burdack et al., 2022
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	La producción de HV en Colombia tiene el potencial de generar exportaciones de hasta 7,15 Mt/año para 2050, lo que representaría el 1,2% de la demanda internacional proyectada. Además, se espera que 1,85 Mt/año se destinen a satisfacer la demanda interna, principalmente en los sectores de transporte e industria, de acuerdo con la Hoja de Ruta del Hidrógeno Nacional (NHR). Por último, el costo estimado de 31900 USD/kt de CO ₂ para el transporte y almacenamiento del carbono capturado es un componente clave en el análisis de viabilidad económica del HV, ya que permite garantizar su sostenibilidad y competitividad en los mercados internacionales.	Rodríguez-Fontalvo et al., 2023
	La producción de HV permite la diversificación económica de regiones como La Guajira y contribuye a la transición energética del país.	Burdack et al., 2022
	Se espera que el H ₂ verde permita diversificar la matriz energética y crear oportunidades para exportación hacia mercados internacionales	Moreno et al., 2022

De la **Tabla 19** se desprende que la producción de HV en Colombia tiene un impacto significativo en diversas dimensiones. Este recurso se posiciona como un elemento clave para la transformación económica, social y tecnológica del país, ofreciendo oportunidades para diversificar la matriz energética, fortalecer la competitividad internacional y promover el desarrollo sostenible.

Implicancias económicas

La implementación de proyectos de HV en Colombia representa un impacto económico significativo, no solo por el volumen de inversión proyectado, sino también por las oportunidades de diversificación económica y competitividad internacional. Según Rodríguez-Fontalvo et al. (2023), se estima una inversión superior a los 244 mil millones de dólares estadounidenses para alcanzar una producción anual de 9 Mt de HV para 2050, con un enfoque en tecnologías de electrólisis (138 mil millones USD) y biomasa (106 mil millones USD). Este nivel de inversión no solo evidencia la magnitud del compromiso necesario, sino también el potencial del HV para posicionar a Colombia como un actor estratégico en mercados internacionales, con exportaciones proyectadas de

7,15 Mt/año, lo que equivale al 1,2 % de la demanda global (Rodríguez-Fontalvo et al., 2023).

Por otro lado, Moreno et al. (2022) destacan que el desarrollo de infraestructura para incrementar la capacidad de generación renovable, desde 146,4 MW a 1,3 GW para solar y de 18,4 MW a 2,6 GW para eólica, es esencial para garantizar la competitividad en los mercados internacionales. Estos esfuerzos refuerzan la proyección de costos competitivos en la producción de HV, con precios estimados entre 1,5 y 1,02 USD/kg para energía eólica y entre 3,24 y 1,65 USD/kg para energía solar en 2030 y 2050, respectivamente (Burdack et al., 2022).

Implicancias sociales

El desarrollo del HV también tiene el potencial de generar beneficios sociales significativos, especialmente en regiones como La Guajira, donde la producción de HV puede diversificar la economía y generar empleos en sectores estratégicos. Burdack et al. (2022) resaltan que este tipo de proyectos contribuyen a la transición energética y al desarrollo de comunidades históricamente marginadas al promover infraestructuras que integren energía renovable y tecnología avanzada.

Además, la producción de HV fomenta la inclusión de comunidades en actividades económicas sostenibles, aumentando su participación en cadenas de valor internacionales y mitigando desigualdades estructurales. Las inversiones proyectadas, junto con la creación de políticas inclusivas, pueden transformar regiones rurales en polos de desarrollo tecnológico y energético.

Implicancias tecnológicas

Desde el punto de vista tecnológico, el desarrollo del HV implica un avance en la implementación de tecnologías innovadoras, como sistemas de electrólisis y almacenamiento de energía renovable. Según Nadaleti et al. (2022), la inversión en infraestructura es esencial no solo para la producción, sino también para el transporte y almacenamiento eficiente de hidrógeno. Esto incluye costos relacionados con el desarrollo de paneles solares (857 USD/kW) y turbinas eólicas (1,325 USD/kW), que son esenciales para garantizar la sostenibilidad de la cadena de suministro (Rodríguez-Fontalvo et

al., 2023).

Además, las proyecciones de costos operativos del HV, que oscilan entre 2,9 y 17,6 USD/kg dependiendo de la tecnología (Erazo-Cifuentes et al., 2022), subrayan la necesidad de desarrollar sistemas más eficientes y accesibles. Las inversiones en investigación y desarrollo (I+D) en energías renovables y tecnologías de captura y almacenamiento de carbono son determinantes para garantizar la competitividad tecnológica de Colombia frente a otros actores globales.

Por lo tanto, la información de la **Tabla 27** refleja un escenario prometedor para el desarrollo del HV en Colombia, con implicancias económicas, sociales y tecnológicas de gran alcance. Si bien los retos son significativos, como la magnitud de las inversiones y la necesidad de un marco regulatorio robusto, el potencial de este sector para transformar la economía nacional, promover la inclusión social y consolidar la innovación tecnológica es indiscutible. Estas iniciativas no solo contribuirán a la transición energética del país, sino que también lo posicionarán como un líder regional en la producción de H₂.

4.3.4. Chile

Chile presenta un potencial económico notable para destacarse como exportador líder de HV. Con más de 3000 horas de sol y una precipitación anual de menos de 2 mm en áreas como el Desierto de Atacama; además, el país se encuentra en una posición privilegiada para la producción de HV mediante energía solar. Los objetivos gubernamentales, reflejados en la Estrategia Nacional de HV y el plan para alcanzar una capacidad de electrólisis de 5 GW para 2025, evidencian el compromiso de la transición hacia una economía más sostenible. Además, programas como el Programa de Energía Solar, iniciado en 2016 por la Corporación de Fomento de la Producción, han contribuido significativamente al aumento de la capacidad instalada de energía fotovoltaica en el Desierto de Atacama, lo que refuerza la competitividad del país en el mercado del HV (Lebrouhi et al., 2022).

La relevancia de Chile como líder en la producción de HV radica en su combinación única de recursos naturales, infraestructura y estrategias

nacionales que favorecen el desarrollo sostenible. Para comprender mejor las ventajas competitivas del país en este sector, se presentan en la **Tabla 20** los principales hallazgos relacionados con indicadores clave, como los costos de producción, la infraestructura necesaria y los beneficios económicos asociados. Estos datos reflejan tanto las oportunidades como los desafíos que enfrenta el país en su camino hacia la consolidación de una economía basada en energías limpias.

Tabla 20

Resumen de los hallazgos para el sector económico en Chile

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión Extranjera Directa o Indirecta.	Chile proyecta una inversión extranjera inicial de 1 000 millones de dólares a través de un "Facility" financiero, financiado principalmente por bancos de desarrollo internacionales y recursos de Corfo. Este mecanismo apoyará proyectos de producción y demanda de HV, además de infraestructura relacionada, y estará operativo a partir del segundo semestre de 2024, implementándose progresivamente entre 2025 y 2026	Ministerio de Energía de Chile, 2024
	Chile cuenta con condiciones favorables para alcanzar el rango de costos proyectado de 0,84 a 1,44 USD/kg para el LCOH del HV en 2050, según la estimación global presentada por el Consejo del Hidrógeno.	Carvalho et al., 2023
	Chile se posiciona como uno de los productores de HV más baratos del mundo, con un costo promedio estimado en 1,5 USD/kg para 2030, en comparación con 2,2 USD/kg en China y 2,6 USD/kg en Estados Unidos. Además, se proyecta que este costo en Chile continuará disminuyendo, alcanzando valores cercanos a 1,0 USD/kg para el año 2050.	Acosta et al., 2022
Costo para producir el HV.	En Chile, el costo de producción de HV a corto plazo se estima en aproximadamente 2 USD/kg, posicionándose cerca de la competitividad con las alternativas basadas en combustibles fósiles, como el reformado de metano con vapor, cuyo rango de costos oscila entre 1 y 1,5 USD/kg.	Armijo & Philibert, 2020
	El costo nivelado de hidrógeno (LCOH) oscila entre \$2,09 y \$3,28/kg H ₂ , con Taltal siendo el lugar más eficiente debido a sus recursos renovables abundantes y de alta calidad.	García G. y Oliva H., 2023
	El costo de producción de HV es 4,09 veces el costo del diésel por unidad de energía equivalente.	Masip Macía et al., 2021

Indicador	Hallazgos	Fuente
Costos de infraestructura para producir el HV.	Costos de infraestructura necesarios para la implementación de una planta de producción de HV mediante energía solar fotovoltaica, con una inversión estimada de 42,8 millones de dólares.	Carvalho et al., 2023
	inversión total para un sistema eléctrico renovable en Sudamérica, incluyendo infraestructura para HV, es de aproximadamente 601,7 mil millones de euros entre 2020 y 2050. Esta inversión cubre generadores solares, eólicos y otras tecnologías necesarias.	Galván et al., 2022
	Los costos de infraestructura para producir HV en Chile incluyen un CAPEX de US\$1000/kW para electrolizadores, US\$900/kW para energía solar y US\$1300/kW para energía eólica. En Taltal, los costos nivelados de energía (LCOE) son los más bajos, con \$26,56/MWh para solar y \$17,94/MWh para eólica, consolidando su posición estratégica para proyectos sostenibles de HV. La vida útil de los electrolizadores es de 20 años y de 25 años para los sistemas renovables.	García G. y Oliva H., 2023
	La infraestructura incluye una planta fotovoltaica y sistemas de almacenamiento en la Región de Valparaíso, Chile. En el escenario de mínima generación (junio), la planta tiene una capacidad de 1,15 MWp y un costo de \$863 949 USD. En el escenario de máxima generación (diciembre), la capacidad es de 0,55 MWp con un costo de \$411 855 USD. En el escenario de generación promedio anual, la planta tiene una capacidad de 0,71 MWp y un costo de \$530 744 USD.	Masip Macía et al., 2021
Costos de transporte del HV.	-	-
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	El precio promedio del hidrógeno en 2022, según el mercado internacional, es de 4 USD/kg.	Carvalho et al., 2023
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	Beneficios de los ingresos por créditos de carbono: US\$ 0,015 por kg de CO ₂ mitigado.	Carvalho et al., 2023
	La producción de HV genera beneficios económicos adicionales, posicionando a Chile como el más rentable en Sudamérica gracias a su excepcional potencial solar en el desierto de Atacama. En escenarios de exportación, donde entre el 10% y el 20% de la electricidad adicional se destina a su producción, los costos promedio de electricidad disminuyen entre un 4% y 5%, mientras que la capacidad instalada del sistema eléctrico aumenta hasta en un 17%, consolidando su liderazgo en esta industria.	Galván et al., 2022
	El HV en Chile representa una oportunidad estratégica para el desarrollo económico y tecnológico del país. Pues fomentará la innovación, la investigación y el conocimiento técnico, preparando al país para competir en el mercado internacional. Además, su integración en sectores como el transporte público contribuirá a la reducción de emisiones de GEI, impulsando la transición hacia una economía sostenible.	Acosta et al., 2022
	Chile cuenta con recursos de energía renovable de clase mundial, lo que le brinda un enorme potencial para posicionarse como líder en la producción y exportación de energía renovable almacenada en químicos ricos en hidrógeno. Además, el HV ofrece la ventaja de proporcionar estabilidad de precios, diferenciándose de la volatilidad característica del mercado de combustibles fósiles.	Armijo & Philibert, 2020
	La producción de HV genera importantes beneficios económicos, como la creación de empleo en las actividades de construcción, operación y mantenimiento de la planta, y la reducción del costo social del CO ₂ , estimada en 1,5 millones de USD al año, gracias a la disminución de emisiones de GEI. Además, se generarán ingresos para las arcas fiscales a través de impuestos y leyes sociales.	Gallegos, 2023

Indicador	Hallazgos	Fuente
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	La producción de HV en Chile genera beneficios económicos al evitar costos asociados a penalizaciones por emisiones, gracias a sus bajas emisiones de 1,06 a 1,57 kg CO ₂ e/kg-H ₂ , en comparación con el reformado de metano. Además, impulsa inversiones y crea empleos en el desarrollo de tecnologías renovables, como la energía solar y eólica. También fortalece la seguridad energética al reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, contribuyendo a la estabilidad económica del sector	García G. y Oliva H., 2023
	El HV genera beneficios en la reducción de emisiones de carbono, la independencia energética al usar fuentes renovables locales, la mejora de la competitividad al alinearse con normativas internacionales y el ahorro en costos frente al diésel en escenarios específicos.	Masip Macía et al., 2021

La **Tabla 20** destaca las implicancias económicas, sociales y tecnológicas relacionadas con la producción de HV en Chile. Este análisis resalta las oportunidades y desafíos que enfrenta el país al posicionarse como líder en esta industria emergente. A continuación, se discuten estas implicancias en detalle.

