

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ESCUELA DE INGENIERIA DE BILBAO UPV/EHU

Caracterización de la dinámica de las tecnologías implicadas en los vehículos eléctricos y el hidrógeno verde: una mirada hacia Latinoamérica.

Tesis doctoral presentada por:

Willmer Guevara Ramírez

Dirigida por los doctores:

Dr. Rosa María Rio Belver

Dr. Itziar Martínez De Alegría

2023

Agradecimientos

Con la presentación de esta tesis cierro uno de los ciclos más importante de mi vida respecto a mi formación profesional que, sin duda, recordaré por siempre. Llegado este momento, siento la necesidad de hacer un balance de esta grata y desafiante etapa. Partiendo por el proceso de matrícula, donde le agradezco el voto de confianza y el apoyo que me entregó la Dra. Rosa María Rio Belver para poder matricularme en el doctorado. Gracias a su visión colaborativa, integró a la codirección de mi tesis a la Dra. Itziar Martínez de Alegría, quien, sin lugar a duda, fue un pilar fundamental en este ciclo. La visión, el profesionalismo y el compromiso de Itziar fueron primordiales en el logro de los resultados de esta tesis.

Durante la etapa formativa llegaron extensas jornadas de trabajo que tuve que combinar con largas jornadas laborales, la atención a mi familia, los efectos de la pandemia y otros compromisos personales y profesionales. Pero, gracias a un compromiso inigualable de mis directoras con mi proceso de formación, pude superar cada una de las etapas. Les agradezco eternamente a Rosa e Itziar por tanta entrega durante este periodo. Confieso que cuando les enviaba algún avance en la escritura, pensaba que descansaría al menos un par de días en lo que ellas tuvieran tiempo para revisar y corregir. Sin embargo y para mi suerte, eso no sucedía. Al día siguiente, al despertar, ya tenía extensas y detalladas revisiones que me comprometían a seguir trabajando. En toda mi etapa formativa nunca había visto en unos profesores tanto compromiso con la formación de su estudiante. No solo les agradezco por todo su apoyo en el plano formativo y el crecimiento profesional que he alcanzado, sino que también agradezco la confianza y el apoyo emocional entregado en los momentos más críticos de este proceso.

Aprovecho para agradecer a la Universidad del País Vasco (UPV), por el financiamiento de una estancia en sus instalaciones. Allí fui recibido con mucho afecto en la Escuela de Ingeniería de Vitoria y Bilbao, donde tuve la oportunidad de tener gratos intercambios con académicos, estudiantes y personal administrativo en general. Agradezco también a la Dra. Izaskun Álvarez Meaza, por compartirme sus conocimientos en materia de gestión tecnológica, lo que me permitió mejorar mi tesis.

Finalmente agradezco a toda mi familia que son mi principal fuente de inspiración en todo lo que hago. Especialmente a mi madre, mi padre (aunque ya no este físicamente) e hijos (Ana Laura y Alejandro) a quienes dedico esta tesis.

Resumen extendido

Esta tesis se desarrolla en el contexto de la transformación energética que han emprendido los países a raíz del compromiso asumido en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París (cuyo objetivo es responder a las urgencias del cambio climático), lo cual les ha llevado a plantear como prioridad la descarbonización de sus economías. Para ello han apostado por el desarrollo de políticas energéticas que priorizan el desarrollo de las fuentes de energía renovables (FER) y la transición energética, así como el avance hacia la electrificación de sus economías. Entre las principales estrategias lanzadas por varias naciones se encuentran, la implementación de los vehículos eléctricos (EVs, por sus siglas en inglés) y el desarrollo del hidrógeno verde (H₂V) como vector energético.

El objetivo principal de esta tesis es analizar la dinámica de los flujos de conocimiento hacia y dentro de América Latina (LATAM), en el ámbito de las tecnologías implicadas en los EVs y el H₂V. Para ello, se han empleado herramientas y métodos cuantitativos, bibliométricos y de patentometría, complementados con análisis estadísticos y el uso de diferentes herramientas de software (VOSviewer, Gephi, Vantage Point y Loglet Lab4), análisis de redes e indicadores de centralidad, indicadores para el análisis de patentes, el uso de las curvas tecnológicas (curva S), mapas de conocimiento, así como diferentes variables e indicadores relacionados con la transición energética, especialmente el Retorno Energético de la Inversión o Energy Return on Investment (EROI, por sus siglas en inglés).

Los datos utilizados para la elaboración de la presente tesis han sido obtenidos a partir de las siguientes fuentes de información:

- i) Referencias bibliográficas (artículos científicos) contenidos en las bases de datos Scopus y la Web of Science (WOS).
- ii) La información sobre patentes correspondiente a baterías y celdas de conversión electroquímica contenida en la plataforma de inteligencia de patentes PatSeer.
- iii) La información contenida en las principales estrategias nacionales sobre hidrógeno (H₂) publicadas entre el 2019 y el 2020.
- iv) La documentación más relevante existente en la actualidad en relación con las estrategias nacionales en materia de energía, la transición energética y el cambio climático en general. Esta información ha sido principalmente obtenida de las siguientes fuentes: la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

La tesis se acoge al formato “Tesis por compendio de publicaciones”, cuya singularidad radica en que está integrada por varios trabajos científicos con una misma unidad temática. El cumplimiento del objetivo general se alcanzó mediante tres artículos ya publicados con

factor de impacto (JCR y SJR). A continuación, se presentan dichos artículos, así como una síntesis de la metodología utilizada en cada uno de ellos:

P1. Guevara-Ramírez, W., Río-Belver, R. M., Alegría, I. M. de, & Letzkus, C. M. (2021). Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos. *Dirección y Organización*, 0(75), 62–73. <https://doi.org/10.37610/DYO.V0I75.610> (SJR Q3).

En este primer artículo, se caracterizaron los flujos de conocimiento en LATAM para el campo de los EVs, mediante herramientas de análisis estadísticos, indicadores bibliométricos, mapas de conocimiento y análisis correlacional. La herramienta de análisis y visualización utilizada fue el software VOSviewer.

P2. Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I., Río-Belver, R. M., & Alvarez-Meaza, I. (2022). Strategic management of patents on electrochemical conversion fuel cells and batteries in Latin America as a mechanism for moving towards energy sustainability. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1, 1–20. <https://doi.org/10.1007/S10800-022-01804-9> (JCR Q3 y SJR Q2)

En el segundo artículo, se evaluó la dinámica de los flujos de patentes sobre baterías y celdas de combustibles hacia y dentro de LATAM, por ser un componente esencial para el desarrollo masivo de los EVs. En este caso se utilizó la información procedente de las patentes solicitadas con código H01M, según la clasificación internacional de patentes (IPC) (que agrupa todas las patentes relacionadas con las baterías y celdas de combustible). Las principales herramientas utilizadas han sido: el análisis de redes e indicadores de centralidad, indicadores para el análisis de patentes (obtenido mediante la minería de datos), y el uso de curvas tecnológicas (curva S). Adicionalmente, se ha diseñado y aplicado un indicador para determinar la relación de las patentes con atributos sustentables (el indicador “Patentes amigables con tecnologías sustentables” (PFST por sus siglas en inglés)), así como una matriz de adopción tecnológica (TAM, por sus siglas en inglés). Para este estudio se han utilizado los softwares Gephi, VantagePoint y Loglet Lab4.

P3. Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I., & Río-Belver, R. M. (2022). Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies. In *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02388-w> (JCR Q2 y SJR Q1)

El tercer artículo da respuesta a la necesidad de comprender el significado del concepto H₂V. Esto es debido a que durante la investigación se han encontrado términos como: Hidrógeno renovable (H₂R), hidrógeno sostenible (H₂S), hidrógeno limpio (H₂L) e hidrógeno ecológico (H₂E), que generan confusión respecto a la conceptualización técnica del H₂V. En este contexto, y con el fin de comprender los límites entre estos conceptos, se han utilizado:

análisis estadísticos, mapas de conocimiento, indicadores bibliométricos, así como los resultados de los estudios de metaanálisis sobre EROI. El objetivo ha sido determinar los valores de las FER potencialmente utilizables para producir H₂V. Adicionalmente, también se ha realizado una revisión profunda de las estrategias nacionales más importantes sobre H₂ publicadas entre los años 2019 y el 2020, con el objetivo de detectar las principales fuentes energéticas y tecnologías que se proyectan para producir H₂. Para este caso el software de análisis y visualización utilizado ha sido el VOSviewer.

En general la presente tesis contribuye a la comprensión de los flujos de conocimiento en materia de producción científica e innovación en el campo de los EVs, cuya gestión estratégica permitirá avanzar hacia una economía descarbonizada en la región LATAM. También contribuye al avance de conocimiento en la conceptualización técnica del H₂V con implicaciones relevantes para los gestores de tecnología y los generadores de políticas públicas. Como principal conclusión, se destaca la necesidad de formular estrategias en los países de LATAM que les permitan tener un rol activo dentro de los procesos relacionados con el H₂V y los EVs, evitando así el retraso tecnológico en temas que pueden tener un impacto directo en su sostenibilidad, competitividad y actividad económica en general. Desde el punto de vista metodológico, se han presentado y validado el uso de herramientas innovadoras en el campo de la patentometría, como son: el indicador PFST y el modelo TAM, permitiendo su uso por parte de investigadores que requieran evaluar aspectos relacionados con la adopción de patentes y su caracterización en cuanto a su contribución a la mitigación o adaptación al cambio climático.

La presente tesis está organizada en tres secciones: la sección I aborda la introducción, el marco teórico, las metodologías, los objetivos e hipótesis y principales resultados. La sección II presenta las conclusiones de la misma, así como las futuras líneas de investigación. Por último, la sección III incorpora las contribuciones del doctorando, en forma de artículos publicados en revistas con factor de impacto, en su texto completo.

Palabras clave

Hidrógeno verde; hidrógeno renovable; hidrógeno sostenible; sostenibilidad, análisis bibliométrico; análisis de patentes; matrices; indicadores de patentes; Latinoamérica; vehículos eléctricos, baterías de ion de litio; celdas de combustible; H10M; Retorno Energético de la Inversión; EROI; estrategias de hidrógeno.

Abstract

This thesis is developed in the context of the energy transformation that countries have undertaken as a result of the commitment made in the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs) and the Paris Agreement, whose objective is to respond to the urgencies of climate change, which has led them to raise as a priority the decarbonization of their economies. To this end, they have opted for the development of energy policies that prioritize the development of renewable energy sources (RES) and energy transition, as well as moving towards the electrification of their economies. Among the main strategies are the implementation of electric vehicles (EVs) and the development of green hydrogen (H₂V) as an energy vector.

The main objective of this thesis is to analyze the dynamics of knowledge flows to and within Latin America (LATAM), in the field of technologies involved in EVs and H₂V. For this purpose, scientometric, bibliometric and patentometric tools and methods have been used, complemented with statistical analysis and the use of different software tools (VOSviewer, Gephi, Vantage Point and Loglet Lab4), network analysis and centrality indicators, indicators for patent analysis, the use of technology curves (S-Curve), knowledge maps, as well as different variables and indicators related to the energy transition, especially the Energy Return on Investment (EROI).

The data used for the preparation of this thesis were obtained from the following sources of information:

- (i) Bibliographic references (scientific articles) contained in the Scopus and Web of Science (WOS) databases.
- ii) Patent information on batteries and electrochemical conversion cells contained in the PatSeer patent intelligence platform.
- iii) The information contained in the main national hydrogen (H₂) strategies published between 2019 and 2020.
- (iv) The most relevant documentation currently existing in relation to national energy strategies, energy transition and climate change in general. This information has been mainly obtained from: The International Energy Agency (IEA), the International Renewable Energy Agency (IRENA) and the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).

The thesis follows the format "Thesis by compendium of publications", whose singularity lies in the fact that it is made up of several scientific works with the same thematic unit. The fulfillment of the general objective was achieved by means of three publications already published with impact factor (JCR and SJR). The main methods used in each of them are presented below:

P1. Guevara-Ramírez, W., Río-Belver, R. M., Alegría, I. M. de, & Letzkus, C. M. (2021). Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos. *Dirección y Organización*, 0(75), 62–73. <https://doi.org/10.37610/DYO.V0I75.610> (SJR Q3).

In this first article, knowledge flows in LATAM for the field of EVs were characterized using statistical analysis tools, bibliometric indicators, knowledge maps and correlational analysis. The analysis and visualization tool used was the VOSviewer software.

P2. Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I., Río-Belver, R. M., & Alvarez-Meaza, I. (2022). Strategic management of patents on electrochemical conversion fuel cells and batteries in Latin America as a mechanism for moving towards energy sustainability. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1, 1–20. <https://doi.org/10.1007/S10800-022-01804-9> (JCR Q3 y SJR Q2)

In the second article, the dynamics of the flow of patents on batteries and fuel cells to and within LATAM was evaluated, as they are an essential component for the massive development of EVs. In this case, information from patents applied for with code H01M, according to the International Patent Classification (IPC) (which groups all patents related to batteries and fuel cells) was used. The main tools used were: Network analysis and centrality indicators, indicators for patent analysis (obtained by data mining), and the use of technology curves (S-Curve). In addition, in this study an indicator was designed and applied to determine the relationship of patents with sustainable attributes, i.e., "Patents Friendly to Sustainable Technologies" (PFST) and a Technology Adoption Matrix (TAM). The software Gephi, VantagePoint and Loglet Lab4 were used for this study.