Implicancias económicas

Chile se posiciona como uno de los productores más competitivos de HV a nivel mundial, con costos proyectados de 1,0 USD/kg para 2050, significativamente inferiores a los de otros países como China y Estados Unidos (Acosta et al., 2022). Este escenario se debe en gran parte a las condiciones favorables de recursos renovables y a la infraestructura desarrollada en regiones como Taltal y el Desierto de Atacama (García G. y Oliva H., 2023). Adicionalmente, los ingresos por créditos de carbono y la disminución de costos eléctricos consolidan su liderazgo económico en Sudamérica (Carvalho et al., 2023; Galván et al., 2022).

Además, la producción de HV crea empleo en las fases de construcción, operación y mantenimiento de las plantas, además de contribuir a las arcas fiscales mediante impuestos y leyes sociales (Gallegos, 2023). Este impacto positivo también se refleja en la reducción del costo social del carbono y la independencia energética al disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados (García G. y Oliva H., 2023).

Implicancias sociales

El HV promueve la transición hacia una economía sostenible al reducir las emisiones de GEI. Por ejemplo, la producción chilena de HV genera entre 1,06

y 1,57 kg CO_{2e}/kg-H₂, niveles significativamente inferiores a los del reformado de metano (Masip Macía et al., 2021). Además, su integración en sectores como el transporte público fomenta mejoras en la calidad del aire y la salud pública (Acosta et al., 2022).

Asimismo, los proyectos de HV tienen el potencial de involucrar a comunidades locales, especialmente en regiones con abundantes recursos renovables. La capacitación en tecnologías renovables y la generación de empleo local fortalecen el tejido social y promueven el desarrollo regional (Galván et al., 2022).

Implicancias tecnológicas

La producción de HV impulsa la innovación tecnológica, fomentando la investigación en energías renovables y el desarrollo de electrolizadores más eficientes. Chile ha demostrado avances significativos en esta área, gracias a su Estrategia Nacional de HV y el Programa de Energía Solar (Lebrouhi et al., 2022). Estas iniciativas posicionan al país como un referente tecnológico en la industria del HV.

Del mismo modo, el desarrollo de infraestructura específica, como plantas solares y eólicas de alta capacidad, refuerza el sistema eléctrico nacional. Por ejemplo, en la Región de Valparaíso, se han implementado plantas fotovoltaicas con costos competitivos y capacidad instalada óptima para la producción de HV (Masip Macía et al., 2021).

En conclusión, Chile presenta una ventaja competitiva en la industria del HV, con implicancias económicas, sociales y tecnológicas que refuerzan su liderazgo en esta transición energética. Los esfuerzos actuales no solo destacan la sostenibilidad económica y ambiental, sino que también recalcan el papel estratégico del país en el desarrollo global del HV.

4.3.5. Ecuador

En Ecuador, los estudios revelaron que el transporte es el sector con el mayor consumo de energía en Ecuador. Según Chiriboga et al., (2023), destacan que estrategias como la eliminación progresiva de los subsidios a los precios

de los combustibles fósiles, implementada en 2019, han generado ahorros anuales significativos de alrededor de 400 millones de dólares. A continuación, en la **Tabla 21** se detallan los hallazgos más relevantes, incluyéndose los costos de producción, transporte e infraestructura del HV, además de los beneficios económicos proyectados.

Tabla 21

Resumen de los hallazgos para el sector económico en Ecuador

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión Extranjera Directa o Indirecta.	Ecuador proyecta una inversión de entre 2 605 y 24 000 millones de USD para el desarrollo de energías renovables necesarias para la producción de HV hacia 2040, y de entre 1 714 y 4 400 millones de USD para etapas previas hasta 2030, dependiendo de las tecnologías seleccionadas.	Ministerio de Energía y Minas, 2023, p.60
Costo para producir el HV.	En Ecuador, los costos nivelados de producción de HV varían entre 3,1 USD/kg para hidroeléctrica de 100 MW y más de 6 USD/kg para energía solar. Para 2030, se proyectan costos de 4,0 USD/kg con energía solar y 2,36 USD/kg con energía eólica. En 2040, estas cifras descenderán a 2.0 USD/kg y 1,71 USD/kg, respectivamente, y para 2050, llegarán a 0,89 USD/kg con energía solar y 1,27 USD/kg con energía eólica, consolidando a Ecuador como un productor competitivo en el mercado global de HV.	Ministerio de Energía y Minas, 2023, pp. 32-33
Costos de infraestructura para producir el HV.	La producción de HV en Ecuador requiere una inversión proyectada para infraestructura de electrólisis de 2 102 millones de USD hacia el año 2040.	Ministerio de Energía y Minas, 2023, p.60
Costos de transporte del HV.	Los costos estimados de transporte del hidrógeno líquido (LH ₂) se mantienen altos y constantes, alcanzando 3,142 USD/tonelada hacia Europa (Alemania, Bélgica y Países Bajos) y 3,752 USD/tonelada hacia Asia (Japón y Corea del Sur) en los años 2030, 2040 y 2050, reflejando los desafíos tecnológicos y económicos de esta forma de transporte.	Ministerio de Energía y Minas, 2023. P. 43
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	-	-
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	La producción de HV en Ecuador genera beneficios económicos al reducir la dependencia de combustibles fósiles importados y diversificar la matriz energética. Además, se estima que su uso podría evitar la emisión de 12,333 kilotoneladas de CO ₂ eq al año, principalmente en sectores como el transporte y la generación térmica, promoviendo un modelo energético más limpio y sostenible. Ecuador podría respaldar la producción de HV al aprovechar el 23,9 % de los proyectos hidroeléctricos técnicamente viables. Esto permitiría satisfacer la demanda energética de sectores estratégicos, como el transporte electrificado, y contribuir a una reducción de entre 5,46 y 17,67 millones de toneladas de CO ₂ eq para 2050, promoviendo la transición energética del país.	Posso et al., 2023 (Chiriboga et al., 2023)

De la **Tabla 21** se destaca que, la producción y desarrollo del HV en Ecuador presenta un impacto significativo en las dimensiones económica, social y tecnológica. Este enfoque no solo busca descarbonizar la matriz energética

del país, sino también posicionarlo estratégicamente en el mercado global de energías limpias.

Implicancias económicas

Ecuador proyecta una inversión significativa para el desarrollo de energías renovables y la infraestructura necesaria para la producción de HV. Hacia 2040, se estima que la inversión en electrólisis alcanzará los 2 102 millones de USD, mientras que la inversión en energías renovables oscilará entre 2605 y 24000 millones de USD, dependiendo de las tecnologías seleccionadas (Ministerio de Energía y Minas, 2023, p. 60). Estas cifras reflejan el compromiso del país por diversificar su economía y reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, con beneficios económicos adicionales como el ahorro en emisiones de carbono y la posibilidad de generar ingresos por exportación.

Implicancias sociales

El HV también impactará positivamente en la sociedad ecuatoriana. Su implementación evitará la emisión de 12 333 kilotoneladas de CO₂eq al año, contribuyendo a un modelo energético más limpio y sostenible (Posso et al., 2023). Además, Chiriboga et al. (2023) destacan que el HV podría satisfacer la demanda energética de sectores estratégicos, como el transporte electrificado, logrando una reducción de entre 5,46 y 17,67 millones de toneladas de CO₂eq para 2050. Esto no solo mejorará la calidad de vida, sino que también impulsará la creación de empleo en regiones estratégicas, fomentando la equidad social y reduciendo la vulnerabilidad de las comunidades frente al cambio climático.

Implicancias tecnológicas

El desarrollo de la infraestructura para el HV requiere una evolución tecnológica que incluye el despliegue de capacidades de generación renovable y sistemas avanzados de transporte. Los costos de transporte del hidrógeno líquido (LH₂) hacia mercados internacionales, como Europa y Asia, son actualmente altos, alcanzando 3142 USD/tonelada y 3752 USD/tonelada respectivamente (Ministerio de Energía y Minas, 2023, p. 43). Estas cifras recalcan la necesidad de innovaciones tecnológicas que permitan reducir

costos y mejorar la competitividad del HV en el mercado global. Además, el aprovechamiento del 23,9 % de los proyectos hidroeléctricos técnicamente viables en el país podría satisfacer la demanda energética de sectores estratégicos como el transporte electrificado (Chiriboga et al., 2023).

En consecuencia, las implicancias económicas, sociales y tecnológicas del HV posicionan a Ecuador en la senda de una transición energética sostenible. Sin embargo, el éxito de esta estrategia dependerá de la capacidad del país para movilizar inversiones, fomentar la investigación y desarrollo, y garantizar la inclusión social en los beneficios generados por este cambio estructural. La adopción de políticas públicas claras y la colaboración internacional serán claves para superar los desafíos asociados a esta iniciativa.

4.3.6. México

En México el potencial de H₂ solar en áreas urbanas se estima en 9,39 millones de toneladas anuales, suficiente para cubrir hasta 42,6 veces la demanda del país. Los costos nivelados de producción (LCOH) varían con las estaciones del año y según la tecnología en zonas urbanas. Los precios establecen un fundamento económico, recalcando la importancia de avances tecnológicos para impulsar la competitividad del H₂ mexicano a nivel mundial, aprovechando el extenso potencial del país (Juárez-Casildo et al., 2022)

Para entender el impacto económico de la producción de HV en México, es clave analizar diversos indicadores económicos. La **Tabla 22** resume estos datos, detallando los beneficios potenciales y oportunidades de crecimiento sostenible en el país.

Tabla 22

Resumen de los hallazgos para el sector económico en México

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión extranjera o nacional	La inversión estimada para desarrollar proyectos de HV en México supera los 20 mil millones de dólares, abarcando tanto aportaciones nacionales como internacionales. Esta cifra incluye financiamiento para 16 proyectos en diferentes etapas de desarrollo, orientados a la producción y aprovechamiento de HV.	Asociación Mexicana de Hidrógeno, 2024
Costo para producir el HV.	El costo nivelado de producción de hidrógeno (LCOH) varía entre 6,25 USD/kg para electrolizadores alcalinos y 9,50 USD/kg para tecnología PEM. Los costos de producción de HV en México podrían alinearse con las proyecciones para América Latina, estimándose un rango de 1,5-3,5 USD/kg para 2030, respaldado por el potencial renovable del país y avances tecnológicos	Juárez-Casildo et al., 2022 Asociación Mexicana de Hidrógeno, 2024
Costos de infraestructura para producir el HV.	El costo inicial de inversión en electrolizadores es de 600 USD/kW para tecnología alcalina y 1000 USD/kW para tecnología PEM. Los costos de infraestructura para la producción de HV se centran en los electrolizadores, con costos estimados entre 1 080 y 4 075 USD/kW, esenciales para generar hidrógeno a partir de la electrólisis del agua utilizando energía renovable.	Juárez-Casildo et al., 2022 Cruz-Soto et al., 2022)
Costos de transporte del HV.	-	-
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	-	-
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	La sustitución de gasolina con HV en el transporte ligero podría cubrir el 54,7% de la demanda en 2030, evitando la emisión de hasta 147,52 millones de toneladas de CO ₂ anualmente. Esto genera beneficios en reducción de emisiones de GEI y costos operativos. Los proyectos de HV en México podrían generar una capacidad instalada adicional de 3,351 MW, crear 67,701 empleos (13,581 directos y 54,120 indirectos) y aportar 2.5 mil millones de USD a la economía, equivalentes al 0.14% del PIB de 2023. Además, generarían 1.9 mil millones de USD en ingresos fiscales, fortaleciendo las finanzas públicas. Por otro lado, en el ámbito de la movilidad, se estima que el transporte público podría consumir 15,265 toneladas anuales de HV como combustible en proyectos piloto, contribuyendo a la descarbonización y al desarrollo tecnológico del sector.	Juárez-Casildo et al., 2022 Asociación Mexicana de Hidrógeno, 2024

De la **Tabla 22** se infiere que el desarrollo de proyectos de HV en México plantea implicancias significativas que abarcan los ámbitos económico, social y tecnológico, destacando su potencial transformador en la transición energética del país.