P3. Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I., & Río-Belver, R. M. (2022). Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies. In *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02388-w> (JCR Q2 y SJR Q1)

The third article responds to the need to understand the meaning of the H₂V concept. This is because during the research, terms such as: renewable hydrogen (H₂R), sustainable hydrogen (H₂S), clean hydrogen (H₂L) and ecological hydrogen (H₂E) have been found, which generate confusion regarding the technical conceptualization of H₂V. In this context, and to understand the boundaries between these concepts, we have used: statistical analyses, knowledge maps, bibliometric indicators, as well as the results of meta-analysis studies on EROI. The objective has been to determine the values of RES potentially usable to produce H₂V. Additionally, an in-depth review of the most important national H₂ strategies published between 2019 and 2020 has also been carried out, with the aim of detecting the main energy

sources and technologies projected to produce H₂. For this case the analysis and visualization software used was VOSviewer.

In general, this thesis contributes to the understanding of knowledge flows in terms of scientific production and innovation in the field of EVs, whose strategic management will allow moving towards a decarbonized economy in the LATAM region. It also contributes to the advancement of knowledge in the technical conceptualization of H₂V with relevant implications for technology managers and public policy generators. As a main conclusion, it highlights the need to formulate strategies in LATAM countries that allow them to have an active role within the processes related to H₂V and EVs, thus avoiding technological backwardness in issues that can have a direct impact on their sustainability, competitiveness, and economic activity in general. From the methodological point of view, the use of new tools in the field of patentometrics such as the PFST indicator and the TAM model have been presented and validated, which will allow their use by researchers who need to evaluate aspects related to the adoption of patents and their characterization in terms of their contribution to mitigation or adaptation to climate change.

This thesis is organized in three sections: section I deals with the introduction, the theoretical framework, the methodologies, the objectives and hypotheses and the main results; section II presents the conclusions of the thesis, as well as the future lines of research. Finally, section III incorporates the contributions of the doctoral student, in the form of articles published in journals with impact factor, in full text.

Keywords

Green hydrogen; renewable hydrogen; sustainable hydrogen; sustainability; bibliometric analysis; patent analysis; matrices; patent indicators; Latin America; electric vehicles; lithium-ion batteries; fuel cells; H10M; Energy Return on Investment; EROI; hydrogen strategies.

Glosario de términos

AIE: Agencia Internacional de la Energía.

IRENA: Agencia Internacional de las Energías Renovables.

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

EROI: Retorno Energético de la Inversión:

EVs: Vehículos Eléctricos:

EVFCs: Vehículos eléctricos de celdas de combustibles

FER: Fuentes de energías renovables.

H₂: Hidrógeno.

H₂E: Hidrógeno ecológico.

H₂L: Hidrógeno limpio.

H₂R: Hidrógeno renovable.

H₂S: Hidrógeno sostenible.

H₂V: Hidrógeno verde.

IPC: Clasificación Internacional de Patentes.

LIB: Batería de ion de litio:

LATAM: América Latina (Latinoamérica).

PFST: Patentes amigables con tecnologías sustentables.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

TAM: Matriz de adopción de tecnología.

USA: Estados Unidos de América.

WOS: Web of Science.

ÍNDICE GENERAL

Sección I: Síntesis introductoria	12
1. Introducción	12
1.1 Tecnologías para la descarbonización	12
1.2 Contribución de los automóviles eléctricos para la descarbonización de la economía y el caso de la región latinoamericana	12
1.3 Patentes sobre celdas y baterías de conversión electroquímica	15
1.4 La conceptualización del hidrógeno verde	16
2. Marco teórico	18
2.1 Bibliometría- cienciometría	18
2.2. Patentometría	27
2.3 Retorno de la inversión en energía (EROI)	30
2.4. Metaanálisis	31
3. Herramientas metodológicas	31
3.1 Fuentes de datos	31
3.2 Métodos	33
4. Hipótesis	42
5. Objetivos	43
6. Resumen de las publicaciones	44
7. Fuentes referenciadas	54
Sección II: Conclusiones	69
1. Conclusiones de la publicación 1:	69
2. Conclusiones de la publicación 2:	70
3. Conclusiones de la publicación 3:	71
4. Conclusiones generales	72
5. Líneas futuras de investigación	74
Sección III: Trabajos publicados	75
Artículo 1 (P1)	75
Artículo 2 (P2)	88
Artículo 3 (P3)	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de las investigaciones sobre los EVs utilizando bibliometría	21
Tabla 2: Resumen de las investigaciones sobre hidrógeno utilizando bibliometría	24
Tabla 3: Valores de EROI según estudio de metaanálisis para FER.....	51
Tabla 4: Tecnologías descritas en las estrategias globales de H ₂ V.....	52
Tabla 5: Criterios propuestos para el uso de los términos H ₂ V, H ₂ S y H ₂ R.....	53
Tabla 6: Indicadores del primer artículo	75
Tabla 7: Indicadores del segundo artículo	88
Tabla 8: Indicadores del tercer artículo	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Crecimiento del stock de EV (turismos) en el mundo y los países de mejor desempeño .	13
Figura 2: Participación porcentual de los principales países en stock de EV (turismos) mundial	13
Figura 3: Resumen de la estructura de las fuentes de información utilizada en cada artículo	33
Figura 4: Resumen de la estructura de las herramientas metodológicas utilizadas en cada artículo	33
Figura 5: Etapas del ciclo de vida tecnológico.....	37
Figura 6: Matriz de adopción tecnológica (TAM) por países.....	38

Sección I: Síntesis introductoria

1. Introducción

En el presente apartado se presenta el marco general en el que se desarrolla esta tesis. Además, se justifica la oportunidad de cada una de las temáticas abordadas.

1.1 Tecnologías para la descarbonización

El siglo XX fue un periodo donde ocurrió una importante aceleración del desarrollo económico e industrial y por consiguiente una mayor sobreexplotación de los recursos energéticos no renovables y altamente contaminantes como el petróleo y el carbón. Para finales del siglo XX y principio del XXI la problemática de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros contaminantes y su impacto sobre el clima se habían agudizado. Lo que se convirtió en un desafío prioritario para varios países en lo que se denominó la lucha contra el cambio climático (Naciones Unidas, 2022). Al respecto, tanto las naciones desarrolladas como las que se encuentran en vía de desarrollo se han visto en la necesidad aunar esfuerzos en la búsqueda de alternativas para enfrentar esta problemática (UNFCCC, 2015).

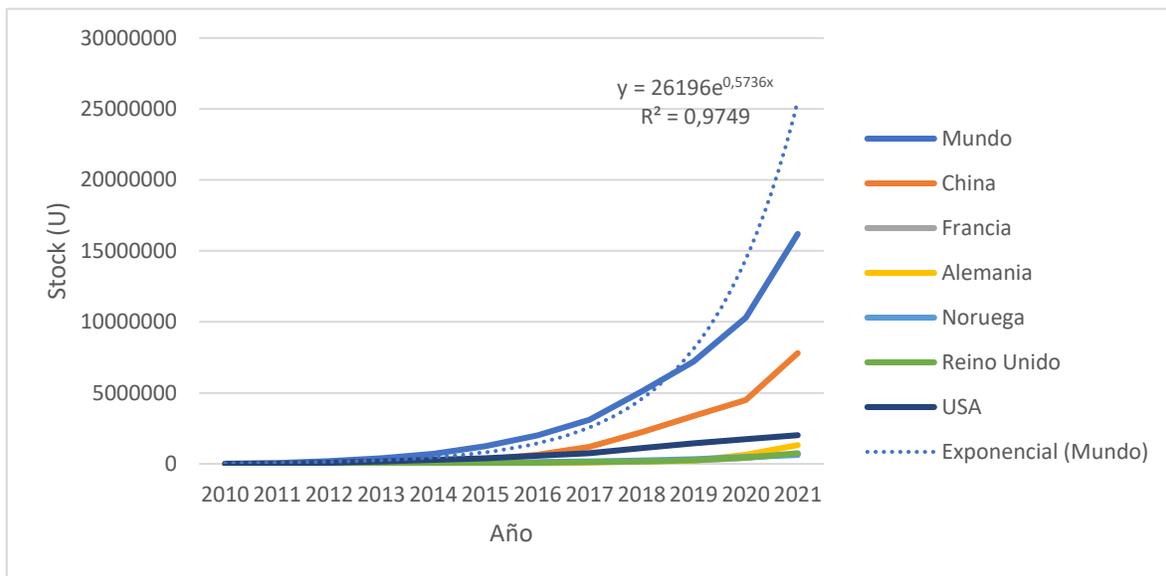
Gracias al trabajo mancomunado de la comunidad científica y los grupos de interés, han ido surgiendo soluciones que en la actualidad cuentan con importantes avances en su implementación. Destacando la producción de energía eléctrica proveniente de fuentes de energías renovables (FER), las que han tenido un crecimiento sostenido desde 1990 hasta el 2019, representando el 26,2% de la electricidad consumida a nivel mundial (IEA et al., 2022). En años más recientes, empiezan a impactar otras tecnologías limpias, como son los autos eléctricos (EVs, por sus siglas en inglés) y el hidrógeno verde (H₂V) (Green hydrogen (GH₂)). La implementación masiva de estas tecnologías requiere de focalizar importantes recursos financieros, que, para ser asignados necesitan de indicadores precisos que validen sus principales beneficios, con el fin de ofrecer una ruta clara a los gobiernos y empresas para su aceptación e implementación. Por tanto, la vigilancia tecnológica sobre estos ámbitos del conocimiento tiene especial importancia.

1.2 Contribución de los automóviles eléctricos para la descarbonización de la economía y el caso de la región latinoamericana

Los EVs comprenden una tecnología muy dinámica, que muestra importantes progresos en su masificación. Cada día es más frecuente encontrar EVs en las vías de las principales ciudades del mundo. Su crecimiento ha sido exponencial desde el año 2010 donde apenas existía un stock aproximadamente de 17,4 mil vehículos (solo automóviles tipo turismo), muy inferior a los 16,2 millones de unidades disponible en el 2021 (Figura 1) (IEA, 2022a),

lo que significa un crecimiento promedio del 86,2% durante el periodo. En general, los EVs (autos, autobuses, furgones y camiones) representaron el 14,0% de la ventas de vehículos en el 2021 (IEA, 2022a).

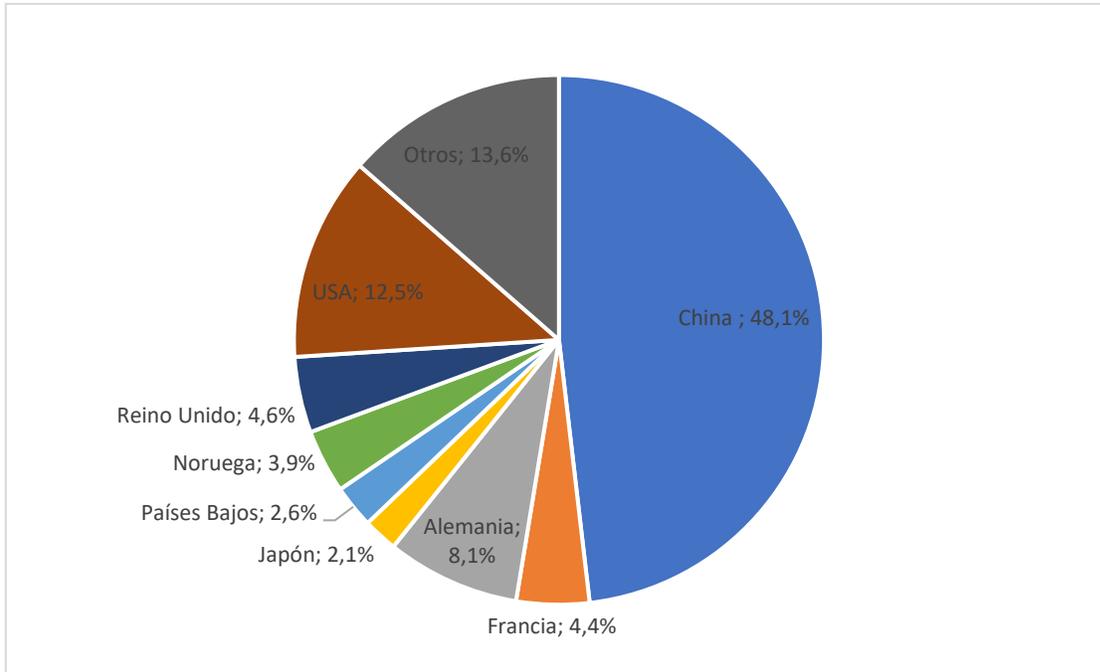
Figura 1: Crecimiento del stock de EV (turismos) en el mundo y los países de mejor desempeño.



Fuente: Elaboración propia a partir de (IEA, 2022a).

A nivel empresarial, aunque la marca estadounidense Tesla se muestra como la más representativa de segmento, lo cierto es que prácticamente todas las marcas han ido incorporando modelos eléctricos en los diferentes segmentos de mercado. A pesar de este gran crecimiento de los EVs, la mayor concentración de stock en el 2021 se concentra en China, Estados Unidos (USA) y Alemania (Figura 2). El 13,6% se distribuye en un gran número de países, lo que significa que el resto de los países muestra en general un tímido desempeño en la asimilación de esta tecnología en comparación con los tres países citados.

Figura 2: Participación porcentual de los principales países en stock de EV (turismos) mundial.



Fuente: Elaboración propia a partir de (IEA, 2022a).

Los EVs destacan por su importante contribución a la descarbonización, al considerarse una tecnología libre de emisiones de CO₂ durante su funcionamiento. Sin embargo, aún se presentan algunas barreras importantes, como son sus altos costos iniciales, entre los que destacan: el costo de adquisición, que sigue siendo muy superior a los de los vehículos tradicionales, así como los costes adicionales para proveer de la infraestructura necesaria para la carga (tanto en el sector residencial, como son los hogares y edificios, como a nivel de las redes de estaciones públicas (electrolineras)) (Yong et al., 2015).