Implicancias económicas

La producción de HV representa una oportunidad clave para dinamizar la economía mexicana. La inversión estimada de 20 mil millones de dólares para financiar 16 proyectos en distintas fases de desarrollo refleja el interés tanto nacional como internacional en este sector emergente (Asociación Mexicana de Hidrógeno, 2024). Además, se proyecta una capacidad instalada adicional de 3 351 MW, lo que posiciona al país como un líder potencial en energías renovables. En términos de impacto fiscal, los proyectos de HV podrían generar 1,9 mil millones de USD en ingresos fiscales, fortaleciendo las finanzas públicas y apoyando políticas de desarrollo sostenible. Por otra parte, la sustitución de gasolina con HV en vehículos ligeros podría reducir los costos operativos y evitar hasta 147,52 millones de toneladas de CO₂ anuales, contribuyendo a una economía más eficiente y sustentable (Juárez-Casildo et al., 2022).

Implicancias sociales

El HV también tiene un impacto significativo en el ámbito social, particularmente en la generación de empleo y desarrollo comunitario. Se estima la creación de 67 701 empleos (13 581 directos y 54 120 indirectos), lo que representa una oportunidad para capacitar a la fuerza laboral en tecnologías limpias y generar nuevas fuentes de ingreso (Asociación Mexicana de Hidrógeno, 2024). Asimismo, la integración del HV en el transporte público y privado contribuirá a mejorar la calidad de vida al reducir las emisiones contaminantes en áreas urbanas, promoviendo ciudades más limpias y saludables.

Implicancias tecnológicas

El desarrollo de infraestructura para la producción de HV resalta la necesidad de innovaciones tecnológicas. Los costos actuales de producción, que varían entre 6,25 y 9,50 USD/kg, dependiendo de la tecnología utilizada, como electrolizadores alcalinos o PEM, son un desafío importante (Juárez-Casildo et al., 2022). No obstante, las proyecciones para 2030 indican una reducción a 1,5 - 3,5 USD/kg, gracias a avances tecnológicos y el aprovechamiento de los abundantes recursos renovables de México (Asociación Mexicana de

Hidrógeno, 2024). Además, la infraestructura necesaria, con costos iniciales de entre 600 y 1 000 USD/kW, recalca la importancia de la inversión en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia y escalabilidad de las tecnologías de electrólisis (Cruz-Soto et al., 2022).

En conclusión, el HV tiene el potencial de generar un impacto positivo en la economía, la sociedad y la tecnología en México. Si bien enfrenta retos importantes en términos de costos y desarrollo de infraestructura, las proyecciones de beneficios económicos, generación de empleo y reducción de emisiones lo posicionan como una solución estratégica para avanzar hacia un modelo energético sostenible.

4.3.7. Paraguay

El sector del HV en Paraguay ha comenzado a consolidarse como una alternativa viable y estratégica para diversificar su matriz energética, fortalecer la economía y responder a la creciente demanda global de energías limpias (Resumen Ejecutivo, 2024). Este desarrollo se enmarca en un contexto de colaboración nacional e internacional, con importantes iniciativas que incluyen el apoyo de organismos internacionales y metas ambiciosas establecidas para el año 2030 (Posso et al., 2022).

A continuación, se presenta la **Tabla 23** que resume los principales hallazgos relacionados con los costos, infraestructura, inversión y beneficios asociados al HV en Paraguay, según diversas fuentes confiables.

Tabla 23*Resumen de los hallazgos para el sector económico en Paraguay*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión extranjera o nacional	La economía del H ₂ cuenta con el apoyo de iniciativas internacionales, como el proyecto de cooperación triangular entre Paraguay, Uruguay y Alemania, titulado “Energía asequible y sustentable para el Paraguay”, el cual tiene como objetivo implementar la política energética nacional relacionada con el HV.	Posso et al., 2022
	El costo estimado para producir HV en Paraguay es de \$5,74 USD por kilogramo. Este costo incluye los procesos de producción mediante electrólisis utilizando fuentes de energía renovable, así como los costos asociados con la compresión, almacenamiento y distribución del HV.	Posso et al., 2022
Costo para producir el HV.	Costo estimado para la producción y almacenamiento de HV en Paraguay de \$0,2253 USD por kilogramo. Se proyecta que el LCOH en Paraguay estará entre 1,9 y 4,8 USD/kg para el año 2025. Para 2030, se espera que disminuya a un rango de 1,5 a 3,1 USD/kg, y hacia 2050, los costos podrían reducirse aún más, oscilando entre 1,2 y 2,2 USD/kg.	Nadaleti et al., 2021 Resumen Ejecutivo, 2024
Costos de infraestructura para producir el HV.	El costo de \$500 000 USD para un electrolizador grande con capacidad de 50 000 Nm ³ /h y una pureza de 99,999% es parte del costo de infraestructura para la producción de HV.	Nadaleti et al., 2021
Costos de transporte del HV.	Los costos de distribución incluyen la compresión, almacenamiento y dispensación del hidrógeno, estimados en alrededor de \$2 USD/kg como parte del costo total del HV producido.	Posso et al., 2022
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	-	-
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	La producción de HV podría generar beneficios económicos al reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, como gasolina y diésel, disminuyendo el gasto en importaciones. Además, podría sustituir completamente la demanda de estos combustibles en 16 de los 17 departamentos, favoreciendo una economía más sostenible y creando empleos relacionados con su infraestructura. Contribución al fortalecimiento de la economía circular y reducción de impactos ambientales	Posso et al., 2022 Nadaleti et al., 2021

De la **Tabla 23** se destaca una perspectiva económica, social y tecnológica, el desarrollo del HV en Paraguay presenta implicancias significativas.

Implicancias Económicas

El HV en Paraguay tiene un alto potencial para dinamizar la economía del país, respaldado por inversiones nacionales e internacionales y costos de producción competitivos. Según el Viceministerio de Minas y Energía (2024), la *Estrategia de Hidrógeno Verde* en Paraguay impulsa proyectos estratégicos

en infraestructura, producción e investigación para consolidar un ecosistema competitivo de HV. La estrategia busca atraer inversión extranjera y fomentar asociaciones público-privadas, con el respaldo del Banco Interamericano de Desarrollo. Además, prevé la creación de hubs industriales que integren producción y uso del H₂, diversificando la economía y posicionando a Paraguay como un actor clave en la transición energética global.

En términos de costos, Paraguay destaca por su competitividad en la producción de HV. El costo estimado de producción completo, que incluye compresión, almacenamiento y distribución, es de 5,74 USD/kg (Posso et al., 2022). Asimismo, Nadaletti et al. (2021) señala un costo inicial de 0,2253 USD/kg para producción y almacenamiento bajo ciertas condiciones específicas. Estas cifras son respaldadas por el acceso a energía hidroeléctrica de bajo costo y recursos naturales renovables abundantes, lo que refuerza el atractivo económico de Paraguay para proyectos de HV.

La Estrategia Nacional también proyecta una tendencia a la baja en los costos nivelados de HV (LCOH), estimados entre 1,9 y 4,8 USD/kg para 2025, con una reducción progresiva a rangos de 1,2 a 2,2 USD/kg para 2050 (Viceministerio de Minas y Energía, 2024). Estas cifras consolidan el potencial económico del país para liderar en este sector emergente, tanto a nivel regional como global.

Implicancias sociales

La producción de HV en Paraguay presenta significativos beneficios sociales. Según Posso et al. (2022), este desarrollo tiene el potencial de reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, lo que disminuye el gasto en importaciones y permite reinvertir recursos en el desarrollo local. Además, la sustitución de combustibles fósiles en 16 de los 17 departamentos del país favorecerá una economía más sostenible y generará empleo directo e indirecto en sectores como infraestructura, operación y logística.

El Viceministerio de Minas y Energía, 2024) destaca la creación de hubs industriales en áreas estratégicas que se utilizarán para producir fertilizantes verdes y otros derivados del H₂. Estos hubs promoverán la diversificación económica, también contribuirán al desarrollo regional mediante la generación

de empleos de calidad y el fortalecimiento de capacidades locales. Estas medidas reflejan un enfoque que busca equilibrar el desarrollo económico con el bienestar social.

Implicancias tecnológicas

Desde el punto de vista tecnológico, la introducción de electrolizadores de alta capacidad, con un costo estimado de 500 000 USD para equipos de 50000 Nm³/h y pureza del 99,999 %, refleja un avance hacia la modernización del sector energético paraguayo. Este tipo de infraestructura no solo permite aprovechar al máximo los recursos renovables del país, sino que también coloca a Paraguay en una posición competitiva en la transición energética global (Nadaleti et al., 2021).

En resumen, el desarrollo del HV en Paraguay tiene el potencial de transformar múltiples sectores. Económicamente, permite diversificar ingresos y atraer inversión; socialmente, impulsa la generación de empleo y reduce la dependencia energética; y tecnológicamente, posiciona al país como un líder regional en innovación en energías limpias. Sin embargo, es crucial establecer un monitoreo continuo y políticas efectivas que aseguren que los beneficios de estas iniciativas sean distribuidos equitativamente entre toda la población.

4.3.8. Perú

La adopción del HV como vector energético en el Perú no solo refleja un compromiso hacia la sostenibilidad ambiental, sino que también plantea múltiples implicancias económicas, sociales y tecnológicas. En este sentido, la Ley N° 31992 se convierte en un catalizador para atraer inversiones, reducir costos de producción y promover la creación de empleos. A continuación, se presenta la **Tabla 24** con los principales hallazgos relacionados con los aspectos económicos de esta industria emergente, resaltando las oportunidades y desafíos identificados en el contexto peruano.

Tabla 24*Resumen de los hallazgos para el sector económico en Perú*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión extranjera o nacional	La inversión destinada a la producción de HV en Perú busca posicionar al país como un líder competitivo en esta industria. Se proyecta una inversión privada de 3 mil millones de dólares (MUSD) para el 2030, junto con más de 20 MUSD en financiamiento para impulsar proyectos clave.	IIMP, 2024
Costo para producir el HV.	Según Daniel Cámac, Perú puede producir HV a un costo estimado entre US\$ 1,6 y US\$ 2,6 por kg-H ₂ , comparable con Chile. Para el <i>Valle del Hidrógeno Verde Sur</i> , se proyecta un Coste Nivelado del Hidrógeno (LCOH) de US\$ 3 a US\$ 6/kg H ₂ en 2030, con una reducción del 40 % para 2050.	IIMP, 2024
	En Perú, se estima que estos costos comenzarán en aproximadamente 2 \$/kg para el año 2030 y se reducirán a cerca de 1.5 \$/kg para el año 2050.	Quirós-Tortós, 2024
Costos de infraestructura para producir el HV.	-	-
Costos de transporte del HV.	-	-
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	-	-
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	Cámac, señaló que el desarrollo de la industria del HV y el uso eficiente de nuestros recursos naturales podrían crear más de 20000 empleos directos para el año 2030 y alcanzar los 94 000 puestos de trabajo para el 2050 en cada Valle de H ₂ .	IIMP, 2024

De la **Tabla 24** se desprenden perspectivas económicas, sociales y tecnológicas que reflejan el impacto transformador del desarrollo del HV en el Perú, destacando implicancias significativas en cada uno de estos ámbitos.

Implicancias económicas

La producción de HV en Perú tiene el potencial de transformar significativamente la economía del país, con inversiones proyectadas que ascienden a 3 mil millones de dólares para el año 2030, respaldadas por financiamiento adicional para proyectos clave (IIMP, 2024). Además, los costos estimados de producción se posicionan como competitivos a nivel regional, oscilando entre 2 y 6 USD/kg para 2030 (IIMP, 2024; Quirós-Tortós, 2024) y reduciéndose a cerca de 1,5 USD/kg para 2050, gracias a avances

tecnológicos y economías de escala (Quirós-Tortós, 2024). Este escenario sitúa a Perú como un país estratégico en la industria del HV, con capacidad para atraer tanto inversión nacional como extranjera y generar beneficios económicos adicionales.

Implicancias sociales

El desarrollo de la industria del HV promete impactos sociales significativos, especialmente en términos de empleo. Se estima la creación de más de 20,000 empleos directos para 2030, aumentando a 94,000 puestos de trabajo para 2050, impulsados por el establecimiento de valles de hidrógeno en regiones clave (IIMP, 2024). Este crecimiento laboral no solo mejorará las condiciones de vida de las comunidades involucradas, sino que también fomentará la formación de talento especializado en tecnologías sostenibles.