Sin embargo, dada la gran expansión de las flotas de los EVs los efectos de las economías de escala ya empiezan a incidir sobre la reducción de los costes generales de fabricación y la construcción de electrolineras. En general, los fabricantes continúan ampliando la cantidad de modelos EVs disponibles para todo tipo de clientes (IEA, 2021a, 2022b), y algunos países se han planteado ambiciosas metas para una transición acelerada hacia esta tecnología.

Entre las principales las razones que explican la rápida expansión de los EVs se puede citar la incorporación a los EVs de las baterías de litio (ion de litio y de estado sólido) (LIB por sus siglas en inglés), la cual le ha permitido mejorar su desempeño en cuanto a autonomía, potencia y tiempo de recarga (Choi & Aurbach, 2016; Schmuck et al., 2018). Estas baterías en general destacan por su alta eficiencia, menor peso, mayor vida útil, mayor autonomía y utilización de menor tiempo para la recarga en comparación con las tecnologías tradicionales de almacenamiento de carga (Ma et al., 2022; Zeng et al., 2019). Estas características las convierten en unas de las principales candidatas para almacenar la energía eléctrica que

moverán los EVs del futuro (Zeng et al., 2019). En todo caso, es importante resaltar que estos mismos aspectos que hoy se resaltan como grandes mejoras relativas, junto con otros como la seguridad, el impacto ambiental, y la pérdidas de eficiencia a bajas temperaturas, siguen constituyendo una preocupación de la comunidad científica (Chen et al., 2022; Wenhua et al., 2021). Esta preocupación conlleva a que se generen de manera acelerada muchas investigaciones en el campo de los EVs. Por lo cual el desarrollo de estudios que evalúen la generación de los conocimientos en dicha materia es de gran importancia de cara a identificar tecnologías maduras, conocimientos emergentes, así como otros aspectos pocos abordados. A la vez, parece necesario identificar regiones, países, organizaciones y autores destacados, pero también regiones y países retrasados. En tal sentido la presente tesis tiene como uno de sus principales objetivos llevar a cabo una investigación para evaluar el estado de las tecnologías de los EVs en América latina (LATAM), basada en herramientas de análisis bibliométricos.

En general, se pueden encontrar estudios que evalúan los conocimientos sobre el campo de los EVs utilizando la bibliometría (Yong et al., 2015; Zou et al., 2023). Sin embargo, son poco frecuentes los estudios en este campo que aborden el desempeño científico de los países en vía de desarrollo, como es el caso de la región de LATAM. Por tanto, es relevante obtener resultados que permitan conocer el estado de avance de esta región, lo cual constituye una valiosa herramienta a la hora de desarrollar estrategias que incentiven la generación de nuevos conocimientos en los países más rezagados. El estudio “Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos” (Guevara-Ramírez et al., 2021), tiene como principal objetivo cubrir estas brechas, mediante el uso de métodos y herramientas bibliométricas e indicadores para el análisis de la producción científica.

1.3 Patentes sobre celdas y baterías de conversión electroquímica

Las celdas y baterías se han convertido en un elemento esencial para el funcionamiento de la vida moderna. Prácticamente forman parte de todos los sistemas que permiten el funcionamiento de la sociedad. Formando parte de los teléfonos, computadoras portátiles, aparatos domésticos electrónicos, los equipos y herramientas para el sector de la salud, y el sector militar. En el marco de la transformación energética, se puede considerar un componente clave de los sistemas más relevantes como son el almacenamiento de electricidad proveniente de las FER, los EVs, vehículos eléctricos de celdas de combustibles (EVFCs, por sus siglas en inglés) y el consumo/explotación de H₂V (Liu et al., 2022).

Los procesos y medios de conversión electroquímica son elementos fundamentales para el desarrollo de los EVs y los EVFCs debido a que cumplen con el objetivo de almacenar energía eléctrica y, por otra parte, transformar la energía almacenada en sustancias químicas en energía eléctrica (ejemplo el H₂ mediante celdas de combustibles) o viceversa. Por tanto, tienen gran relevancia para lograr el éxito en la transición energética, dado que son un eslabón

principal en los modelos energéticos en el marco de la descarbonización mundial. En correspondencia, la vigilancia y la gestión de la innovación en este campo es vital para lograr avances significativos en esta materia. En tal sentido, si se quiere avanzar significativamente en la promoción de dichos avances, es necesario realizar evaluaciones del progreso de estas tecnologías en los países menos desarrollados, como es el caso de los países latinoamericanos. Particularmente, las evaluaciones de los sistemas de innovación mediante el análisis de patentes en el campo de los medios de conversión y almacenamiento electroquímico son esenciales para brindar lineamientos claves para los gobiernos que tienen como objetivo avanzar en los modelos de transformación energética.

Aunque existen otros mecanismos para la protección de la innovación, como es el caso de licencias y derechos de autor, las patentes son unos de los mecanismos más usados para proteger y transferir las invenciones (Gallini, 2002). Esto ha permitido que el análisis de patentes se haya convertido en una de las principales métricas para analizar el desempeño innovador de los países e instituciones (Baumann et al., 2021; Ernst, 2003). Particularmente, este tipo de análisis basado en patentes constituye una herramienta de gran utilidad para determinar los impactos de las políticas ambientales en la evolución y/o cambios tecnológicos (Oltra & Saint, 2009; Popp, 2005).

Teniendo en cuenta todos estos elementos, se ha considerado relevante evaluar el desempeño innovador de la región LATAM en el campo de los elementos de conversión electroquímica a partir de las patentes publicadas en este espacio tecnológico en la región. Para ello, el artículo “Strategic management of patents on electrochemical conversion fuel cells and batteries in Latin America as a mechanism for moving towards energy sustainability” (Guevara-Ramírez et al., 2022), analiza la gestión estratégica de patentes de pilas y baterías de combustible de conversión electroquímica en América Latina, como mecanismo para avanzar hacia la sostenibilidad energética, focalizado específicamente en el caso de las LIB y las celdas de combustibles, al ser elementos clave para lograr la anhelada sostenibilidad energética. El estudio hace uso de métodos y herramientas del campo de la patentometría para llevar a cabo dicho análisis.

1.4 La conceptualización del hidrógeno verde

En la actualidad, existe una importante carrera que tiene por objetivo implementar y desarrollar tecnologías relacionadas con la producción de H_2 a partir de FER. Cada vez más países van identificando el gran potencial de este portador energético, lanzando estrategias sólidas para la producción de H_2V (IRENA, 2022). Sin embargo, al tratar de encontrar una definición para el H_2V , no se logra consensuar un concepto único o estandarizado (Velazquez & Dodds, 2020). Este problema se complejiza al encontrar términos como hidrógeno sustentable (H_2S), hidrógeno limpio (H_2L), hidrógeno renovable (H_2R), hidrógeno ecológico (H_2E), que en muchas ocasiones se utilizan como sinónimos del H_2V . Es por ello, se

considera importante avanzar en la comprensión y evolución de estos términos. Para ello, es relevante comprender las características de las tecnologías y fuentes de energías usadas para la producción de H₂. Particularmente, existe consenso en que el H₂V es obtenido a partir de FER. En todo caso, surge la interrogante si todas las energías renovables cumplen con los requisitos que permita la obtención de un portador energético con atributos para clasificarse como verde. Entendiendo que los procesos verdes están agrupando aquellas actividades con características superiores en cuanto al cumplimiento de los requisitos ambientales y de eficiencia.

El empleo del término “verde” puede llegar a convertirse en un concepto vacío si no se sustenta en parámetros que permitan delimitar los procesos y tecnologías verdes. En este caso, los indicadores de eficiencias pueden jugar un rol importante para avanzar en la definición de estos procesos. Dado que la eficiencia evalúa la relación entre los beneficios obtenidos y los recursos empleados (Fernández-Ríos & Sánchez, 1997). El empleo de mayores cantidades de factores productivos se traduce en una mayor huella de carbono, lo que significa una mayor cantidad de gases de efectos invernaderos emitidos por fuentes directas o indirectas asociado a la actividad (Cleveland & Morris, 2015; Wiedmann & Minx, 2008). En dichos casos, los indicadores pueden ser determinantes de cara a detectar la inviabilidad de aquellos “procesos ineficientes” que requieran de un mayor uso de factores productivos para obtener el mismo beneficio útil para la sociedad.

Existen varias FER que han ido ganando terreno en la producción de energía eléctrica, destacando la energía eólica, la solar, las biomasas y la geotérmica, entre otras (IEA et al., 2022; IRENA, 2020b). La producción de H₂ mediante electrolisis es la principal tecnología con la que se asocia el H₂V (alta calidad y cero emisiones) (Zhong et al., 2022). Para su funcionamiento requiere de energía eléctrica limpia y renovable (para el caso de H₂V) capaz de descomponer el agua (H₂O) en H₂ y oxígeno al pasar por los electrolizadores (Yu et al., 2021; Zhang, Shen, et al., 2021). Tanto la producción de energía eléctrica mediante FER, como la electrolisis presentan desafíos en cuanto a sus niveles de eficiencias (Xu et al., 2022; Zhong et al., 2022). Por tanto, la eficiencia alcanzada en estos dos procesos es fundamental para lograr una producción de H₂ sostenible. En el contexto de la presente tesis, se ha optado por evaluar las FER con potencial para producir la energía eléctrica necesaria generar H₂, mediante el rendimiento energético de la inversión (expresado en energía), identificado por el acrónimo EROI o EROEI por sus siglas en inglés (Jackson & Jackson, 2021; Raugei, 2019). Este indicador se define como la relación entre la energía total producida o devuelta por una fuente de energía y la energía invertida o consumida para obtenerla (Capellán-Pérez et al., 2019; Fabre, 2019; Hall et al., 2014; Walmsley et al., 2018; Wang et al., 2021). Por tanto, valores bajos del EROI podrían significar la inviabilidad del sistema energético, sobre todo cuando se trate de actividades no esenciales (Jackson & Jackson, 2021).

Existen numerosas investigaciones sobre el EROI, que muestran gran variabilidad en los resultados, dado entre otros aspectos, por las condiciones específicas del lugar analizado y el periodo de tiempo considerado para el proyecto (Walmsley et al., 2017). Bajo esta problemática existen estudios que empleando la metodología de metaanálisis se han encargado de sintetizar la información para facilitar la toma de decisión y la comprensión más amplia de los resultados de las diferentes investigaciones (Bhandari et al., 2015; Prananta & Kubiszewski, 2021; Walmsley et al., 2017). La revisión de los estudios de metaanálisis sobre el EROI existentes han servido como uno de los criterios para definir las FER que poseen un nivel de eficiencia como para ser incluidas dentro del ámbito de la producción de H₂V.

En resumen, se puede afirmar que la contextualización y clarificación del concepto H₂V es de suma importancia para cuidar y potenciar los atributos que se espera que ofrezca este vector energético, así como evitar futuras controversias en la comercialización del H₂ obtenido mediante diferentes procesos. Debido a las importantes brechas detectadas en este sentido, el artículo “Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies” (Guevara-Ramírez et al., 2023) responde a la necesidad de comprender y clarificar dicho concepto. Esto se ha realizado siguiendo los siguientes pasos: en primer lugar, se ha llevado a cabo un análisis bibliométrico de investigaciones sobre los términos utilizados para referirse al H₂ que han sido publicadas en revistas de impacto, específicamente aquellas indexadas en la Web of Science (WOS) y en Scopus; en segundo lugar, se han analizado los diferentes estudios de metaanálisis sobre el EROI; en tercer lugar, se ha realizado una revisión de las estrategias nacionales sobre H₂ publicadas entre 2019 y el 2020 según los reportes de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) (IEA, 2021b; IRENA, 2020a).

2. Marco teórico

En este apartado se realiza una revisión bibliográfica de los elementos teóricos generales que soportan esta tesis. Es de destacar que, de manera particular en cada una de las publicaciones que soportan la presente tesis, se han ido abordando aspectos más específicos directamente relacionados con cada uno de los temas abordados.

2.1 Bibliometría- cienciometría

El primer aspecto teórico relevante por tratar es la bibliometría. En un libro publicado por la editorial UNECO (Spinak, 1996), se presenta un Diccionario Enciclopédico de Bibliometría, Cienciometría e Informetría, que contiene las definiciones más relevantes usadas en la bibliometría y cienciometría. El autor atribuye el término “bibliometría” a Pritchard (1969), e indica que este fue el que sugirió remplazar el término “bibliografía estadística”, al

considerarlo confuso, dado que podría ser interpretado erróneamente como bibliografía sobre estadística. En su lugar, propuso el término bibliometría, como “la aplicación de las matemáticas y los métodos estadísticos para analizar el curso de la comunicación escrita y el curso de una disciplina”. Específicamente el primer estudio con esas características se atribuye a Colé & Eales (1917) (Araújo-Ruiz & Arencibia, 2002; Spinak, 1996).

En Spinak (1996), se pueden encontrar otras definiciones sobre bibliometría, pero en general se refieren al “análisis estadístico”, “estudio cualitativo”, “aplicación de métodos matemáticos y estadísticos” de documentos, libros o unidades físicas publicadas. Otra definición encontrada en Araújo-Ruiz & Arencibia, (2002), la define como la ciencia que “estudia los aspectos cuantitativos de la producción, diseminación y uso de la información registrada, a cuyo efecto desarrolla modelos y medidas matemáticas que, a su vez, sirven para hacer pronósticos y tomar decisiones en torno a dichos procesos” (Araújo-Ruiz & Arencibia, 2002).

En el caso del término cienciometría, este fue promovido en USA por Derek de Solía Price, en la primera década de la segunda mitad del siglo XX. Este término se empezó a utilizar en sustitución de “ciencia de la ciencia”. En este caso utilizando técnicas bibliométricas para estudiar el comportamiento de la ciencia (Spinak, 1996).

Algunos autores hacen mención directa a la cienciometría o bibliometría como si fueran sinónimos y definiéndolo como el estudio cuantitativo de la producción de artículos científicos, para evaluar el progreso, la estructura, las tendencias de investigación y relaciones entre la actividad científica (Michán & Muñoz-Velasco, 2013).

Sin embargo Spinak (1996), plantea que existen diferencias entre los términos bibliometría y cienciometría, atribuyendo al alcance de este último a las siguientes cuestiones:

- El análisis del desarrollo de las políticas científicas.
- El desarrollo cuantitativo de la ciencia.
- La relación entre ciencia y tecnología.
- La evolución de los paradigmas científicos, considerando campos obsoletos y nuevas tendencias.
- Las relaciones entre los investigadores.
- La productividad científica.
- El desarrollo científico y su relación con las variables del crecimiento económico.
- Las comparaciones entre las políticas de investigación de las naciones considerando aspectos económicos y sociales.

La revista *Scientometrics*, es una prestigiosa revista de alto impacto, que se puede considerar como una de la más especializada en la temática de la cienciometría. En relación a su alcance,

se define como una revista que trata “todos los aspectos cuantitativos de la ciencia de la ciencia, la comunicación en la ciencia y la política científica” (Scientometrics, 2022).

Las definiciones de bibliometría vs cienciometría colocan a la bibliometría como uno de los métodos empleado para hacer análisis de la cienciometría (Vinkler, 2001). Es decir, aunque el uso de la bibliometría no se limita al análisis de la ciencia, su uso entre los investigadores apunta al análisis de información científica (Abdelhamid, 2021; Jiménez-Castro et al., 2020; Osman et al., 2020). Por otra parte, la cienciometría considera además la evaluación de las políticas científicas que es un aspecto no cubierto por la bibliometría. A pesar de que son marcadas las diferencias y los aspectos comunes, la bibliometría se ha generalizado como la metodología para realizar evaluaciones de la productividad científica.

A pesar de estas diferencias, ¿Por qué se confunde la bibliometría y la cienciometría? La respuesta es que, la bibliometría se ha centrado fundamentalmente en el análisis de la información científica desarrollando numerosos métodos de análisis cuantitativos que permiten realizar caracterizaciones cienciométricas en cualquier campo de la ciencia, como ejemplo se pueden citar: la economía circular (Geissdoerfer et al., 2017), las lesiones musculoesqueléticas (Dias et al., 2012), las tendencias de investigación emergentes de COVID-19 (Verma & Gustafsson, 2020), entre muchos otros. En tal sentido, Sancho (1990), menciona una serie de variables que se pueden evaluar mediante indicadores bibliométricos sobre los que existen una amplia variedad de investigaciones recientes que reflejan su uso (Agyekum et al., 2022; Alvarez-Meaza et al., 2020; Barbosa et al., 2022; Zhou et al., 2022). A continuación, se mencionan cuáles son dichas variables:

- El crecimiento del número de artículos publicados en un campo específico de la ciencia. Este aspecto forma parte elemental de muchos análisis bibliométricos.
- El nivel de madurez de una temática específica, es decir la “vida media” del conjunto de publicaciones entorno al campo analizado.
- La producción de artículos, como reflejo de la productividad científica de los países, organizaciones y autores.
- La colaboración científica medida por el número de autores, el número de organizaciones o número de países, y la frecuencia con que estos colaboran en el desarrollo de investigaciones publicadas.
- La relevancia, impacto y/o visibilidad de las publicaciones en el entorno científico y/o académico, dado por la cantidad de citas acumuladas.
- El impacto del canal de difusión, es decir las revistas que publican las investigaciones. Estas son evaluadas de manera periódicas mediante el factor de impacto, que es una métrica que mide el impacto global de todo el conjunto de publicaciones científicas publicadas en una revista en un campo específico.

Las investigaciones bibliométricas permiten visualizar un campo del conocimiento, mostrando los principales indicadores que permiten la comprensión rápida, fácil e intuitiva de la temática estudiada (Garechana et al., 2012). Tanto en el campo de los EVs como para el H₂ se han desarrollado estudios con el fin de facilitar el trabajo de investigadores y tomadores de decisión en los diferentes ámbitos que caracterizan estas temáticas. Para reflejar el trabajo realizado en este sentido se ha realizado una revisión de las investigaciones realizadas en estos dos campos. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las investigaciones sobre los EVs utilizando bibliometría. Para lo cual se realizó una búsqueda en la Web of Science, utilizando los términos de búsqueda bibliometric y Electric vehicle, en los campos título y palabras clave: ((TI=(bibliometric)) OR AK=(bibliometric)) AND AK= ("Electric vehicle*") y ((TI=(bibliometric)) OR AK=(bibliometric)) AND TI= ("Electric vehicle*").

Tabla 1: Resumen de las investigaciones sobre los EVs utilizando bibliometría.

Titulo	Objetivo o alcance	Fuente	Cita
Electric Vehicles: Bibliometric Analysis of the Current State of the Art and Perspectives.	En este estudio se evalúan las tecnologías de los vehículos eléctricos (EVs) en general, utilizando el término de búsqueda "vehículo eléctrico". Determinaron que los aspectos más tratados en los últimos 20 años son la gestión y el almacenamiento de energía, la infraestructura, los sistemas de carga y las cuestiones medioambientales.	Web of Science	(Barbosa et al., 2022)
Analysis of Electric Vehicle Battery State Estimation Using Scopus and Web of Science Databases from 2000 to 2021: A Bibliometric Study	Esta investigación estudia el estado de las baterías en EVs, para ellos utilizaron los términos "sistema de gestión de batería" y "vehículo eléctrico"	Scopus y Web of Science	(Swarnkar et al., 2022)
Electric vehicles' consumer behaviours: Mapping the field and providing a research agenda	Los autores evalúan las publicaciones sobre el comportamiento del consumidor en el mercado de los EVs. Los términos de búsqueda consideraron: 'Comportamiento del consumidor*' O	Scopus, y también se realizó un análisis respecto a la Web of Science	(Secinaro et al., 2022)

	'Comportamiento del cliente*' O 'Comprador*' Y 'Coche eléctrico*' O 'Vehículo eléctrico*'. 		
New Paradigm of Sustainable Urban Mobility: Electric and Autonomous Vehicles—A Review and Bibliometric Analysis.	Esta publicación brinda una descripción sobre los EVs autónomos, para lo cual se utilizaron las palabras clave “movilidad urbana”, “vehículos eléctricos”, y “vehículos autónomos”.	Scopus y Web of Science	(Kovačić et al., 2022)
Thermal management system of lithium-ion battery packs for electric vehicles: An insight based on bibliometric study.	En este caso se evalúan los artículos científicos en el campo del sistema de gestión térmica (TMS) de los paquetes de baterías de EVs. Encontraron que el campo de los TMS de las LIB ha crecido rápidamente, pero solo en algunos países.	Scopus	(Murugan et al., 2022)
Optimized Energy Management Schemes for Electric Vehicle Applications: A Bibliometric Analysis towards Future Trends.	Esta publicación realiza un análisis sobre esquemas de gestión de energía (EMS) optimizados para aplicaciones EV. En este análisis bibliométrico también se realiza una encuesta sobre los EMS relacionados con las aplicaciones de EVs, es decir los “sistemas de almacenamiento de baterías, modelos, algoritmos, marcos, optimizaciones, convertidores, controladores y sistemas de transmisión de energía”.	Scopus	(Miah et al., 2021)
A comprehensive assessment of the techno-socio-economic research growth in electric vehicles using bibliometric analysis.	Este estudio analiza de forma general los EVs, basado en las publicaciones hasta el año 2020.	Web of Science	(Pinto et al., 2022)
Global research on the air quality status in response to the electrification of vehicles.	Este trabajo se centra en analizar el papel de los EVs en la mejora de la calidad del aire	Web of Science	(Bao et al., 2021)

	y la reducción de la contaminación del aire. Para ello utilizaron las palabras clave "vehículos eléctricos" y "calidad del aire" ajustado al período de 1974 a 2021.		
Fuel-Cell Electric Vehicles: Plotting a Scientific and Technological Knowledge Map	Esta investigación analiza el desarrollo tecnológico en el campo de los EVs de pila de combustible FCEV en el periodo 1999- 2019. En este caso utilizaron las publicaciones científicas en este campo y las publicaciones de patentes. Esto les permitió concluir a los autores que los FCEV han alcanzado la madurez tecnológica.	Scopus y Lens	(Alvarez-Meaza et al., 2020)
Life Cycle Cost Assessment of Electric Vehicles: A Review and Bibliometric Analysis	En esta revisión se examinan las publicaciones sobre el análisis del costo del ciclo de vida (LCCA) de EVs. En este caso utilizaron los términos de búsqueda: “costo del ciclo de vida de los vehículos eléctricos”; “análisis del coste del ciclo de vida de los vehículos eléctricos”; “evaluación del costo del ciclo de vida de los vehículos eléctricos”; y “análisis de costes de vehículos eléctricos”.	Scopus y Web of Science	(Ayodele & Mustapa, 2020)
Characteristics and Trends of Research on New Energy Vehicle Reliability Based on the Web of Science	En este estudio los autores analizan las publicaciones sobre el tema de la confiabilidad del sistema de carga de los EVs en el periodo de 1998 al 2017. Concluyen que los estudios en este campo seguirán desarrollándose rápidamente en los próximos años.	Web of Science	(Zhao et al., 2018)

Fuente: Elaboración propia con información de la Web of Science, 2023.

La revisión desarrollada sobre análisis bibliométricos en el campo de los EVs permitió identificar investigaciones en varios campos relevantes para el desarrollo de esta tecnología. Sin embargo, no se muestra ninguna que promueva o focalice la necesidad de avanzar en los diferentes campos de los EVs en los países en vía de desarrollo.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las investigaciones sobre hidrógeno, utilizando bibliometría. Para la búsqueda se utilizó la Web of Science, explorando el campo título y palabras clave de autor para las combinaciones entre bibliometric and hydrogen (((TI=(bibliometric)) OR AK=(bibliometric)) AND TI=(Hydrogen)) y (((TI=(bibliometric)) OR AK=(bibliometric)) AND AK=(Hydrogen)).

Tabla 2: Resumen de las investigaciones sobre hidrógeno utilizando bibliometría.

Titulo	Objetivo o alcance	Fuente	Cita
A Bibliometric and Visualized Overview of Hydrogen Embrittlement from 1997 to 2022.	Se estudian el conjunto de investigaciones que traten los daño que produce el hidrógeno, que conduce a la creación y propagación de micro fisuras en los materiales, lo que provoca la disminución de las propiedades mecánicas, como la dureza y la plasticidad. Para esto se utilizaron los términos de búsqueda siguientes: "fragilización por hidrógeno" (HE), "agrietamiento inducido por hidrógeno", "agrietamiento asistido por hidrógeno", "atrapamiento de hidrógeno", "daño por hidrógeno", "fractura inducida por hidrógeno", y "fragilización inducida por hidrógeno".	Web of Science	(Zhou et al., 2022)
Hydrogen energy storage integrated battery and supercapacitor based hybrid power system: A statistical analysis towards future research directions.	Los autores realizan un análisis cuantitativo de los conocimientos sobre el almacenamiento de energía de hidrógeno aplicando métodos matemáticos y estadísticos.	Scopus	(Hannan et al., 2022)
Research Priorities and Trends on Bioenergy:	Se determinan los temas prioritarios y las tendencias de desarrollo de la	Web of Science	(Yuan et al., 2022)

Insights from Bibliometric Analysis.	tecnología bioenergética, basado en las publicaciones sobre este campo desde el año 2000 al 2020.		
Progress in the production of hydrogen energy from food waste: A bibliometric analysis.	En este estudio se presenta el estado actual y tendencias futuras de las investigaciones de los métodos de producción de hidrógeno a partir del desperdicio de alimentos.	Scopus	(Sridhar et al., 2022)
Research Progress, Trends, and Current State of Development on PEMFC-New Insights from a Bibliometric Analysis and Characteristics of Two Decades of Research Output.	En este estudio se proporciona una evaluación integral de las tendencias de investigación y el estado actual de desarrollo en el campo de las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC).	Scopus	(Agyekum et al., 2022)
Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions.	Este documento presenta una revisión detallada de las publicaciones más citadas sobre sistemas de almacenamiento de energía (HydESS) para obtener una visión detallada de las direcciones y aplicaciones futuras.	Scopus	(Arsad et al., 2022)
Bibliometric studies and impediments to valorization of dry reforming of methane for hydrogen production.	Este artículo presenta un análisis bibliométrico de búsquedas entre 1970 y 2022 utilizando VOSviewer junto con R-studio usando como términos de búsqueda "Valorización" y "Reformado seco de metano". Evalúan las perspectivas para la producción de hidrógeno a partir de este método.	Web of Science	(Alhassan et al., 2022)
A bibliometric study on research trends in hydrogen safety	Los autores proporcionan un análisis sobre las publicaciones relacionadas con la seguridad del hidrógeno. Determinando que los términos candentes en este campo son: almacenamiento y detección, combustión y explosión, e ignición y propagación.	Web of Science	(Wei et al., 2022)
Bibliometric analysis of the research on hydrogen	En esta investigación se proporciona un análisis cuantitativo sobre las	Scopus	(Kar et al., 2022)

economy: An analysis of current findings and roadmap ahead	tendencias de investigación en la economía del hidrógeno. Concluye que se espera el desarrollo de nuevas investigaciones en los relacionados con el transporte por tuberías, los estudios de evaluación de riesgos, la mezcla, la seguridad pública y la mitigación de riesgos.		
Use of patents as a tool to map the technological development involving the hydrogen economy	Esta investigación a diferencia de las anteriormente relacionadas utilizó patentes con el objetivo de mapear la economía del hidrógeno a través de la consulta de patentes en el período 1998-2018.	Questel Orbit	(Sinigaglia et al., 2019)
Technology forecasting of new clean energy: The example of hydrogen energy and fuel cell	En este estudio se presentan las curvas S tecnológicas para la energía del hidrógeno y las tecnologías de celdas de combustible mediante el análisis bibliométrico y el uso de patentes considerando aspectos tales como la generación, almacenamiento, celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), celda de combustible de óxido sólido (SOFC) y celda de combustible de metanol directo/celda de combustible de alcohol directo (DMFC/DAFC). Se concluyó en el 2010 que las tecnologías para generar y almacenar H ₂ aun no alcanzaban la madurez, pero que las celdas están entrando a la madurez.	Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos (USPTO por sus siglas en inglés)	(Y.-H. Chen et al., 2010)
A bibliometric analysis of hydrogen energy literature, 1965–2005.	Esta investigación proporciona un análisis de las características de las publicaciones científicas sobre energía del hidrógeno desde 1965 hasta 2005. Evidenciaron que este campo crece exponencialmente con una tasa de crecimiento promedio anual de alrededor del 18% durante esa última década.	Science Citation Index Expanded (SCIE)	(Ming-Yueh, 2008)