Implicancias tecnológicas

La reducción proyectada de hasta el 40 % en el LCOH hacia 2050 (IIMP, 2024) destaca la importancia de la innovación tecnológica. La adopción de tecnologías avanzadas para la producción, almacenamiento y distribución será fundamental para garantizar la eficiencia y sostenibilidad del HV. Estos avances permitirán optimizar procesos y reducir costos, consolidando el papel de Perú en la exportación de energía limpia. No obstante, para maximizar este potencial tecnológico, será necesario superar barreras como la falta de infraestructura adecuada y asegurar un entorno político estable que fomente inversiones sostenibles.

4.3.9. Uruguay

Uruguay está en una posición privilegiada para desarrollar una economía basada en el HV, complementando su destacado avance en la transición energética. El HV se perfila como un vector clave para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado, la industria y la aviación. A continuación, la **Tabla 25** resume los principales hallazgos relacionados con el impacto económico del desarrollo del HV en Uruguay, abarcando aspectos como la inversión, los costos de producción e infraestructura, y las proyecciones de mercado.

Tabla 25*Resumen de los hallazgos para el sector económico en Uruguay*

Indicador	Hallazgos	Fuente
Inversión extranjera o nacional	La producción de HV en Uruguay requiere una inversión proyectada de 18 mil millones de dólares hasta 2040, que combinará capital extranjero y nacional. La inversión extranjera será incentivada por la estabilidad del país, acuerdos internacionales y beneficios fiscales, mientras que la nacional se fomentará a través de programas como el Fondo Sectorial de HV y otros mecanismos de apoyo gubernamental.	MIEM, 2023
Costo para producir el HV.	El costo nivelado de producción (LCOH) es de 4 USD/kg con excedentes hidroeléctricos y 6 USD/kg con excedentes eólicos. El costo de producir y almacenar un kilogramo de HV en Uruguay es de 0,2499 USD/kg	Antúnez et al., 2023 Nadaleti et al., 2021
Costos de infraestructura para producir el HV.	Los costos de infraestructura para producir HV en Uruguay incluyen la instalación de 18 GW de capacidad renovable y 9 GW de electrolizadores.	MIEM, 2023
Costos de transporte del HV.	Los costos del almacenamiento y transporte mediante gasoductos, estimados entre 0,3 y 0,5 USD/kgH ₂ .	MIEM, 2023
Precios y tarifas de mercado para la venta del HV.	Para lograr una recuperación de la inversión en 10 años, el precio mínimo de venta es de 7 USD/kg para electrolizadores alcalinos (ALK) con excedentes hidroeléctricos y de 10.5 USD/kg con excedentes eólicos. Precios entre 10.5 y 12 USD/kg también permiten este periodo de amortización según la capacidad instalada.	Antúnez et al., 2023
Beneficios económicos adicionales que se obtiene por la producción del HV.	El HV puede ser utilizado como insumo en la industria química para producir amoníaco, metanol y biocombustibles. La producción de HV generará importantes beneficios. Para 2040, se espera una facturación anual de 1 900 millones de dólares (2% del Producto Interno Bruto (PIB) proyectado), la creación de 30 mil empleos calificados y la reducción de 6 millones de toneladas de CO ₂ , equivalente a las emisiones netas actuales, contribuyendo a la neutralidad de carbono.	Antúnez et al., 2023 MIEM, 2023

A partir de los datos de la **Tabla 25**, se deduce que la producción de HV en Uruguay es una oportunidad estratégica con impactos económicos, sociales y tecnológicos. Este proyecto aprovecha los recursos naturales y la infraestructura renovable del país, generando transformaciones en diversas áreas. A continuación, se analizan sus implicancias principales.

Implicancias Económicas

La producción de HV en Uruguay requerirá una inversión proyectada de 18 mil millones de dólares hasta 2040, con capital extranjero y nacional. Se

espera una facturación anual de 1900 millones de dólares para 2040, equivalente al 2 % del PIB, impulsando el crecimiento económico (MIEM, 2023). Además, el precio de mercado, entre 7 y 10,5 USD/kg, asegura la amortización de las inversiones en 10 años, posicionando al HV como un motor de diversificación económica y atracción de inversiones (Antúnez et al., 2023).

Implicancias Sociales

La producción de HV creará 30 mil empleos calificados para 2040, fortaleciendo el mercado laboral en áreas tecnológicas avanzadas (MIEM, 2023). Esto fomentará el desarrollo de capital humano, la inclusión y la reducción de desigualdades. Además, programas como el Fondo Sectorial de HV incentivarán la participación de actores locales, ampliando los beneficios sociales e impulsando el crecimiento de la industria nacional (MIEM, 2023).

Implicancias Tecnológicas

Uruguay aprovechará su experiencia en energías renovables para integrar tecnologías avanzadas en la producción de HV, con 18 GW de capacidad renovable y 9 GW de electrolizadores previstos (MIEM, 2023). Además, el HV se aplicará en la industria química para producir amoníaco, metanol y biocombustibles, fomentando la innovación y posicionando al país como líder regional en soluciones tecnológicas sostenibles (Antúnez et al., 2023).

En consecuencia, la producción de HV en Uruguay consolidará su liderazgo en la transición energética global. Con beneficios económicos, sociales y tecnológicos, esta industria diversificará la economía, generará empleo calificado y desarrollará capacidades tecnológicas. Además, contribuirá a la descarbonización de sectores clave y fortalecerá la posición de Uruguay en los mercados internacionales de energía sostenible, impulsando su desarrollo económico y social alineado con los objetivos de sostenibilidad al 2050.

4.3.10. Venezuela

Según Nadaleti et al. (2022), Venezuela tiene un gran potencial para la producción de HV gracias a su abundante capacidad hidroeléctrica, con plantas como Guri y Caruachi que podrían aprovechar el excedente de

energía para procesos de electrólisis. Con un costo estimado de producción y almacenamiento de 0.2239 USD/kg, el HV resulta competitivo a nivel regional. Sin embargo, este potencial enfrenta desafíos estructurales significativos, como el deterioro de la infraestructura energética, la falta de inversión en tecnología y una alta dependencia de los combustibles fósiles, junto con la inestabilidad política y económica que dificulta atraer inversiones necesarias. A partir de este contexto, diversificar la matriz energética podría reducir la vulnerabilidad del país a los shocks petroleros y contribuir a su sostenibilidad económica y ambiental. No obstante, este avance dependerá de la capacidad de superar los desafíos mencionados e implementar políticas efectivas que incentiven inversiones nacionales e internacionales.

4.3.11. Costa Rica

La producción de HV en Costa Rica representa una **oportunidad estratégica** para dinamizar la economía, generar empleo y atraer inversión extranjera. Aunque los costos iniciales son elevados, los beneficios netos en términos de ahorro energético, reducción de emisiones y crecimiento económico justifican su implementación (Godínez-Zamora et al., 2020; H2LAC-Costa Rica, 2024; Jiménez y Zheng, 2024).

Implicancias Económicas

Se estima que la inversión en tecnologías limpias para la descarbonización del transporte y la energía alcanzará los 26,7 mil millones de dólares para 2050, compensada por ahorros operativos de 29,7 mil millones. El beneficio total proyectado para ese año asciende a 20,6 mil millones de dólares, equivalente al 35% del PIB de Costa Rica en 2020, considerando los efectos positivos en salud, el incremento de la productividad por menor congestión y la reducción de accidentes (Godínez-Zamora et al., 2020)

Por otro lado, en Guanacaste, la producción de H₂ mediante energía solar tiene un costo estimado de 49 696,75 USD para una producción diaria de 22,30 toneladas, lo que equivale a 2,23 USD por kilogramo. En el caso de la producción basada en energía eólica, el costo se estima en 14 923.19 USD para una producción diaria de 9,46 toneladas, lo que representa 1,58 USD por

kilogramo. Estos valores son comparables con los de otras regiones en proceso de descarbonización, como las Islas Canarias (Jiménez y Zheng, 2024) .

El proyecto *Hidrógeno Verde* para una Economía Descarbonizada en Costa Rica, financiado con 25 millones de euros por Mitigation Action Facility (MAF), busca impulsar inversiones mediante subsidios y créditos concesionales, además de fortalecer el marco regulatorio y la capacitación técnica, con el objetivo de consolidar el HV como una alternativa clave en la transición energética (H2LAC-Costa Rica, 2024)

Implicancias Sociales

El desarrollo del HV en Costa Rica no solo impactará la matriz energética, sino que también generará oportunidades laborales y transformará sectores productivos. identifica la creación de empleo formal como uno de los efectos positivos de la transición energética en LATAM, promoviendo el crecimiento económico sostenible a través de la expansión de sectores tecnológicos y la capacitación de la fuerza laboral (Hwang, 2024)

Implicancias Tecnológicas

El desarrollo del HV en Costa Rica requiere avances tecnológicos para mejorar la eficiencia de producción, almacenamiento y distribución. Los costos de H₂ comprimido alcanzan los \$12 por kg, mientras que la licuefacción asciende a \$18 por kg, con costos operativos adicionales de \$2 por kg, lo que resalta la necesidad de mejorar la infraestructura de almacenamiento y transporte. Asimismo, el análisis de NPV confirma la viabilidad de proyectos renovables del país, donde en Guanacaste, la energía eólica marina alcanza un NPV a 10 años de 2 320,24 USD, mientras que la eólica terrestre presenta un NPV de 1 519,42 USD, comparable a proyectos en Chile. De igual forma, los proyectos de energía solar fotovoltaica en Puntarenas y San José muestran NPVs de 835,18 USD y 1 298,32 USD, respectivamente, beneficiándose de altos niveles de irradiación solar (Jiménez & Zheng, 2024)

4.4. Impacto económico en LATAM

Para comprender el impacto económico de la transición hacia la producción de HV en LATAM, es importante examinar los hallazgos específicos en una variedad de indicadores económicos. Por ello, al comparar los países estudiados en términos de su producción de HV y su impacto económico, se pueden abordar las siguientes discusiones tanto positivas como negativas:

4.4.1. Inversión extranjera o Nacional para producir HV

La producción de HV en LATAM presenta un panorama prometedor para la región, caracterizado por la confluencia de recursos naturales, políticas favorables y una creciente demanda global de energías limpias. Sin embargo, los enfoques y niveles de inversión varían significativamente entre los países, influenciados por sus capacidades internas, estabilidad económica y estrategias de desarrollo energético.

Inversión extranjera directa

En países como Argentina, Chile y Brasil, la inversión extranjera directa (IED) desempeña un papel clave en el desarrollo de proyectos de HV. Argentina, con sus vientos de alta velocidad en la Patagonia, ha captado una IED significativa, destacándose los 8 400 millones de USD comprometidos por Fortescue para infraestructura clave, incluyendo una planta de HV, parques eólicos y una instalación portuaria (Dorn, 2024; Armijo y Philibert, 2020). Este potencial eólico, con factores de capacidad superiores al 60 %, se combina con la energía solar en el norte del país, lo que permite reducir costos de producción y posicionar al hidrógeno como una alternativa competitiva en el mercado internacional (Armijo y Philibert, 2020). Además, colaboraciones como el estudio de prefactibilidad del Instituto Fraunhofer en Río Negro y políticas provinciales que declaran proyectos de HV como de interés público refuerzan la atracción de inversión y el posicionamiento de Argentina en la economía verde de Sudamérica (Dorn, 2024).

De manera similar, Chile ha captado recursos internacionales a través de mecanismos financieros innovadores, como el facility de mil millones de USD, financiado por bancos de desarrollo internacionales y recursos de Corfo, cuyo despliegue comenzará en 2024 (Ministerio de Energía de Chile, 2024). Su excepcional potencial en energías renovables, con recursos solares en el Desierto de Atacama y vientos de alta calidad en la región de Magallanes, lo convierten en un destino atractivo para la producción de HV. Además, su estabilidad política y compromiso con la carbono-neutralidad para 2050, respaldado por políticas regulatorias, garantizan seguridad para los inversores internacionales y un marco favorable para el desarrollo energético sostenible (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Brasil, por su parte, ha recibido un flujo constante de capital extranjero en proyectos portuarios estratégicos, como Pecém y Açú, diseñados para la exportación de H₂ y derivados, lo que refuerza su papel en la creciente demanda global de HV, especialmente en Europa (Von Zuben et al., 2022). Su diversidad de fuentes de energía renovable —viento, solar y biomasa— junto con su vasta extensión territorial favorecen tanto la producción para el mercado local como la exportación a gran escala (Von Zuben et al., 2022). Además, la Unión Europea ha comprometido hasta 2 mil millones de euros en inversiones en la región noreste del país, consolidando a Brasil como un líder emergente en el sector energético sostenible (Cavalcanti et al., 2024).

Estos casos muestran cómo la IED en la región responde a la combinación de recursos naturales estratégicos, incentivos financieros y marcos regulatorios sólidos, posicionando a América Latina como un actor clave en la transición energética global.

Inversiones Nacionales

Aunque la Inversión Extranjera Directa lidera en algunos países, la inversión nacional juega un rol clave en la consolidación de la industria del HV en LATAM. Uruguay y México han adoptado enfoques híbridos. En Uruguay, la inversión proyectada de 18 mil millones de USD hasta 2040 incluye programas como el Fondo Sectorial de HV, que incentiva la participación local mediante

beneficios fiscales y el aprovechamiento de su infraestructura logística, como el puerto de Montevideo (MIEM, 2023).

En México, la inversión nacional supera los 20 mil millones de USD, con una fuerte presencia de actores locales en el desarrollo inicial del sector. Este enfoque busca superar barreras como la falta de infraestructura avanzada y marcos regulatorios específicos, mientras se capitaliza el vasto potencial de recursos solares y eólicos. Programas de cooperación internacional e incentivos fiscales refuerzan la competitividad del país en el sector energético renovable (Asociación Mexicana de Hidrógeno, 2024).

En Perú, la combinación de inversiones nacionales y extranjeras impulsa su posicionamiento como un jugador emergente en la industria del HV. Con una inversión privada proyectada de 3 mil millones de USD para 2030 y más de 20 millones de USD en financiamiento clave, el país apuesta por su matriz renovable diversificada —hidroeléctrica, solar y eólica— para fortalecer su orientación exportadora (IIMP, 2024).

Colombia, por su parte, planea alcanzar una producción de 9 megatoneladas de HV para 2050, lo que requiere inversiones superiores a 244 mil millones de USD, priorizando proyectos de electrólisis y biomasa. Sus proyectos piloto nacionales buscan fortalecer las capacidades internas y reducir la dependencia de capital extranjero, diversificando la matriz energética (Rodríguez-Fontalvo et al., 2023).

En conclusión, la producción de HV en LATAM representa una oportunidad transformadora. Si bien la IED es predominante en países con acceso a mercados internacionales y abundantes recursos naturales, la inversión nacional, respaldada por políticas públicas efectivas y programas de apoyo, puede acelerar el desarrollo sostenible de la industria. El reto para la región radica en equilibrar ambas fuentes de financiamiento y consolidar marcos regulatorios estables que fomenten el crecimiento económico y la inclusión social. Con esta estrategia, América Latina puede consolidarse como un proveedor líder de energías limpias y un referente en la transición energética global.

4.4.2. Costos nivelados del HV en LATAM

La **Tabla 26** sintetiza la información de las Tablas 17 a 25, proporcionando un resumen de LCOH en Latinoamérica. Estos valores se derivan de distintas tecnologías y costos asociados, reflejando la evolución y viabilidad económica del HV en cada país.

Tabla 26:

Resumen de los costos nivelados del hidrógeno en LATAM

País	LCOH (USD)	LCOH (USD) 2030	LCOH (USD) 2040	LCOH (USD) 2050	Referencia
Argentina	0,23 – 8,89	-	-	-	Correa et al., 2022 ; Armijo & Philibert, 2020 ; Nadaleti et al., 2021
Brasil	2,50 – 6,80	-	-	-	De Almeida et al., 2024; Macedo & Peyerl, 2022
Chile	2,09 – 3,28	1,5	-	0,84 – 1,44	García G. y Oliva H., 2023 ; Armijo & Philibert, 2020; Carvalho et al., 2023; Acosta et al., 2022
Colombia	0,22 – 17,6	1,63 - 3,72	-	1,11 – 1,89	Erazo Cifuentes et al., 2022; Nadaleti et al., 2022.; Moreno et al., 2022; Burdack et al., 2022
Ecuador	-	1,6 – 4,0	2,0 – 3,1	0,9 – 2,9	Ministerio de Energía y Minas, 2023
México	6,25 – 9,50	-	-	-	Juárez-Casildo et al., 2022
Paraguay	0,2253 - 5,74	1,5 - 3,1	-	1,2 - 2,2	Nadaleti et al., 2021 ; Posso et al., 2022; Resumen Ejecutivo, 2024
Perú	1,6 – 2,6	1,62 – 2,48	1,25 – 1,39	1,22 – 1,23	IIMP, 2024
Uruguay	0,2499 - 6	-	-	-	Nadaleti et al., 2021 ; Antúnez et al., 2023
Venezuela	0,2239	-	-	-	Nadaleti et al., 2021
Costa Rica	1,58 – 2,23	-	-	-	Jiménez y Zheng, 2024

La **Tabla 26** presenta un panorama amplio sobre los LCOH en diferentes países de LATAM, mostrando una gran variabilidad en los valores reportados. La Asociación Mexicana de Hidrógeno (2024) establece un rango de referencia global de 4,5 - 6,5 USD/kg, lo que permite comparar estos costos con los de la región. Sin embargo, es fundamental analizar cómo se obtuvieron estos valores, ya que algunos de los

costos más bajos provienen de los estudios de Nadaleti, quien trabaja con un modelo teórico basado en el uso de energía hidroeléctrica excedente para producir HV.

En países como Brasil, México, Costa Rica y Chile, donde los estudios no dependen exclusivamente de esta energía, los costos del HV se encuentran entre 2,5 – 9,5 USD/kg, lo que es más acorde con el mercado global. En contraste, en Colombia, Paraguay y Uruguay, donde los estudios de Nadaleti tienen mayor peso, los valores de LCOH caen a mínimos de 0,22 - 0,25 USD/kg, cifras que resultan poco realistas en un entorno comercial sin subsidios.

Si bien estos valores sugieren oportunidades para la producción de HV a bajo costo, es importante considerar que provienen de un modelo idealizado, que no incorpora completamente los costos de producción, almacenamiento y transporte, ni las barreras económicas y logísticas. Para evaluar de manera más precisa la viabilidad del H₂ en la región, se deben incluir factores como:

- Costos reales de producción y distribución.
- Disponibilidad efectiva de energía excedente.
- Factores económicos que afectan la competitividad del HV en el mercado.

Finalmente, aunque los estudios de Nadaleti son valiosos para identificar escenarios óptimos de producción, es crucial complementarlos con análisis que reflejen las condiciones reales del sector y los desafíos prácticos de implementar la economía del hidrógeno en LATAM.

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Implicancias ambientales

- 1) La reducción de GEI en LATAM muestra diferencias significativas entre países, con Brasil y Chile estableciendo metas ambiciosas, mientras que otras naciones tienen enfoques más graduales. Como se observa en la Tabla 13, la efectividad de estas iniciativas dependerá del apoyo internacional y de la implementación de políticas adecuadas para cumplir con los compromisos asumidos en el Acuerdo de París.
- 2) LATAM presenta un potencial significativo en la producción de HV, con capacidades que varían ampliamente según la disponibilidad de recursos energéticos renovables en cada país. Como se observa en la Tabla 15, Brasil y Chile destacan con las mayores capacidades proyectadas, aprovechando fuentes solar, eólica e hidroeléctrica, mientras que países como Ecuador y Colombia también muestran oportunidades de crecimiento mediante el uso de energías renovables y biomasa. A futuro, el desarrollo de infraestructura y la integración de políticas energéticas serán clave para consolidar a la región como un referente en la producción de hidrógeno sostenible.
- 3) El agua necesaria para producir HV, entre 9 y 11 litros por kilogramo de H₂, plantea desafíos en regiones con estrés hídrico, destacando la necesidad de políticas sostenibles. Chile utiliza plantas desalinizadoras para este fin, mientras Paraguay aprovecha excedentes de sus plantas hidroeléctricas, reduciendo el impacto.

Implicancias económicas

- 1) La Asociación Mexicana de Hidrógeno (2024) establece un rango de 4,5 - 6,5 USD/kg para el LCOH global, dentro del cual se encuentran Brasil, México, Costa Rica y Chile, posicionándolos como competidores viables. En cambio, Colombia, Paraguay y Uruguay presentan costos muy bajos, influenciados por modelos teóricos como los de Nadaletti, que no consideran completamente costos de infraestructura y logística. Para que LATAM aproveche su potencial en hidrógeno, es clave integrar políticas de incentivo, fortalecer la cooperación regional y desarrollar infraestructura que garantice una producción sostenible y competitiva en el mercado global.
- 2) La producción de HV en LATAM tiene un alto potencial para generar empleos gracias a sus vastos recursos renovables, inversiones millonarias y políticas públicas favorables. Argentina proyecta 15 000 empleos directos y 40 000 indirectos; México, hasta 67 701 empleos para 2030; y Perú, 20 000 para 2030 y 94 000 para 2050. Estos casos evidencian el potencial laboral y económico del sector.
- 3) La implementación del HV en el transporte urbano estimula el crecimiento de la industria local y regional, fortaleciendo la inversión y la innovación tecnológica. Países como México, Brasil y Chile destacan por sus avances en prototipos de transporte urbano y estrategias nacionales, consolidando su liderazgo en sostenibilidad y competitividad en el sector energético.

5.2. Recomendaciones

Para garantizar una implementación sostenible del HV en un escenario global sin combustibles fósiles, es necesario profundizar:

1. Impacto del vapor de agua en el clima: Evaluar si la liberación masiva de H₂O en la atmósfera puede alterar los patrones climáticos locales.
2. Gestión del recurso hídrico: Desarrollar estrategias para evitar conflictos por el uso del agua en regiones con escasez.

Estas investigaciones permitirán consolidar el HV como una fuente energética sostenible y alineada con los objetivos de descarbonización global.

3. Referencias bibliográficas

- Acosta, K., Salazar, I., Saldaña, M., Ramos, J., Navarra, A. & Toro, N. (2022). Chile and its Potential Role Among the Most Affordable Green Hydrogen Producers in the World. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.890104>
- Adekola, K., Ghafoori, S., Dechamp, F. & Prada, A. (2024). Electricity supply configurations for green hydrogen hubs: A European case study on decarbonizing urban transport. *International Journal of Hydrogen Energy*, 85, 539–559. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.08.336>
- Ajanovic, A., Glatt, A. & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. *Energy*, 235, 121340. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121340>
- Aldana Rivera, S. E. & León Peñuela, F. A. (2022). *Hidrógeno en Colombia Si se hace mal podría ser peor* (O. B.-C. Fundación Heinrich Böll, Ed.; Primera edición). Fundación Heinrich Böll. Recuperado el 18 de diciembre https://co.boell.org/sites/default/files/2023-02/hb-hidrogeno-_digital_-1.pdf
- Antúnez, J., Borché, A., Fleck, C., Mendes da Silva, M. & Hernandez, J. (2023). *Analysis of Green Hydrogen Generation Potential in Uruguay from Surplus Renewable Energies*. Recuperado el 28 de diciembre de <https://www.researchgate.net/publication/377890415>
- Anwar, J. & Ullah Khan, H. (2025). The nexus between energy security and primary energy supply: An empirical study focusing on an energy striped country. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115462>
- Aranibar, R. E. R. & Olarte, P. M. A. D. (2024). Hidrógeno verde: abriendo las puertas a un futuro energético sostenible en el Perú. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 2024(13). <https://doi.org/10.18800/KAWSAYPACHA.202401.A004>
- Argentina Presidencia. (2021). *Actualización de la meta de emisiones netas de Argentina al 2030*. Recuperado el 11 de febrero del 2025 de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-05/Actualizacio%CC%81n%20meta%20de%20emisiones%202030.pdf>
- Arispe Alburquerque, C. M., Yangali Vicente, J. S., Guerrero Bejarano, M. A.,