Fuente: Elaboración propia con información de la Web of Science, 2023.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, existe una marcada tendencia al uso específico de publicaciones científicas para realizar investigaciones de carácter bibliométrico, solo dos estudios que usan patentes fueron indexado como análisis bibliométricos, lo que indica un mayor uso de la bibliometría de publicaciones respecto a la bibliometría de patentes. Esto puede explicarse en parte porque la bibliometría de patentes se conoce y se indexa en muchos casos como “patentometría” (Díaz-Pérez & De Moya-Anegón, 2008). En cuanto la base de datos o fuente utilizada, se utilizan la Web of Science o Scopus indistintamente, en muchos casos sin una justificación del porque se utiliza uno u otro. La selección de la base de datos es fundamental ya que pueden existir en algunos casos diferencias en cuanto al número de documentos y otros parámetros bibliométricos (Mongeon & Paul-Hus, 2016). Por último, se identifica que en el año 2022 estos estudios fueron llevado a cabo con mayor frecuencia, y aunque se abordaron varios campos de gran significancia para el desarrollo del H₂, no se identificó ninguno que se centrara en analizar los aspectos conceptuales tales como hidrógeno (verde, sustentable, renovable, limpio, ecológico, entre otros).

2.2. Patentometría

En el presente apartado se explica el significado del concepto de patentometría, así como sus principales herramientas y técnicas de análisis.

2.2.1. El estudio de las patentes

Otro aspecto relevante en el desarrollo de la investigación realizada es el estudio de patentes. La patentometría también conocida como bibliometría de patentes, o análisis estadístico de patentes, se encarga de la evaluación de los registros de invenciones e innovaciones provenientes de países, instituciones, e inventores para un campo tecnológico específico (Díaz-Pérez & De Moya-Anegón, 2008; Mirzadeh et al., 2020; Xi & Xiang, 2020). Si bien una patente es un mecanismo de propiedad intelectual que se convierte en una protección jurídica de las invenciones; en la práctica asociado a cada patente se genera un documento que describe los elementos técnicos de la invención y otros campos correspondientes al registro de la autoría e indexación que son asociados a una clasificación según la estructura de la Clasificación Internacional de Patentes (IPC, por sus siglas en inglés) de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO, por sus siglas en inglés) (The Contracting Parties, 1979). Esta clasificación segmenta el registro de patentes en ocho secciones, de la "A" a la "H", que a su vez se subdividen en clases, subclases, grupos y subgrupos, lo que facilita la búsqueda de un campo específico (WIPO, 2022).

Las patentes son consideradas una forma de divulgación de conocimientos protegidos hacia otras partes interesadas en su explotación (Gallini, 2002). La creciente generación de estos documentos protegidos ha significado un aumento de las investigaciones que utilizan datos de documentación de patentes para capturar información tecnológica de diferentes áreas

industriales (Choi & Song, 2018). Para ello existen los sistemas de clasificación que crean registros que agrupan los avances para los diferentes campos tecnológicos (Jürgens & Herrero-Solana, 2017). Además, dado que los inventores pueden solicitar patentes en varios países, también se puede rastrear la difusión de tecnologías entre países (Popp, 2005).

Estos registros de patentes contienen información tecnológica relevante, la cual se puede utilizar para monitorear a los competidores, evaluar tecnologías, administrar la cartera de I+D y rastrear y evaluar las fuentes potenciales para la generación externa de conocimiento tecnológico (Nam & Kim, 2017). Por tanto, el recuento de patentes es una métrica importante para evaluar tecnologías y la capacidad innovadora y tecnológica de empresas y países (Popp, 2005; Yang et al., 2019).

Los registros de patente están siendo utilizados para estudiar aspectos relacionados con la capacidad innovadora de los países y las organizaciones en los diferentes ámbitos, político, económico, social, tecnológico, ambiental y legal (Hayter & Rooksby, 2016; Hou et al., 2022; Popp, 2003; Prasad, 2016; Young, 2016). Particularmente, las problemáticas ambientales han sido ampliamente estudiadas mediante el análisis de patente. A continuación, se relacionan algunos ejemplos relevantes de investigaciones en este campo: i) Lanjouw & Mody (1996) utilizando datos de patentes de USA, Japón, Alemania y otros 14 países de ingresos bajos y medianos, concluyeron que la innovación respetuosa con el medio ambiente aumenta a medida que aumentan los gastos de reducción de la contaminación en el país. Demostrando que en los países desarrollados la mayoría de estas patentes son nacionales. Por el contrario, los países en desarrollo, adoptan patentes desde países extranjeros, por lo cual destacan la importancia de la difusión (Lanjouw y Mody, 1996); ii) Marinova & McAleer (2006) analizaron las tendencias en el patentamiento de tecnologías de prevención y reducción de la contaminación o antipolución en USA, mediante indicadores de fortaleza de la innovación. Este estudio resalta el rol de las patentes extranjeras en este campo en USA, particularmente de Japón y Francia.

En el caso de las tecnologías abarcadas en el campo de los EVs, que son consideradas de vital importancia para lograr una reducción de la contaminación, al igual que las pilas de combustible, encontramos el estudio de Mueller et al. (2015), donde se determina que el patentamiento de tecnologías de litio muestra una tasa sorprendentemente alta en comparación con otros tipos de baterías. Por su parte, el estudio de Baumann et al. (2021), determinó que las tecnologías de conversión termoquímica de biomasa (bioenergía), almacenamiento en LIB y producción de hidrógeno por electrólisis de agua alcalina, han aumentado considerablemente en el contexto de la transformación energética mundial.

Por otra parte, para el caso de las pilas de combustibles, encontramos el estudio de Chen et al. (2011), que utilizando información sobre publicaciones científicas y patentometría sobre las tecnologías de pila de combustible y energía del H₂, presentó las “curvas S” tecnológicas

definiendo que aún no habían alcanzado la madurez tecnológica en el 2011. Mas recientemente, el estudio de Alvarez-Meaza et al. (2020), se ha enfocado en predecir las trayectorias futuras de las tendencias de investigación y los escenarios previsibles de estas tecnologías. Por su parte, Tsang et al. (2015), estudió las tecnologías emergentes de las celdas de combustibles utilizando datos de la Oficina de Patentes y Marcas de USA en el periodo 1976 al 2011 para los códigos H01M008/00~H01M008/24, enfocándose en la supervivencia de las patentes, es decir, en su renovación en el tiempo.

En el caso de Choi & Woo (2022), se evaluaron las patentes de tecnologías de H₂ en la década (2010-2019) utilizando la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos (USPTO). En este caso, aplicando un índice de enfoque tecnológico, encontraron que el principal enfoque tecnológico hacia las tecnologías de celdas de combustible, es por parte de Corea del Sur y Japón, en tanto para las tecnologías de producción de H₂ el mayor enfoque es por parte de Francia y USA.

En general, entre las herramientas que se emplean para el análisis de patentes podemos encontrar la minería de datos, análisis de redes, indicadores y la evolución y previsión tecnológica mediante las “curvas S” (Alvarez-Meaza et al., 2020; Baumann et al., 2021; H. Choi & Woo, 2022; Ma et al., 2022; Tsang et al., 2015).

2.2.2. Métodos y herramientas de análisis

A continuación, se presentan las herramientas de análisis más importantes en el campo de la patentometría:

2.2.2.1. Minería de datos

La minería de datos o minería tecnológica, es una manera de análisis de "Big Data" enfocada hacia la exploración de textos, buscando generar conocimiento útil a partir del análisis de la información de ciencia, tecnología e innovación, con el fin de entregar elementos que favorezcan la toma de decisiones en los campos de la gestión de la innovación e investigación tecnológica (Huang et al., 2022; Porter & Cunningham, 2005). El empleo de herramientas de minería de datos (tech mining) utilizando bases de datos sobre ciencia y tecnología, sirve para captar información cuantitativa que permitan pronosticar los escenarios futuros de la actividad tecnológica y los procesos de innovación (Garechana et al., 2012). Los investigadores exploran información tecnológica cuantitativa en base de datos de patentes, artículos académicos, e informes técnicos empleando la minería de datos (Lahoti et al., 2018).

2.2.2.2 Análisis de redes, e indicadores de centralidad

Otra herramienta metodológica que presenta especial relevancia en el análisis de patentes son las relaciones que se forman en cuanto a diferentes aspectos, tales como, inventores,

organizaciones, países, temas, etc. El conjunto de relaciones tecnológicas en un campo se conoce como espacio tecnológico, el cual se puede mapear utilizando datos de documentos de patentes a partir de la exploración de sus metadatos (Alstott et al., 2017).

Estas redes o mapas de redes facilitan la comprensión de las relaciones tecnológicas y su interacción con los grupos de interés (Alstott et al., 2017). Las nuevas tecnologías informáticas tales como, Pajek, Ucinet, CiteSpace, Gephi, VOSviewer entre otros, permiten presentar estas relaciones facilitando su interpretación visual (Song et al., 2020; Van Eck & Waltman, 2020; Zhang, Wong, et al., 2021). Sin embargo, un análisis cuantitativo más robusto se logra cuando se utilizan los indicadores de análisis de redes que incluye entre otros, el grado de centralidad y el grado de centralidad ponderado (Lee et al., 2022; Pu et al., 2022; Zhang, Wong, et al., 2021). El primero cuantifica el número de nodos conectados a un nodo de red específico, y el segundo considera además el número de enlaces entre un nodo y otro, tanto de entrada como de salida.

2.2.2.3. Curva S

La curva S es una metodología de análisis para la evolución y previsión tecnológica. Es considerada una de las herramientas más utilizadas para analizar la velocidad de adopción, madurez, pronóstico y evolución tecnológica. Este método gráfico permite evaluar una tecnología en función del número de publicaciones científicas y/o publicaciones de patentes (Mao et al., 2022). El análisis de la evolución tecnológica permite ubicar a una tecnología evaluada en una de las cuatro etapas: emergencia, crecimiento, madurez y saturación. Al mismo tiempo, permite pronosticar cuándo se alcanzará la siguiente etapa cuando aún no se haya alcanzado la etapa de saturación (Baumann et al., 2021; Chanchetti et al., 2019). Se pueden encontrar descripciones detalladas del método de la curva S en Baumann et al. (2021) y Chanchetti et al. (2019). En rigor, este método permite determinar la etapa del ciclo de vida en que se encuentra una tecnología, a partir de la cual se puede estimar la trayectoria futura de esta (Altuntas et al., 2015).

2.3 Retorno de la inversión en energía (EROI)

Como se ha indicado en el apartado introducción, el EROI es una métrica fundamental dentro de esta investigación. Es fácil encontrar una conceptualización estandarizada sobre este indicador. En esencia, se define como la relación entre la energía producida, entregada o devuelta por un proceso y la energía requerida, invertida, o utilizada para su producción (Arvesen & Hertwich, 2015; Hall et al., 2014; Jackson & Jackson, 2021). El EROI como métrica, es un símil en término de energía a los conceptos de productividad y eficiencia, que indica que cuando se alcanzan determinados niveles (bajos), los sistemas energéticos se vuelven inviable (Brandt, 2017). Algunos investigadores consideran que un valor del EROI entre 3:1 y 10:1 pueden generar inestabilidad económica. (Brandt, 2017; Hall et al., 2009;

Murphy & Hall, 2010). Al respecto, una escala más detallada para la clasificación del EROI se puede encontrar en las investigaciones de Capellán-Pérez et al. (2019), de Blas et al. (2019) y de Prananta & Kubiszewski (2021).

El EROI es una métrica que ha centrado la atención de muchos investigadores. Lo que ha permitido que el número de artículos sobre este campo sea significativo. Sin embargo, no se han encontrado investigaciones que realicen estimaciones sobre el H₂ en base a este indicador. Por tanto, para el caso del H₂V, al considerar las FER como un elemento esencial para alimentar los electrolizadores, se ha optado por considerar los valores del EROI relativos a estas fuentes de energía como potenciales estimadores complementarios. Esto no quiere decir que el EROI del H₂ sea equivalente al de las FERs utilizadas, pero naturalmente existe una relación directa entre estos. Es de destacar que también es importante considerar, entre otros aspectos, la eficiencia de los electrolizadores (Mori et al., 2014).