- Lozada de Bonilla, O. R., Acuña Gamboa, L. A. & Arellano Sacramento, C. (2020). *La investigación científica. Un aproximación para los estudios de posgrado*.
- Armijo, J. & Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541–1558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.028>
- Asamblea Nacional de Venezuela. (2022, 7. July). *Comisión de Energía evalúa incorporar uso del hidrógeno verde en la Ley de Energías Renovables y Alternativas*. Recuperado el 22 de febrero del 2025 de <https://www.asambleanacional.gob.ve/noticias/comision-de-energia-evalua-incorporar-uso-de-hidrogeno-verde-en-ley-de-energias-renovables-y-alternativas>
- Asociación Mexicana de Hidrógeno. (2024). *Estrategia Industrial de Hidrógeno Limpio de México 2024*. Recuperado el 5 de enero 2025 de https://h2mex.org/wp-content/uploads/ERM_Estrategia_de_Hidrogeno-Resumen-Ejecutivo-Distribucion-Oct-2024.pdf
- Balaji, R. K. & You, F. (2024). Sailing towards sustainability: offshore wind's green hydrogen potential for decarbonization in coastal USA. *Energy and Environmental Science*, 17(17), 6138–6156. <https://doi.org/10.1039/d4ee01460j>
- Baral, S. & Šebo, J. (2024). Techno-economic assessment of green hydrogen production integrated with hybrid and organic Rankine cycle (ORC) systems. *Heliyon*, 10(4), e25742. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E25742>
- Benfica, V. & Marques, A. C. (2024). Technological and financial development as drivers of Latin America's energy transition. *Renewable Energy*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121664>
- Bernal Torres, C. Augusto., Salavarieta, D., Sánchez Amaya, T. & Salazar, Rosalba. (2006). *Metodología de la investigación : para administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Pearson Educación.
- Brazil's NCD. (2024). *BRAZIL'S NDC National determination to contribute and transform*. https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28ND

C%29_November2024.pdf

- Caravantes, D., Carbajal, J., Celis, C. & Marcelo-Aldana, D. (2024). Estimation of hydrogen production potential from renewable resources in northern Peru. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 186–198.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.350>
- Carlos A. Franco-Salinas, C. A., Castillo-Acosta, G., Monroy-Pantaleón, M. de los A., Montaña-Contreras, O. & Villamil-Contreras, U. (2023). Combustión, combustibles y tipos de combustibles. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 10(20), 23–25.
<https://doi.org/10.29057/estr.v10i20.10738>
- Carlos Quinteros, M. A. (2020, 1. November). *El Hidrógeno como combustible verde – GEMRA PUCP*.
<http://blog.pucp.edu.pe/blog/gemrapucp/2020/11/01/el-hidrogeno-como-combustible-verde/> Accessed 14 /12/2024
- Castro Verdezoto, P. L., Vidoza, J. A. & Gallo, W. L. R. (2019). Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: Energy efficiency policies in the transportation sector. *Energy Policy*, 134, 110948.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.110948>
- Cavalcanti, M. H. C., Rodrigues Pappalardo, J., Tavares Barbosa, L., Ferreira Brasileiro, P. P., Cabral Roque, B. A., Padilha da Rocha e Silva, N. M., Fernandes da Silva, M., Converti, A., Bezerra de Menezes Barbosa, C. M. & Asfora Sarubbo, L. (2024). Hydrogen in Burners: Economic and Environmental Implications. In *Processes* (Vol. 12, Issue 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/pr12112434>
- Celis, C., Mas, R., Marcelo, D. & Bellido, M. M. H. (2022). Clean energy transition in Peru: A green hydrogen perspective. *Revista Brasileira de Energia*, 28(3).
<https://doi.org/10.47168/rbe.v28i3.782>
- Centro Nacional del Hidrógeno. (2024). *Hidrógeno*. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- Chantre, C., Andrade Eliziário, S., Pradelle, F., Católico, A. C., Branquinho Das Dores, A. M., Torres Serra, E., Campello Tucunduva, R., Botelho Pimenta Cantarino, V. & Leal Braga, S. (2022). Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception. *Sustainable Production and*

- Consumption*, 34, 26–41. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.028>
- Chatenet, M., Pollet, B. G., Dekel, D. R., Dionigi, F., Deseure, J., Millet, P., Braatz, R. D., Bazant, M. Z., Eikerling, M., Staffell, I., Balcombe, P., Shao-Horn, Y. & Schäfer, H. (2022). Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*, 51(11), 4583–4762. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>
- Chiriboga, G., Chamba, R., Garcia, A., Heredia-Fonseca, R., Montero-Calderón, C. & Carvajal C, G. (2023). Useful energy is a meaningful approach to building the decarbonization: A case of study of the Ecuadorian transport sector. *Transport Policy*, 132, 76–87. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2022.12.019>
- CIC energiGUNE. (2022, 17. May). *Métodos de producción de hidrógeno y sus colores*. Recuperado el 10 de febrero del 2025 de <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- Ciotta, M., Tassinari, C., Larizatti Zacharias, L. G., van der Zwaan, B. & Peyerl, D. (2023). Hydrogen storage in depleted offshore gas fields in Brazil: Potential and implications for energy security. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(100), 39967–39980. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.209>
- Climatetracker.org. (2024, 21. February). *Congreso brasileño discute quiere regular el mercado de carbono*. <https://climatetrackerlatam.org/historias/mercado-carbono-brasil/>
- Concha, J. R. & Gómez, O. A. (2016). Analysis of foreign direct investment to Pacific Alliance countries. *Estudios Gerenciales*, 32(141), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.11.001>
- Congreso de la Republica del Perú. (2024, 23. March). *Ley de fomento del hidrógeno verde*. Recuperado el 9 de febrero del 2025 de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-fomento-hidrogeno-verde>
- Contreras-Vásquez, L. (2022). Factibilidad de producción de Hidrógeno verde en el Ecuador. *Investigación y Desarrollo*, 16(1). <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1805>
- Cordaro, P. G., Braga, B. L., Corotti, D., Gallego, A. G. & Silveira, J. L. (2024). Electricity and hydrogen production by cogeneration system applied in a fuel

- station in Brazil: Energy analysis of a combined SOFC and ethanol steam reforming model. *Fuel*, 356. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129615>
- Cruz-Soto, J. de la, Azkona-Bedia, I., Velazquez-Limon, N. & Romero-Castanon, T. (2022). A techno-economic study for a hydrogen storage system in a microgrid located in Baja California, Mexico. Levelized cost of energy for power to gas to power scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30050–30061. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.03.026>
- Da Cui, Gu, X., Lu, C., Hua, R., Chang, X., Cheng, Y., Qian, F. & Wang, Y. (2022). Greenhouse gas emission benefits of adopting new energy vehicles in Suzhou City, China: A case study. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(50), 76286–76297. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-21284-W>
- De Almeida, J. O., Shadman, M., dos Santos Ramos, J., Bastos, I. T. C., Silva, C., Chujutalli, J. A. H., Amiri, M. M., Bergman-Fonte, C., Ferreira, G. R. L., da Silva Carreira, E., da Silva Dias, R. F., de Miranda, P. E. V. & Estefen, S. F. (2024). Techno-economic analysis of hydrogen production from offshore wind: The case of Brazil. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 322). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119109>
- Edenred México. (2022, 2. December). *Contaminación vehicular: índices, causas y cómo resarcirla*. Recuperado 10 de febrero del 2025 de <https://www.edenred.mx/blog/contaminacion-vehicular-indices-causas-y-como-resarcirla>
- Editorial RS y S. (2022, 19. February). *Impacto Ambiental: Qué es, definición, tipos, causas, medición y ejemplo*. Recuperado de <https://responsabilidadsocial.net/impacto-ambiental-que-es-definicion-tipos-causas-medicion-y-ejemplo/>
- Edo, G. I., Itoje-akpokiniovo, L. O., Obasohan, P., Ikpekor, V. O., Samuel, P. O., Jikah, A. N., Nosu, L. C., Ekokotu, H. A., Ugbune, U., Oghroro, E. E. A., Emakpor, O. L., Ainyanbhor, I. E., Mohammed, W. A. S., Akpogheli, P. O., Owheruo, J. O. & Agbo, J. J. (2024). Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. In *Ecological Frontiers*. Ecological Society of China. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.02.014>

- Emodi, N. V., Okereke, C., Abam, F. I., Diemuodeke, O. E., Owebor, K. & Nnamani, U. A. (2022). Transport sector decarbonisation in the Global South: A systematic literature review. *Energy Strategy Reviews*, 43. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2022.100925>
- Erazo-Cifuentes, Y. A., Orejuela, J. P. & Manotas-Duque, D. F. (2022). Technoeconomic Comparison of Scenarios for the Configuration of the Renewable Hydrogen Supply Chain in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(6), 293–304. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13576>
- Espinoza, G. (2006). *Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental*.
- Euroclima. (2023, 18. May). *Paraguay presenta su Plan Maestro de Movilidad Eléctrica para el Transporte Público Urbano y Logístico*. Recuperado el 28 de diciembre de 2024 de https://www.euroclima.org/contact-9/noticia-urbano/1965-plan-maestro-movilidad-electrica-paraguay-presentacion?utm_source=chatgpt.com
- Forsberg, J. & Krook-riekkola, A. (2021). Recoupling climate change and air quality: Exploring low-emission options in urban transportation using the times-city model. *Energies*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/en14113220>
- Freire Ordóñez, D., Ordó, O., Ordóñez, O., Halfdanarson, T., Ganzer, C., Shah, N., Dowell, N. Mac, Guilí En-Gosálbez, G. & Gosálbez, G. (2022). Evaluation of the potential use of e-fuels in the European aviation sector: a comprehensive economic and environmental assessment including externalities †. *Sustainable Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1039/d2se00757f>
- Gallegos, M. A. (2023). Puerto Lirquén y su descarbonización: Aplicando medidas de mitigación basado en la reconversión de equipamiento portuario a Hidrógeno verde. *Obras y Proyectos*. <https://doi.org/10.21703/0718-281320233305>
- Galván, A., Haas, J., Moreno-Leiva, S., Carlos Osorio-Aravena, J., Nowak, W., Palma-Benke, R. & Breyer, C. (2022). Exporting sunshine: Planning South America's electricity transition with green hydrogen. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119569>

- García Bernal, N. (2021). *Industria del hidrógeno verde: costos de producción*. Autor. *Asesoría Técnica Parlamentaria*. Recuperado 19 de diciembre 2024 de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32538/1/BCN___Hidrogeno_verde_Costos_de_produccion_Sept21.pdf
- García G., M. & Oliva H., S. (2023). Technical, economic, and CO2 emissions assessment of green hydrogen production from solar/wind energy: The case of Chile. *Energy*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127981>
- Ge Mengpin, Friedrich, J. & Vigna, L. (2021). *Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector*. <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- Germescheidt, R. L., Moreira, D. E. B., Yoshimura, R. G., Gasbarro, N. P., Datti, E., dos Santos, P. L. & Bonacin, J. A. (2021). Hydrogen Environmental Benefits Depend on the Way of Production: An Overview of the Main Processes Production and Challenges by 2050. In *Advanced Energy and Sustainability Research* (Vol. 2, Issue 10). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/aesr.202100093>
- Gestión-Calidad. (2023). *ISO 14001:2015 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL (EDA)*. Recuperado el 19 de diciembre de 2024 de https://gestion-calidad.com/iso-14001-evaluacion-del-desempeno-ambiental?utm_source=chatgpt.com
- Gob.cl. (2022, 28. December). *Conozca cómo es el primer vehículo ecológico que funciona con pila de hidrógeno, que solo emite vapor de agua, y que ya fue autorizado para circular en Chile - Gob.cl*. Recuperado el 08 de enero del 2025 de <https://www.gob.cl/noticias/conozca-como-es-el-primer-vehiculo-ecologico-que funciona-con-pila-de-hidrogeno-que-solo-emite-vapor-de-agua-y-que-ya-fue-autorizado-para-circular-en-chile/>
- Gobierno Regional del Callao. (2024, 3. September). *Gobierno Regional del Callao anuncia la utilización de hidrógeno como combustible alternativo vía convenio marco con empresa privada*. Recuperado el 9 de febrero del 2025 de <https://www.gob.pe/institucion/regioncallao/noticias/1014138-gobierno-regional-del-callao-anuncia-la-utilizacion-de-hidrogeno-como-combustible-alternativo-via-convenio-marco-con-empresa-privada> ; Video: <https://we.tl/t->