2.4. Metaanálisis

En la actualidad existe un crecimiento exponencial en el número de investigaciones publicadas en muchas áreas de las ciencias. Lo cual genera grandes beneficios en cuanto a la generación de nuevos conocimientos e información útil para los procesos de toma de decisión. Sin embargo, este gran volumen de información complejiza el uso o aceptación del conjunto de resultados. En respuesta a esta situación han surgido los estudios metaanálisis que tienen como propósito recolectar y analizar toda la información útil, sobre un tema específico, con el fin de estandarizarla y sintetizarla a través de herramientas de calidad metodológica (Bolaños & Calderón, 2014). También Lassere (2020), se refiere al metaanálisis como el “análisis estadístico de los resultados de estudios individuales con el propósito de integrar los hallazgos”. Esta herramienta metodológica ha sido ampliamente utilizada y difundida en las ciencias de la salud e investigación clínica, extendiéndose progresivamente a otras áreas como la evaluación del ciclo de vida (ACV) y el EROI que pertenecen al campo del análisis energético (Bhandari et al., 2015; Walmsley et al., 2018).

3. Herramientas metodológicas

3.1 Fuentes de datos

Los datos utilizados para cada uno de los artículos se resumen en el esquema presentado en la figura 3. Se utilizaron cuatro fuentes de información. La base de conocimiento Scopus (Elsevier), la base de conocimiento Web of Science (WOS) (Clarivate Analytics), las páginas web de los ministerios encargados de publicar las estrategias sobre H₂, y la aplicación web PatSeer Pro (Gridlogics), opción denominada Quick stats.

Scopus y la WOS tienen los servicios de indexación más confiables e influyentes de la ciencia, razón por la cual son los más utilizados para investigaciones bibliométricas. La base

de conocimiento Scopus es un producto de Elsevier que cubre más de 240 disciplinas e indexa contenido proveniente de más de 7000 editores, el cual es examinado y seleccionado rigurosamente por expertos. Esto le permite brindar una cobertura integral de contenidos, datos de alta calidad y herramientas analíticas y de búsqueda precisas (Elsevier, 2023). La WOS es una base de datos de conocimiento de Clarivate Analytics, que indexa las 9200 revistas más impactantes del mundo perteneciente a 178 disciplinas. Está compuesto de seis índices donde se agrupan a las revistas de más alta calidad e impacto del mundo (Clarivate, 2023). Existen diferencias entre estas dos bases de conocimiento en cuanto a la cobertura y la cantidad de citas, las que varían de acuerdo con la disciplina científica analizada (Aviv-Reuven & Rosenfeld, 2023; Bar-Ilan, 2010). Por tanto, se considera que el análisis y selección de la base de datos es un elemento fundamental dentro los estudios bibliométricos.

Por su parte, PatSeer es un producto de Gridlogics que presenta una plataforma completa de mapeo y análisis de patentes. Utilizan las técnicas más modernas para recuperación de información, extracción de datos y visualizaciones que permite obtener gran cantidad de datos de patentes desarrollando análisis inteligentes (Sinha & Pandurangi, 2016).

A continuación, se indica de manera específica la base de datos empleada en cada artículo:

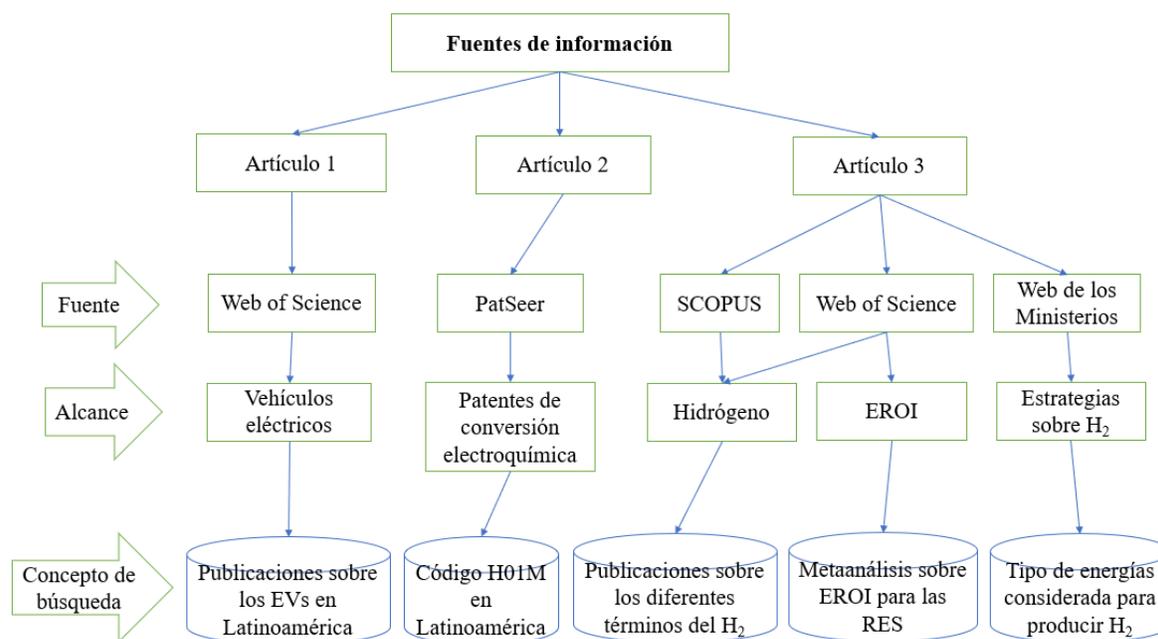
En el caso del primer artículo (**P1**), la información utilizada correspondió a los artículos publicados para el campo de los EVs por los países latinoamericanos, utilizando la base de conocimiento WOS.

En el segundo artículo (**P2**) se obtuvo la información sobre patentes sobre “PROCESOS O MEDIOS, Ej. BATERIAS, PARA LA CONVERSIÓN DIRECTA DE ENERGÍA QUÍMICA EN ENERGÍA ELÉCTRICA” la cual es indexada bajo el código H01M de la Clasificación Internacional de Patentes (IPC por su siglas en inglés) perteneciente a la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO, 2021, 2022). En este caso se filtró solamente para los países latinoamericanos (oficina Latipat). Para el periodo de tiempo no se aplicaron filtros por años.

Finalmente, en el caso de la tercera publicación (**P3**) se recopilaron artículos de Scopus y WOS sobre los conceptos relacionados al H₂V, es decir H₂S, H₂L, H₂R, H₂E. La WOS fue utilizada además para recopilar los artículos que contenían información referente a estudios metaanálisis sobre el EROI para las diferentes FER. También se utilizó la información contenida en las estrategias sobre H₂ publicadas hasta el año 2020, la que normalmente están disponibles en las páginas de los ministerios u organismos encargado de la gestión energética en cada país.

Una descripción más detallada del tratamiento de las fuentes de información se puede encontrar en cada uno de los artículos citados.

Figura 3: Resumen de la estructura de las fuentes de información utilizada en cada artículo.

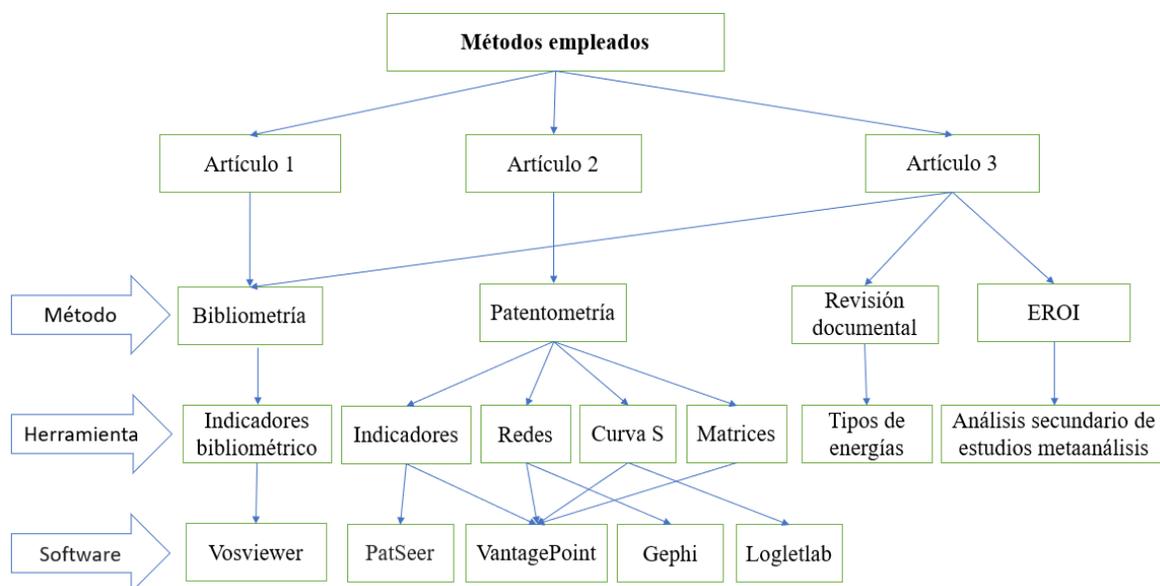


Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.2 Métodos

En general, tras una profunda revisión bibliográfica, para el desarrollo de los tres artículos se han utilizado herramientas de análisis estadísticos, la cienciaometría, la bibliometría y la patentometría. Adicionalmente, se han utilizado indicadores bibliométricos, indicadores de centralidad y el EROI, entre otros. La metodología aplicada se explica de forma exhaustiva dentro de cada uno de los artículos, según la estructura presentada en la Figura 4.

Figura 4: Resumen de la estructura de las herramientas metodológicas utilizadas en cada artículo.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Artículo 1: (Guevara-Ramírez et al., 2021).

En el primer artículo, con el fin de caracterizar los flujos de conocimiento en LATAM para el campo de los EVs, se emplearon indicadores bibliométricos, mapas de conocimientos y análisis correlacional.

El estudio bibliométrico incorporó el análisis de la evolución en el número de artículos en el tiempo, análisis de citas, autorías y colaboración, por países, organizaciones y autores, el análisis del factor de impacto de las revistas donde publican los autores latinoamericanos y el análisis de los temas candentes mediante el mapa de palabras clave. Los mapas utilizados se construyeron mediante el software gratuito VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2020).

Además, se aplicó el indicador de especialización científica o índice de actividad (IA) (Schubert et al., 1989), con el fin de analizar la producción científica de los países para el tema analizado de manera estandarizada. Este índice considera la producción mundial de publicaciones del tema específico y el total de todas las publicaciones en todos los ámbitos del conocimiento, lo que permite realizar comparaciones de manera objetiva. Su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación (1):

$$IA_{iK} = \frac{(p_{ik}/p_i)}{(P_k/P)} * 100 \quad (1)$$

Donde:

IA_{ik} : Índice de actividad científica del país i en la temática K .

p_{ik} : Producción en cantidad de documento del país i en la temática k .

p_i : Producción total de documentos del país i .

P_k : Producción en cantidad de documento en el mundo para la temática k .

P : Producción total de documentos en el mundo para todas las temáticas.

Cuando el IA es mayor a 100, se considera que el país tiene especialización en el tema.

Finalmente, en este artículo se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para identificar la relación existente entre la productividad científica en la temática de los EVs en cada país y la cantidad de publicaciones sobre EVs financiadas por las principales agencias de promoción científica estatal de cada país analizado.

Artículo 2: (Guevara-Ramírez et al., 2022)

En el segundo artículo, se evaluó la dinámica de los flujos de patentes sobre baterías y celdas de combustibles hacia y dentro de LATAM, siendo que estas son un componente esencial para el desarrollo masivo de los EVs. Las principales herramientas utilizadas son: el análisis de redes e indicadores de centralidad, indicadores para el análisis de patentes obtenido mediante la minería de datos y el uso de las curvas tecnológicas (curva S). Además, en este estudio se diseñó y aplicó un indicador para determinar la relación de las patentes con atributos sustentables es decir “Patentes amigables con tecnologías sustentables” (PFST por sus siglas en inglés) y una Matriz de adopción tecnológica (TAM, por sus siglas en inglés). Para este estudio se utilizaron los softwares Gephi (Gephi, 2023; Mathieu et al., 2009), VantagePoint (Vantagepoint, 2023) y Loglet Lab4 (*Loglet Lab 4*, 2022).

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis cuantitativo para caracterizar los países prioritarios y los países de publicación. En el caso de los países de publicación, se realizó un análisis de la evolución de la tendencia en el número de publicaciones de patentes a lo largo del tiempo.

Posteriormente, se relacionaron los países prioritarios y los países de publicación, mediante una red utilizando el software Gephi. Siendo la variable que relaciona a los países el número de patentes recibidas por el país de publicación de los países prioritarios. Para la evaluación de esta red, se empleó los siguientes indicadores: grado de centralidad (GC), que describe el número de nodos conectados a un nodo de red específico; y el grado de centralidad ponderado (GCP), el que además incorpora el número de enlaces entre un nodo y otro.

Además, se adaptaron dos indicadores para caracterizar las patentes transferidas a la región LATAM. El indicador de participación tecnológica Nacional/Regional y el número de

patentes por sector industrial. Además, se diseñó y aplicó el indicador “Patentes amigables a tecnologías sustentables (PFST, por sus siglas en inglés)”.

Indicadores de participación tecnológica

Basado en el indicador Participación tecnológica nacional (NTS, por sus siglas en inglés), descrito en Baumann et al. (2021), nuestro estudio ha derivado en dos tipos de análisis de participación tecnológica. El primero, a nivel nacional, donde se ha representado la frecuencia relativa de la participación por país en cada uno de los 20 principales subgrupos tecnológicos. El segundo ha sido adaptado para calcular el indicador: Participación tecnológica regional (RTS, por sus siglas en inglés), para los diferentes grupos tecnológicos según la clasificación IPC. Esto mide la relevancia de los grupos tecnológicos para la región (ver Ecuación 2).

$$RTS = \frac{PG}{\Sigma PG} * 100 \quad (2)$$

RTS: Participación tecnológica regional, PG: Número de patentes pertenecientes a un grupo específico, por ejemplo, H01M2, H01M4..., ΣPG : Sumatoria del número de patente clasificada en cada grupo de la subclase H01M.

Indicador “Patentes amigables con tecnologías sustentables (PFST)”

Por medio de este indicador, se busca determinar el grado de asociación o relación del conjunto de patente analizadas con las tecnologías de mitigación del cambio climático. Dado que bajo la Clasificación Cooperativa de Patentes (CPC) existe el código Y02, que agrupa las tecnologías o aplicaciones de mitigación o adaptación al cambio climático. Por tanto, al determinar el grado de coocurrencia que presenta un conjunto de patentes de un código IPC con el Y02, se puede establecer el porcentaje de patentes publicadas en cada país que pueden ser consideradas con atributos sostenibles. Para lo cual se propone la ecuación 3:

$$PFST_{jK} = \frac{PPC(Y02)_{jk}}{NTP_{jk}} * 100 \quad (3)$$

PFST_{jK}: Patentes amigables a tecnologías sustentables del país j para patente tipo k.
 PPC(Y02)_{jk}: Número de patentes publicadas en el país j pertenecientes al IPC k que están co-indexadas con la clasificación CPC Y02.
 NTP_{jk}: Número total de patentes publicadas en el país j pertenecientes al IPC k, j Corresponde al país analizado, por ejemplo, Brasil, México, etc. K: Corresponde al IPC analizado, en este caso “K= H01M”.

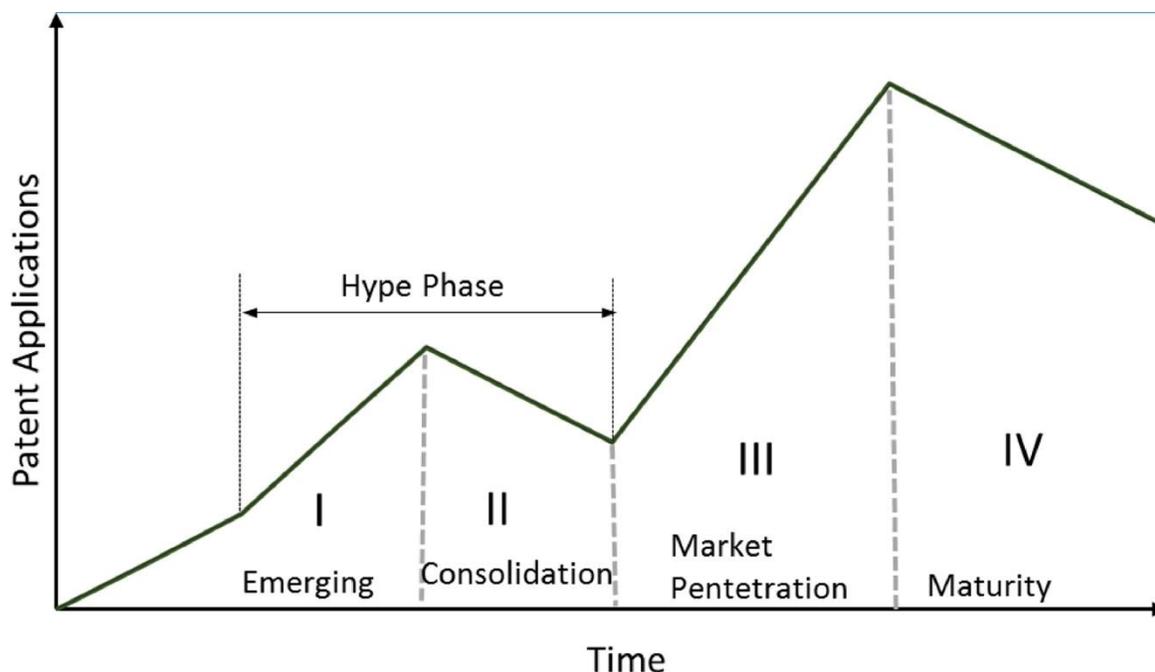
El indicador puede tomar valores entre 0 y 100%, alcanzando el valor máximo cuando todas sus patentes presentan atributos que responden a la mitigación y/o adaptación al cambio climático.

Con base al análisis de tecnologías sustentables, se han identificado los cesionarios más relevantes en términos de adquisición de tecnologías sustentables. Dentro de este análisis, también se ha identificado el rol de las universidades. Estos análisis se han realizado usando un mapa de coocurrencia de la familia de códigos Y02 vs Cesionario.

Evolución tecnológica y previsión

Para evaluar la evolución tecnológica se ha empleado el método de la curva S, empleando datos de patentes, específicamente para las LIB y las celdas de combustible, mediante los registros de publicación de patentes a lo largo del tiempo durante el período 1973-2020 para los códigos H01M10/052 y H01M8. No se utilizó el año 2021 porque no estaba completo en el momento de la descarga de datos. El modelo de curva S se ha construido utilizando el software Loglet Lab 4, que permite un análisis especializado en este método. La curva S permite ubicar la evolución tecnológica en una de las cuatro fases como se muestra en la Figura 5.

Figura 5: Etapas del ciclo de vida tecnológico.



Fuente: (Baumann et al., 2021; Chanchetti et al., 2016; Ernst, 1997).

Herramienta de análisis estratégico de adopción de tecnología

Finalmente, se ha presentado y utilizado una propuesta de una matriz para evaluar el nivel de adopción tecnológica (TAM) en el campo de la conversión electroquímica. Esta se compone de cuatro cuadrantes, formados por las combinaciones de los indicadores producción de patentes del país dividida por su número de habitantes, representada en el eje "x", y las patentes que se transfieren al país (extensión desde otros países) en el " eje y" (Figura 6).

Figura 6: Matriz de adopción tecnológica (TAM) por países.



Fuente: (Guevara-Ramírez et al., 2022).

La matriz propuesta brinda información sobre el estado de adopción de estas tecnologías, dado que el país puede tener la capacidad de generar patentes producidas por sus propios inventores y/o estas pueden ser transferidas desde otros países. Los cuatro escenarios posibles se describen a continuación:

ETI (Expansión): El país produce y adopta patentes de otros países, en la práctica significa que la nación está combinando las dos estrategias para adoptar tecnologías, por lo tanto, está en expansión tecnológica para ese sector.

ATD (Adopción): El país adopta patentes desde otros países, en la práctica significa que existe una adopción tecnológica con alta dependencia de otros países. En otras palabras, el ecosistema de innovación nacional está subdesarrollado.

ETA (producción): El país produce y no adopta patentes de otros países, en la práctica significa que hay una adopción tecnológica autóctona.

ATI (Iniciación): El país produce y/o adopta patentes desde otros países en pequeñas cantidades, en la práctica significa que no hay desarrollo tecnológico para este sector, o que se encuentra en una etapa inicial que aún no ha despegado.

Para que un país se ubique en los cuadrantes superiores, su valor para la variable evaluada tiene que ser superior al promedio del conjunto analizado.

Artículo 3: (Guevara-Ramírez et al., 2023)

El tercer artículo surge en respuesta a la necesidad de comprender el concepto de H₂V, debido que al revisar la literatura se encontraron términos como el H₂R, H₂S, H₂L, e H₂E, que generan confusión respecto a la conceptualización técnica del H₂V. Por tanto, para comprender los límites entre estos conceptos se utilizaron los análisis estadísticos, mapas de conocimientos, el uso de indicadores bibliométricos, así como los resultados de los estudios de metaanálisis sobre el EROI para determinar los valores de las FER que potencialmente pueden usarse para producir H₂V. En este estudio también se realizó una revisión profunda de las estrategias sobre H₂ publicadas entre el 2019 y el 2020. Estas fueron utilizadas para comprender cuales son las fuentes de energías y las tecnologías que se proyectan para producir H₂. Esta investigación se dividió en tres etapas, las que se describen a continuación:

Primera etapa: Análisis bibliométrico

La primera etapa se centra en un análisis bibliométrico de la producción científica de publicaciones sobre el concepto de H₂. Esta etapa se desarrolló mediante los seis pasos que se relacionan a continuación:

1. Un análisis descriptivo basado en el crecimiento de los documentos asociados a cada concepto de búsqueda.
2. Elaboración y uso de mapas de palabras clave para determinar las relaciones de los términos utilizados con los diferentes métodos de producción, y analizar las principales tendencias de investigación en estos temas, así como la madurez de cada concepto.
3. Un análisis por países mediante la elaboración de un mapa de coautoría para evaluar la productividad científica y las redes colaborativas.

4. Un análisis del financiamiento por países, donde se identifica cuáles son las naciones que han brindado mayor apoyo financiero, y cómo esto se refleja en la productividad científica para el tema estudiado.
5. En el caso de las organizaciones productoras de conocimiento, se elaboró un mapa de coautoría para determinar los niveles de colaboración y si estos se desarrollan en un contexto nacional o internacional.
6. Finalmente, se utilizó el mapa de coautoría para determinar cuáles son los investigadores más productivos y colaborativos, facilitándonos la identificación de los temas que les están permitiendo alcanzar esta relevancia.

Para esta etapa el software utilizado fue el VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2020).

Segunda etapa: EROI para la FER

En la segunda etapa, como se ha mencionado anteriormente, se han utilizado los valores del EROI para las diferentes FER con potencial para producir H₂V. Sin embargo, al revisar la amplia literatura sobre el EROI, se puede encontrar una gran variabilidad en los resultados en cuanto a las estimaciones realizadas para las diferentes FER; hecho que está relacionado con aspectos metodológicos, las condiciones naturales específicas del lugar estudiado, la vida estimada del proyecto, entre otras causas. Por lo tanto, la toma de decisión en base a estos valores se torna compleja. Es por ello que se ha recurrido a analizar investigaciones de metaanálisis, donde se ha realizado un importante trabajo de estandarización y sinterización de los valores de cada una de las FER (Atlason & Unnthorsson, 2013; Bhandari et al., 2015; Ketzer et al., 2018; Prananta & Kubiszewski, 2021; Walmsley et al., 2017, 2018; Wang et al., 2021). En este caso, solo se han considerado aquellos estudios que focalizaron el EROI_{st} (estándar), es decir en el punto de extracción o producción, ya que en otras variantes como el EROI_{pou}¹ ("en el punto de uso") y el EROI_{ext}² (extendido) puede existir mayor variabilidad al considerar una mayor cantidad de variables (Capellán-Pérez et al., 2019; White & Kramer, 2019).

A pesar de que varios estudios se han centrado en realizar metaanálisis para identificar los valores EROI de las FER (Bhandari et al., 2015; De Blas et al., 2019; Walmsley et al., 2018), hasta el momento de la investigación, no ha sido posible encontrar estudios del EROI para el H₂V.

¹ Considera además la energía consumida hasta el punto de consumo (Capellán-Pérez et al., 2019).

² Considera además la energía consumida en la producción y mantención de instalaciones, máquinas y equipos. Sumado a la exploración, inversión, comunicación, mano de obra, entre otros (Capellán-Pérez et al., 2019).

Por tanto, para obtener estos valores del EROI, se han seguido los siguientes pasos:

1. Se ha realizado una revisión de la literatura más relevante sobre los estudios de metaanálisis actuales publicados en WOS, centrados en los cálculos del EROI para las diferentes FER con potencial para producir H₂V. Tal como se ha explicado anteriormente, un metaanálisis consiste en recopilar y analizar estadísticamente datos a través de revisiones metódicas. Esta herramienta ha sido ampliamente utilizada y difundida en las ciencias de la salud e investigación clínica, extendiéndose progresivamente a otras áreas como la evaluación del ciclo de vida y el EROI (Bhandari et al., 2015; Walmsley et al., 2018). Estas búsquedas se han realizado en la WOS bajo las consultas (metaanálisis y EROI). Particularmente, en el caso de la energía geotérmica, se buscó por (EROI y geotérmica), y para la hidroeléctrica (EROI e hidro), porque al combinarse EROI e hidro con “metaanálisis” no se mostraban resultados.
2. Se han clasificado los valores recopilados utilizando la escala usada por Prananta & Kubiszewski (2021), la cual fue propuesta por Capellán-Pérez et al. (2019). Según esta escala, se consideran los siguientes rangos de categorización:

"EROI:> 15:1, sin riesgo; <10-15:1, bajo riesgo; <5-10:1, peligroso; <5:1, muy peligroso; <2-3:1, sistema inviable".

En general, consideramos que las FER clasificadas como de bajo o sin riesgo, son viables para producir H₂V.

Esta escala propuesta, promueve una visión diferente a gran parte de la literatura sobre análisis de energía neta (NEA por sus siglas en inglés), que se centra en superar el "punto de equilibrio" (EROI de 1:1). Promover valores muy superiores a 1:1 para el EROI, significa que no solo se puedan satisfacer las necesidades elementales de la humanidad como alimentación, vivienda y vestido, sino también aspectos como las artes, la salud, la educación y el bienestar del ciudadano medio, ya que la energía de alta calidad contribuye al bienestar social (Fizaine & Court, 2016; Hall et al., 2014; Prananta & Kubiszewski, 2021)

Tercera etapa: Estrategias nacionales de H₂V.

La tercera etapa del análisis ha incluido una revisión de las estrategias nacionales de H₂, identificadas mediante la utilización de las fuentes de información globales más relevantes relacionadas con estos temas (es decir, los informes de la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Estos informes presentan una compilación de los países que han publicado estos documentos de estrategia. Desde 2019, Japón y Corea han publicado sus estrategias nacionales de H₂, a las que se

unieron en 2020 Francia, Australia, Canadá, Chile, Alemania, Países Bajos, Rusia, Noruega, Portugal, España, junto con la Comisión Europea. Durante 2021 Hungría, República Checa y Reino Unido hicieron lo mismo (IEA, 2021b; IRENA, 2020a). Estas estrategias se han localizado a través de las páginas web de los ministerios encargados del desarrollo energético de cada país (en el caso de Portugal, el boletín oficial de la nación en forma de resolución y en el caso de la Unión Europea, la web oficial de la Unión Europea).