hLDKncTKcY

- Godínez-Zamora, G., Victor-Gallardo, L., Angulo-Paniagua, J., Ramos, E., Howells, M., Usher, W., De León, F., Meza, A. & Quirós-Tortós, J. (2020). Decarbonising the transport and energy sectors: Technical feasibility and socioeconomic impacts in Costa Rica. *Energy Strategy Reviews*, 32, 100573. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2020.100573>
- González Velasco, J. (2009). *Energías renovables* -. Reverté. Recuperado el 11 de julio del 2022 de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bl6L8E_9t1kC&oi=fnd&pg=PA4&dq=%C2%BFQu%C3%A9+es+energ%C3%ADa+renovable%3F&ots=r9kzklVcEe&sig=IGge_2rHeZJNBikusvB5kGUrnBk#v=onepage&q=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20energ%C3%ADa%20renovable%3F&f=false
- Gov.co. (2022, 24. June). *Aprobado un plan que ayudará a obtener las metas climáticas de Colombia* -. Recuperado el 11 de febrero del 2025 de <https://www.minambiente.gov.co/aprobado-un-plan-que-ayudara-a-obtener-las-metas-climaticas-de-colombia/>
- Guo, C., Ren, X., Guo, C., Akram, N., Mansha, M. S., Ahmad, A., Khawaja, S. & Wang, J. (2024). Fabrication of CdS/Ni-MOF bifunctional catalyst for the photocatalytic hydrogen evolution coupled with benzyl alcohol's oxidation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 116181. <https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOCHEM.2024.116181>
- H2LAC-Chile. (2023, 15. November). *Chile: inauguran la primera estación de carga de hidrógeno en el país*. Recuperado el 8 de febrero del 2025 de <https://h2lac.org/noticias/chile-inauguran-la-primera-estacion-de-carga-de-hidrogeno-en-el-pais/>
- H2LAC-Colombia. (2022, 29. July). *Hevolución, el proyecto colombiano de movilidad con hidrógeno verde*. Recuperado el 9 de febrero del 2025 de <https://h2lac.org/noticias/hevolucion-el-proyecto-colombiano-de-movilidad-con-hidrogeno-verde/>
- H2LAC-Costa Rica. (2024, 28. August). *Costa Rica: aprueban proyecto de hidrógeno verde por 25 millones de euros*. Recuperado el 20 de febrero del 2025 de <https://h2lac.org/noticias/costa-rica-da-el-siguiente-salto-hacia-la-descarbonizacion-con-hidrogeno-verde/>

- H2LAC-Ecuador. (2023, 22. February). *Ecuador se suma al mundo del hidrógeno con la creación de H2 Ecuador*. Recuperado el 9 de febrero del 2025 de <https://h2lac.org/noticias/ecuador-se-suma-al-mundo-del-hidrogeno-con-la-creacion-de-h2-ecuador/>
- Halder, P., Babaie, M., Salek, F., Haque, N., Savage, R., Stevanovic, S., Bodisco, T. A. & Zare, A. (2024). Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 973–1004. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.07.204>
- Handique, A. J., Peer, R., Haas, J., Osorio-Aravena, J. C. & Reyes-Chamorro, L. (2024). Distributed hydrogen systems: A literature review. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 85, pp. 427–439). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.206>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Mc. Graw Hill Education, Ed.; Sexta).
- Hogarsense. (2023, 2. February). *El futuro de la biomasa*. Recuperado el 10 de febrero del 2025 de <https://www.hogarsense.es/calefaccion/futuro-biomasa>
- Huan, N., Yamamoto, T., Sato, H., Sala, R. & Goncalves, L. (2024). Perceptions to connections: A multidimensional investigation of hydrogen acceptance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114612>
- Hwang, Y. K. & Sánchez, D. Á. (2024). Renewable energy transition and green growth nexus in Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114431>
- Iannuzzi, L., Hilbert, J. A. & Silva Lora, E. E. (2021). Life Cycle Assessment (LCA) for use on renewable sourced hydrogen fuel cell buses vs diesel engines buses in the city of Rosario, Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29694–29705. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.065>
- Ibarra, J. J. V., Salinas, L. D. R. D. L. A., Cedeño, J. A. G. & Ibarra, G. E. M. (2024). Transporte de Hidrógeno: Energía limpia para Latinoamérica. *Reincisol.*, 3(6), 953–971. [https://doi.org/10.59282/REINCISOL.V3\(6\)953-971](https://doi.org/10.59282/REINCISOL.V3(6)953-971)
- Ibarra Sarlat, R. (2018). El impulso de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático a través de los certificados ambientales en el sector

- eléctrico mexicano. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 1(152).
<https://doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2018.152.12918>
- IEA. (2023). *World Energy Outlook Special Report Latin America Energy Outlook*.
www.iea.org/terms Accessed:08/12/2024
- IIMP. (2024, 2. February). *Perú tiene capacidad de convertirse en un competitivo exportador de hidrógeno verde - Instituto de Ingenieros de Minas del Perú*.
 Recuperado el 6 de enero del 2025 de
<https://iimp.org.pe/institucional/noticias/peru-tiene-capacidad-de-convertirse-en-un-competitivo-exportador-de-hidrogeno-verde> ;
 Video <https://www.youtube.com/watch?v=6EIKVM6ZUV8>
- Ikurowo, T., Bade, S. O., Akinmoladun, A. & Oni, B. A. (2024). The integration of wind and solar power to water electrolyzer for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 76, 75–96.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.02.139>
- IRENA. (2023). *Renewable energy statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*. www.irena.org Accessed:08/12/2024
- IRENA-Honduras. (2023). *Renewables Readiness Assessment: Honduras, International Renewable Energy (A. Dhabi. Agency, Ed.)*. www.irena.org
- ITAIPIU Binacional. (2022, 23. November). *El PTI-PY presentó proyectos de Hidrógeno Verde y Movilidad Eléctrica en Expo CREA+PY 2022*. Recuperado el 9 de febrero del 2025 de <https://www.itaipu.gov.py/es/sala-de-prensa/noticia/el-pti-py-presento-proyectos-de-hidrogeno-verde-y-movilidad-electrica-en-expo>
- Izidoro, D. L. & de Oliveira, S. (2023). Exergoeconomic assessment of green hydrogen production via high-temperature electrolysis powered by solar and wind energy. *36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2023*, 183–194. <https://doi.org/10.52202/069564-0018>
- Jiménez, A. N. & Zheng, H. (2024). Fueling Costa Rica’s green hydrogen future: A financial roadmap for global leadership. *Renewable Energy Focus*, 51.
<https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100651>
- Juárez-Casildo, Valeria., Cervantes, Ilse. & Gonzales-Huerta, R. de G. (2022). Solar hydrogen production in urban areas of Mexico: towards hydrogen cities.

- Revista Internacional de Energía de Hidrógeno*, 47(70), 30012–30026.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.137>
- Khan, U., Yamamoto, T. & Sato, H. (2021). An insight into potential early adopters of hydrogen fuel-cell vehicles in Japan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(18), 10589–10607. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.173>
- La República. (2017, 23. November). *Las 10 consecuencias ambientales que se derivan del modelo económico actual*. Recuperado el 10 de febrero del 2025 de <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/las-10-consecuencias-ambientales-que-se-derivan-del-modelo-economico-actual-2573081>
- Lao, J., Song, H., Wang, C. & Zhou, Y. (2022). Research on atmospheric pollutant and greenhouse gas emission reductions of trucks by substituting fuel oil with green hydrogen: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.02.230>
- Leañez, F. (2022). *Intensidad de materiales en la transición energética de América Latina: estimaciones sobre la base de un escenario de integración energética de América del Sur*. www.cepal.org/apps
- Lebrouhi, B. E., Djoupo, J. J., Lamrani, B., Benabdelaziz, K. & Kousksou, T. (2022). Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 47, Issue 11, pp. 7016–7048). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.076>
- Li, Y. & Taghizadeh-Hesary, F. (2022). The economic feasibility of green hydrogen and fuel cell electric vehicles for road transport in China. *Energy Policy*, 160.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112703>
- Llanos, B., Alexis, R., Cedeño, L. & Antonio, E. (2020). La generación de energía eléctrica para el desarrollo industrial en el ecuador a partir del uso de las energías renovables. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 24(104), 36–46.
<https://doi.org/10.47460/UCT.V24I104.364>
- M. de Araujo, D., Barbosa Segundo, I. D., Cardozo, J. C., Santos, J. E. L., Nascimento, J. H. O., Gondim, A. D., dos Santos, E. V. & Martínez-Huitle, C. A. (2024). Produced water electrolysis with simultaneous green H₂ generation: From wastewater to the future of the energetic industry. *Fuel*, 373.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132369>
- Macedo, S. F. & Peyerl, D. (2022). Prospects and economic feasibility analysis of

- wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(19), 10460–10473.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.133>
- Maciel, L. B. B., Viola, L., de Queiróz Lamas, W. & Silveira, J. L. (2023). Environmental studies of green hydrogen production by electrolytic process: A comparison of the use of electricity from solar PV, wind energy, and hydroelectric plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(93), 36584–36604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.334>
- Mallapragada, D. S., Gençer, E., Insinger, P., Keith, D. W. & O’Sullivan, F. M. (2020). Can Industrial-Scale Solar Hydrogen Supplied from Commodity Technologies Be Cost Competitive by 2030? *Cell Reports Physical Science*, 1(9). <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100174>
- Malte Dorn, F. (2024). ¿Descarbonización o despojo? La economía política de litio e hidrógeno verde en Argentina. *Revista de Ciencias Sociales*, 37(55). <https://doi.org/10.26489/rvs.v37i55.5>
- Marinkovic, C. & Vogt-Schilb, A. (2024). Is energy planning consistent with climate goals? Assessing future emissions from power plants in Latin America and the Caribbean. *Energy and Climate Change*, 5, 100151. <https://doi.org/10.1016/J.EGYCC.2024.100151>
- Martin Lara, M. Á. & Calero de Hoces, M. (2020). *Energía de la Biomasa y Biocombustibles* (Universal de Granada).
- Martínez-Corona, J. I., Palacios-Almón, G. E. & Oliva-Garza, D. B. (2023). Guía para la revisión y el análisis documental: propuesta desde el enfoque investigativo. *Ra Ximhai*, 67–83. <https://doi.org/10.35197/rx.19.01.2023.03.jm>
- Masip Macía, Y., Rodríguez Machuca, P., Rodríguez Soto, A. A. & Carmona Campos, R. (2021). Green hydrogen value chain in the sustainability for port operations: Case study in the region of valparaiso, Chile. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/su132413681>
- MIEM. (2023). *Hoja de ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay*. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Recuperado el 6 de enero 2025 de www.hidrogenoverde.uy
- Ministerio de Educación de Argentina. (2007). *La energía, cambios y movimientos*.

- (C. y T. de la N. Ministerio de Educación, Ed.; 1ra ed.). Recuperado el 18 de diciembre de 2024.
<http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002713.pdf>
- Ministerio de Energía de Chile. (2024). *Plan de acción Hidrógeno Verde 2023-2030. Gobierno de Chile*. Recuperado el 8 de enero del 2025 de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_de_accion_hidrogeno_verde_2023-2030_1.pdf
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Ecuador* (Gobierno del Ecuador, Ed.; Primera edición). Recuperado el 5 de enero 2025 de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/Hoja-de-Ruta-del-Hidrogeno-Verde-en-Ecuador.pdf>
- Moreno, J., Cobo, M., Barraza-Botet, C. & Sanchez, N. (2022). *Role of low carbon emission H₂ in the energy transition of Colombia: Environmental assessment of H₂ production pathways for a certification scheme*.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100312>
- Moscoso, M., Van Laake, T., Quiñones, L. M., Pardo, C. & Hidalgo, D. (2020). *Transporte urbano sostenible en América Latina: Evaluaciones y recomendaciones para políticas de movilidad*. Recuperado el 18 de diciembre de 2024: <https://www.despacio.org/wp-content/uploads/2020/02/SUTLac-ESP-05022020-web.pdf>
- Muñoz, Pedro., Franceschini, Esteban. A., Levitan, David., Rodriguez, C. Ramiro., Humana, Teresita. & Correa Perelmuter, Gabriel. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. *Energy Convers. Manage.*, 257.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>
- Mustafa, H., Kamal, R. & Mohamed, R. (2024). Enhancing and optimization of green Hydrogen mixtures in natural gas to optimize transportation, power, and economy. *Egyptian Journal of Chemistry*, 0(0), 0–0.
<https://doi.org/10.21608/ejchem.2024.279356.9513>
- Nadaleti, W. C., Lourenço, V. A. & Americo, G. (2021). Green hydrogen-based pathways and alternatives: Towards the renewable energy transition in South America's regions – Part A. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43), 22247–22255. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.03.239>

- Nadaleti, W. César., Gomes de Souza, Eduarda. & Melegari de Souza, S. Nelson. (2022). The potential of hydrogen production from high and low-temperature electrolysis methods using solar and nuclear energy sources: the transition to a hydrogen economy in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(82), 34727–34738. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.065>
- Nagasawa, K., Davidson, F. T., Lloyd, A. C. & Webber, M. E. (2019). Impacts of renewable hydrogen production from wind energy in electricity markets on potential hydrogen demand for light-duty vehicles. *Applied Energy*, 235, 1001–1016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.067>
- Nahui-Ortiz, J., Mendoza, A., Quillos-Ruiz, S. & Escalante-Espinoza, N. (2021). Energy-Environmental Modelling of a PEM-Type Fuel Cell for Hydrogen Production. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.239>
- National Geographic. (2022, 16. May). *¿Qué es la huella de carbono y cómo medirla? Actualizado el 11 de enero de 2024* <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/que-es-huella-de-carbono-como-se-mide>
- Oficina Catalana del Calvi Climatic. (2011). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*. Recuperado el 18 de diciembre de <https://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>
- ONU. (2024, 5. June). *Energías renovables: energías para un futuro más seguro | Naciones Unidas*. Recuperado el 17 de diciembre del 2024 de <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
- Parada, M., Ochoa, I. & Villatoro, H. (2023). Green hydrogen assessment of generation and storage potential from solar and wind energy shedding in Honduras. *E3S Web of Conferences*, 379. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337903003>
- Peksen, M. (2021). Hydrogen technology towards the solution of environment-friendly new energy vehicles. *Energies*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/en14164892>

- Pérez, R. & Osal Herrera, W. J. (2020). Impacto de los sistemas de transporte público latinoamericanos en la movilidad urbana y en el ambiente. *Publicaciones En Ciencia y Tecnología*, 13. N°2, 38–53. Recuperado el 18 de diciembre del 2024 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7474439>
- Polyexcel Energy In Compounds. (2020, 21. December). *Matriz energética: entienda qué es y para qué sirve| Polyexcel*. Recuperado el 24 de febrero del 2025 de <https://polyexcel.com.br/es/productos/matriz-energetica-entienda-que-es-y-para-que-sirve/>
- Posso, F., Galeano, M., Baranda, C., Franco, D., Rincón, A., Zambrano, J., Cavaliero, C. & López, D. (2022). Towards the Hydrogen Economy in Paraguay: Green hydrogen production potential and end-uses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30027–30049. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.05.217>
- Posso, F., Pulido, A. & Acevedo-Páez, J. C. (2023). Towards The Hydrogen Economy: Estimation of green hydrogen production potential and the impact of its uses in Ecuador as a case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(32), 11922–11942. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.05.128>
- PV Magazine LatAm. (2023, 1. September). *Hidrógeno verde en Brasil con un coste nivelado entre 2,87 y 3,56 dólares/kg*. Recuperado el 03 de enero de 2025 de <https://www.pv-magazine-latam.com/2023/09/01/hidrogeno-verde-en-brasil-con-un-coste-nivelado-entre-287-y-356-dolares-kg/>
- Qintero Ávila, C., Poblano Ojinaga, E. R., Valles Chávez, A., Woocay Prieto, A. & Rodríguez Mejía, J. R. (2024). Revisión de literatura en el sistemas híbridos de energía para minimizar costos, emisiones y maximizar producción. *Neyart*, 2. <https://doi.org/10.61273/neyart.v2i3.78>
- Quirós-Tortós, J. (2024). *Análisis de las condiciones del marco normativo y político en Perú para la producción de hidrógeno verde*. Recuperado el 6 de enero del 2025 de <https://eficienciaenergetica.minem.gob.pe/Content/fileman/Uploads/HIDR%C3%93GENO%20VERDE/Presentaci%C3%B3n%20Jairo%20Quiros-Tortos%20-%20UCR.pdf>

- RACC, R. de A. N. de C. C. (2024). *Chile resiliente y carbono neutral*.
<https://www.bcn.cl/>
- Ramos-Sánchez, G. & González-Huerta, R. de G. (2022). Special issue for the XXI International Meeting of the Mexican Hydrogen Society. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 29985.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.07.184>
- Republica de Uruguay. (2022). *Segunda Contribución Determinada a nivel Nacional al Acuerdo de París*. Recuperado el 11 de febrero del 2025 de
<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-12/Uruguay%20Segunda%20CDN.pdf>
- República Del Ecuador. (2025). *Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional Cita recomendada*. <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-02/Segunda%20NDC%20de%20Ecuador.pdf>
- Rivera, G. & Molina, J. M. (2006). *Medición del impacto económico de una empresa minera en su entorno como herramienta de gestión*.
- Roca Villanueva, B., Beltrán Salvador, M. & Gómez Huelgas, R. (2019). Cambio climático y salud. *Revista Clínica Española*, 219(5), 260–265.
<https://doi.org/10.1016/J.RCE.2019.01.004>
- Rodriguez, R., Osma, G., Bouquain, D., Solano, J., Ordoñez, G., Roche, R., Paire, D. & Hissel, D. (2022). Sizing of a fuel cell–battery backup system for a university building based on the probability of the power outages length. *Energy Reports*, 8, 708–722. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.07.108>
- Rodríguez-Fontalvo, D., Quiroga, E., Cantillo, N. M., Estor Sanchez, N., Figueredo, M. & Cobo, M. (2023). *Green hydrogen potential in tropical countries: The colombian case*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.320>
- Roldán Vilorio, J. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber*. Ediciones Novel.
https://books.google.com.pe/books?id=yKh2AgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Energ%C3%ADas+renovables&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Energ%C3%ADas%20renovables&f=false
- Rose, P. K. & Neumann, F. (2020). Hydrogen refueling station networks for heavy-duty vehicles in future power systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102358>

- Rostami, S., Javadi, K. & Maleki, A. (2024). Taking stock of the climate impact of the hydrogen pathways for the aviation sector by 2050. *Energy Conversion and Management*, 325, 119369.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119369>
- Sadik-Zada, E. R., Santibanez Gonzalez, E. D., Gatto, A., Althaus, T. & Quliyev, F. (2023). Pathways to the hydrogen mobility futures in German public transportation: A scenario analysis. *Renewable Energy*, 205, 384–392.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.087>
- Sánchez-Peñuela, L. J. B. (2022). Estrategias nacionales sobre hidrógeno: una visión comparada. *Economía Industrial, ISSN 0422-2784, Nº 424, 2022 (Ejemplar Dedicado a: Hidrógeno Renovable), Págs. 33-48, 424, 33–48*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8763309&info=resumen&idioma=ENG>
- Sánchez-Serrano, S., Pedraza-Navarro, I. & Donoso-González, M. (2022). How to conduct a systematic review under PRISMA protocol? Uses and fundamental strategies for its application in the educational field through a practical case study. *Bordon. Revista de Pedagogía*, 74(3), 51–66.
<https://doi.org/10.13042/Bordon.2022.95090>
- Secretaría de Estado en el Despacho de Energía de Honduras. (2021). *Hoja de Ruta 2050: Creando espacios, cerrando brechas. Políticas Energéticas Nacional*.
- Silva Junior, L. H. & Da Silva, A. K. (2024). Global assessment of hydrogen production from the electrical grid aiming the Brazilian transportation sector. *Energy for Sustainable Development*, 85.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101626>
- Skewes, F., Guzmán, Ó., Cortés, J. & Rivera, M. (2025). Navigating the energy transition in South America: Regulatory challenges and trends in Chile's evolving energy legal landscape. In *Energy Research and Social Science* (Vol. 121). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.103957>
- Solorza-Feria, O. (2023). Green Hydrogen, PEM Fuel Cells, and Li-ion Batteries in a Vehicular-Transport Prototype. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 67(4), 321–328. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v67i4.1986>
- Song, L., Gao, W., Zhang, L., Li, Q. & Ren, H. (2023). Economic Analysis of a

- Photovoltaic Hydrogen Refueling Station Based on Hydrogen Load. *Energies*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/en16176406>
- Stringer, T. & Ramírez-Melgarejo, M. (2024). Decarbonization pathways in Latin America: Assessing the economic and policy implications of transitioning to renewable energy sources. *Next Energy*, 5, 100157. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100157>
- Tabora Oyuela, J. E. & Silva Quiñones, R. A. (2024). Towards Sustainable Energy: Modeling a modified 50kWp Photovoltaic PEM Electrolysis System for Green Hydrogen in Tegucigalpa. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1715>
- Tang, O., Rehme, J. & Cerin, P. (2022). Levelized cost of hydrogen for refueling stations with solar PV and wind in Sweden: On-grid or off-grid? *Energy*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122906>
- The Logistics World. (2023, 24. October). *Los Vehículos de Hidrógeno Verde en el Sector Logístico de México: Desafíos y Oportunidades*. Recuperado el 9 de febrero del 2025 de <https://thelogisticsworld.com/actualidad-logistica/el-auge-de-los-vehiculos-de-hidrogeno-verde-en-mexico-que-significa-para-el-sector-logistico/>
- Tonon, T. (2023). What would a US green hydrogen energy economy look like? *Clean Energy*, 7(5), 1148–1172. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad047>
- Triguero-Ruiz, F., Avila-Cano, A. & Trujillo Aranda, F. (2023). Measuring the diversification of energy sources: The energy mix. *Renewable Energy*, 216, 119096. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119096>
- Tunn, J., Kalt, T., Müller, F., Simon, J., Hennig, J., Ituen, I. & Glatzer, N. (2024). Green hydrogen transitions deepen socioecological risks and extractivist patterns: evidence from 28 prospective exporting countries in the Global South. *Energy Research and Social Science*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103731>
- Vallejo Almeida, G. (2017). inversion-extranjera-directa. *Universidad Católica de Colombia*.
- Vallejos-Romero, A., Cordoves-Sánchez, M., Cisternas, C., Sáez-Ardura, F., Rodríguez, I., Aledo, A., Boso, Á., Prades, J. & Álvarez, B. (2023). Green

- Hydrogen and Social Sciences: Issues, Problems, and Future Challenges. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 1). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/su15010303>
- Velazquez Abad, A. & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138, 111300. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.111300>
- Viceministerio de Minas y Energía. (2024). *Estrategia Nacional para la Economía de Hidrógeno Verde en Paraguay*. Recuperado el 6 de enero del 2025 de https://minasyenergia.mopc.gov.py/index.php?option=com_content&view=article&id=1805&Itemid=552
- Vodovozov, V., Raud, Z. & Petlenkov, E. (2022). Review of Energy Challenges and Horizons of Hydrogen City Buses. In *Energies* (Vol. 15, Issue 19). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/en15196945>
- Von Zuben, T. W., Moreira, D. E. B., Germscheidt, R. L., Yoshimura, R. G., Dorretto, D. S., de Araujo, A. B. S., Salles, A. G. & Bonacin, J. A. (2022). Is Hydrogen Indispensable for a Sustainable World? A Review of H2 Applications and Perspectives for the Next Years. In *Journal of the Brazilian Chemical Society* (Vol. 33, Issue 8, pp. 824–843). Sociedade Brasileira de Química. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20220026>
- Wang, H., Zhu, L., Sun, W., Khan, M. Q. & Liu, B. (2024). Research on energy pricing of the hydrogen refueling station based on master-slave game in multi-market. *Applied Energy*, 373. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123906>
- Wolff, S., Seidenfus, M., Brönnner, M. & Lienkamp, M. (2021). Multi-disciplinary design optimization of life cycle eco-efficiency for heavy-duty vehicles using a genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 318.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128505>
- Yap, J. & McLellan, B. (2024). Evaluating the attitudes of Japanese society towards the hydrogen economy: A comparative study of recent and past community surveys. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 66–83.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.174>
- Yasmeen, R. & Shah, W. U. H. (2024). Energy uncertainty, geopolitical conflict, and militarization matters for Renewable and non-renewable energy development: Perspectives from G7 economies. *Energy*, 306.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132480>

Zhou, J., Wu, Y., Tao, Y., Gao, J., Zhong, Z. & Xu, C. (2021). Geographic information big data-driven two-stage optimization model for location decision of hydrogen refueling stations: An empirical study in China. *Energy*, 225.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120330>



Doctorando: Santos Andrés Castillo Vargas

DNI: 18890865