En general, se han identificado tres tipos de estrategias. Las primeras promueven la producción de H₂ utilizando los recursos tradicionales disponibles en los países, incluidos los combustibles fósiles utilizando métodos de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) y FER. Las segundas, son impulsadas por un grupo de países con poco potencial para producir hidrógeno, por lo tanto, se enfocan en promover el consumo y la creación de tecnologías para la producción y consumo de este vector energético. Las terceras, promueven la producción de H₂V, solo a partir del uso de FER. Nuestro análisis se centra en estas últimas.

En esta revisión, se han identificado las FER y tecnologías seleccionadas por los países en sus correspondientes hojas de ruta nacionales para la producción de H₂. Así como elementos conceptuales de interés para el objetivo de esta investigación.

Es posible encontrar una descripción detallada de los métodos utilizados, en cada uno de los artículos que se incorporan en la sección III: Trabajos publicados.

4. Hipótesis

A continuación, se presentan las hipótesis a constatar en cada uno de los artículos:

Hipótesis del artículo 1:

Hipótesis 1: Existe baja colaboración científica entre los investigadores latinoamericanos que realizan investigaciones en el campo de los EVs, y que son publicadas en revistas de alto en el Journal Citation Report (indexadas en la WOS).

Hipótesis 2: Existe alta correlación (positiva) entre la producción científica (artículos de revistas indexadas en WOS en el campo de los EVs), y el número de artículos enmarcados en proyectos del campo de los EVs que son financiados por las agencias de promoción científica estatal de los diferentes países.

Hipótesis del artículo 2:

Hipótesis 3: El número de patentes inscritas sobre tecnologías de conversión electroquímica en LATAM depende en más de un 50% de países extranjeros, debido a un débil desarrollo del ecosistema de innovación en este campo en la región de LATAM.

Hipótesis 4: Dado que las patentes sobre baterías de ion de litio son las más publicadas a nivel mundial, se espera que estas sean las más transferidas hacia el espacio geográfico de LATAM.

Hipótesis del artículo 3:

Hipótesis 5: El término H₂V es tratado como sinónimo de H₂S, H₂L, H₂R, y H₂E. Sin embargo, basado en el conocimiento adquirido mediante el análisis de los mapas de palabras clave, las estrategias nacionales sobre hidrógeno, y los valores del EROI definidos mediante estudios metaanálisis de las FER se pueden establecer límites que faciliten la comprensión de estos términos.

Hipótesis 6: Las biomásas, a pesar de los bajos niveles de eficiencia que presentan en comparación con otras FER y los problemas ambientales que generan, son consideradas entre las energías con potencial para producir H₂V.

5. Objetivos

Objetivos generales:

El objetivo de la presente tesis es analizar la dinámica de los flujos de conocimiento hacia y dentro de América Latina (LATAM) en el ámbito de las tecnologías implicadas en los EVs y el H₂V.

Se han utilizado, herramientas y técnicas cuantitativas, bibliométricas y de patentometría, complementadas con el uso de diferentes indicadores relacionados con la transición energética (especialmente el EROI), a fin de contribuir a la gestión estratégica del conocimiento y avanzar hacia una economía descarbonizada en dicha región.

La presente tesis contribuye al avance del conocimiento mejorando la conceptualización técnica del H₂V, siendo relevante para los gestores de tecnología tanto públicos como privados.

Objetivos específicos (OE):

Para la consecución de dicho objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos, los cuales se abordaron a través de tres publicaciones con índice de impacto.

En la primera publicación se ha alcanzado el siguiente objetivo:

OE1: Evaluar la contribución científica de la región de LATAM en la temática de los EVs. Para ello se ha realizado un análisis bibliométrico de los artículos indexados en la WOS desde 2001 al 2019. Esto con el fin de comprender la evolución de la producción científica, la

contribución por países, organizaciones, autores, revistas, y los temas más tratados. También se busca determinar la relación existente entre el número de artículo total vs el número de artículos financiados en el marco de los proyectos en este campo.

En la segunda publicación se ha alcanzado el siguiente objetivo:

OE2: Evaluar los flujos de transferencia de tecnologías a través de las patentes sobre los procesos y medios de conversión de energía electroquímica hacia LATAM. Para lo cual se han aplicado herramientas de visualización que permitieron mostrar el estado de adopción de estas tecnologías en cuanto a: (I) los países desde donde se transfieren, los países latinoamericanos receptores, y los clústeres de transferencia, (II) los temas principales protegidos y las industrias involucradas; (III) la evolución tecnológica mediante la aplicación del método curva S y la propuesta de una matriz que relaciona la producción de patentes autóctonas y la cantidad de patentes extendidas desde otros países.

En la tercera publicación se ha alcanzado el siguiente objetivo:

OE3: Lograr un avance del conocimiento en la comprensión del concepto de H₂V, a través de un análisis bibliométrico de publicaciones indexadas en la base de datos Scopus y la WOS en el período 1977-2021. Adicionalmente, se realiza una revisión de la literatura de metaanálisis existente sobre EROI aplicado a diferentes FER con el objetivo de evaluar su potencial para la producción de H₂V. Finalmente, se lanza un análisis de las principales estrategias nacionales sobre H₂V entre el 2019 y 2020. Todo con el fin de establecer límites entre el término H₂V y otros términos utilizados como sinónimos.

6. Resumen de las publicaciones

Los resultados de esta tesis se han obtenido mediante tres publicaciones que en general apuntan a los principales procesos de la transición energética que está ocurriendo en el mundo. Dos de los artículos se han centrado en el área geográfica de LATAM, el tercero contribuye a la conceptualización del hidrógeno verde como vector energético del futuro. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenido en cada una de las publicaciones:

Artículo 1 (Guevara-Ramírez et al., 2021):

En el primer artículo, se ha dado cumplimiento al primer objetivo específico de la presente tesis (**OE1**), por medio de la evaluación de la generación de investigaciones científicas latinoamericanas en el campo de los EVs. Estas investigaciones tienen baja participación debido a que el conjunto de los artículos publicados por estas naciones representa solo el 1,8% (promedio anual), respecto a la producción mundial. Como aspecto positivo, se puede resaltar que dichas publicaciones presentan una tendencia positiva exponencial, análoga a los resultados del conjunto de investigaciones mundiales en este campo. Las principales

publicaciones son lideradas por Brasil (170-3310), México (59-629) y Colombia (56-346), según el número de documentos-y citas respectivamente. Chile aparece con 50 documentos, que alcanzan las 1539 citas, lo que puede ser un reflejo de un mayor impacto de sus publicaciones. Por otra parte, el índice de actividad científica (IA) es liderado por Colombia, Chile y México, con valores promedio de 91%, 49%, y 41% respectivamente. Todos con tendencia decreciente, excepto Chile.

En general, existe poca colaboración entre los países latinoamericanos. Respecto a la colaboración con países de otras regiones, destacan las redes con USA, España, China y Francia. Estas redes poseen gran relevancia para las naciones latinoamericanas ya que facilitan la transferencia de nuevos conocimientos (Jung & Ruiz-León, 2018).

En cuanto a las organizaciones, estas están lideradas por la Universidad de São Paulo (Brasil), en cuanto a cantidad de publicaciones con 19, y la Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile), atendiendo a la cantidad de citas por documentos (CPP), con 84, muy superior al resto de las otras organizaciones. En general el promedio del número de citas es bajo. En parte, esto puede estar explicado porque es una temática emergente en la región, y sus primeras publicaciones fueron a principios del actual siglo. Por otra parte, a nivel de organizaciones, también se pueden considerar bajos los niveles de colaboración, influenciados naturalmente por la baja producción científica de muchas organizaciones. Por tanto, se enfatiza necesidad de aumentar la producción científica y la colaboración, como un área prioritaria para las organizaciones latinoamericanas.

En cuanto a los autores, de un total de 1.325 investigadores que presentan resultados en la temática, solo 50 presentan tres o más documentos en coautoría. Estos pequeños clústeres de coautoría se forman al interior de las universidades. Esto refuerza la idea que existe una gran necesidad de crear redes de colaboración para lograr la aceleración de la producción científica en este campo.

Los autores latinoamericanos más citados son: Jorge Moreno, Micah E. Ortúzar y Juan W. Dixon con su artículo "Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks" que alcanza 416 citas. Seguido por la investigación de Mattos y Noranhan que aparece con 403 citas, siendo una publicación más joven. Es importante tener en cuenta que las publicaciones más relevantes a nivel mundial en este campo superan las 5000 citas. La relevancia de estos últimos puede estar relacionadas con el hecho que abordan específicamente el conocimiento sobre las baterías de ion de litio, al tiempo que las investigaciones latinoamericanas más relevante apuntan hacia otros aspectos de los EVs. Así lo demuestra el análisis de las palabras claves, donde además de "Vehículos eléctricos" y "Vehículo eléctrico", aparecen "Optimización", "Sistema", "Batería", "Híbrido", "Diseño", "Energía" y "Administración". No apareciendo entre lo más relevante "Baterías de ion de litio".

En cuanto al análisis de las revistas donde publican los autores latinoamericanos en este campo (considerando solamente las indexadas en Journal Citation Reports (JCR)), entre las diez que lideran atendiendo al número de publicaciones, presentan un factor de impacto promedio de 5.706. Encabezado por Energies, en número de documentos con 18, en tanto IEEE Transactions On Industrial Electronics, lidera el indicador (CPP) con 88. Siendo Renewable Sustainable Energy Reviews la que lidera el factor de impacto con 10.556. En general, se observa que existe una relación directamente proporcional entre el factor de impacto y el CPP. Como detalle adicional, no existe ninguna revista latinoamericana indexada en WOS que tenga contribución destacada en la publicación de artículos relacionados con los EVs. Lo que puede explicarse por el reducido número de revistas latinoamericanas que están indexada en JCR, y el bajo factor de impacto que estas tienen en general (Crespo-Gascón et al., 2019).

Por último, dentro de este artículo, también se analiza el número de investigaciones que fueron financiadas por las principales agencias de financiamiento de cada país latinoamericano en el campo de los EVs. En este caso, se ha determinado que existe una correlación positiva de 0,95 entre el financiamiento gubernamental y la cantidad de publicaciones. Los resultados reflejan que el 52% de las investigaciones están financiadas por las agencias nacionales, mientras que otro grupo importante de investigaciones son financiadas o cofinanciadas por organizaciones internacionales. Por tanto, considerando que el enfoque de la actividad científica puede estar determinado por políticas internas de las organizaciones o por un interés nacional, se considera esencial que los países de la región dediquen mayores esfuerzos a este campo, dado el impacto que estas tecnologías pueden tener para alcanzar la meta de la descarbonización de la economía mundial.

Artículo 2 (Guevara-Ramírez et al., 2022):

Por medio de la segunda publicación, se ha dado cumplimiento al segundo objetivo específico de la presente tesis (**OE2**), que consiste en analizar los flujos de transferencias de patentes sobre los procesos y medios de conversión de energía electroquímica hacia LATAM.

En primer lugar, se ha determinado que los tres principales países de prioridad para las patentes transferidas hacia LATAM en el campo de los procesos de conversión electroquímica (celda y baterías) son USA, Japón y Alemania, este último desplazando la posición de liderazgo que posee China en el contexto mundial para estas patentes (Baumann et al., 2021). Siendo Brasil, México y Argentina los países de publicación en LATAM con mayor número de registros en este campo. Estos tres países registran más del 95% de estas patentes en la región. En general, los países latinoamericanos no presentan un crecimiento estadísticamente significativo.

Se ha presentado un mapa de los flujos de transferencia hacia y entre LATAM, donde se evidencia que los mayores flujos son entre los países anteriormente mencionado. Fundamentalmente, Brasil es el epicentro de la adopción de estas tecnologías al presentar el mayor grado medio ponderado (5758). Este indicador cuantifica los flujos de entradas y salidas, considerando el número de nodo con lo que se relaciona. También se ha identificado un segundo grupo de países (Chile, Colombia, y Perú) que empiezan a mostrar cierto desempeño en este campo en cuanto a número de patente y relaciones con otros países.

El análisis mediante minería de texto ha permitido entender cuáles son los temas más relevantes para la región en esta materia. Al respecto, se ha identificado el código H01M8/04: “Dispositivos auxiliares, para control de presión o para circulación de fluidos”, como el más publicado, el cual se ubica dentro del grupo de las celdas de combustible. Por su parte, la indexación específica para LIB (H01M 10/052), presenta un registro discreto. Este resultado difiere de los resultados de otras investigaciones sobre las LIB, que plantean que estas encabezan las solicitudes de patentes en el mundo respecto a otras celdas o baterías (Block & Song, 2022; Mueller et al., 2015; Wagner et al., 2013).

El indicador de participación tecnológica regional (RTS, ver ecuación 2), permitió determinar que este campo es liderado por el grupo H01M4: “Electrodos”, siendo el más relevante en término de participación, seguido del H01M2 equivalente a H01M50: “Detalles de construcción o procesos de fabricación de partes inactivas de celdas electroquímicas distintas de las celdas de combustible.” Posteriormente aparece el código H01M10: “Células secundarias”. En cuarto lugar, destaca el código correspondiente a “pila de combustible” H01M8.

El indicador Patentes amigables con tecnologías sustentables (PFST, ver ecuación 3) permitió evaluar las patentes amigables con las tecnologías sustentables, es decir las tecnologías que muestran alta co-indexación con el código Y02 (según la Clasificación Cooperativa de Patentes (CPC)), el cual agrupa las tecnologías o aplicaciones de mitigación o adaptación al cambio. En este caso, los resultados indican que el 79,3% de las patentes publicadas en este campo en los países de LATAM presentan atributos que responden a la mitigación o adaptación al cambio climático. Siendo Brasil el más destacado, ya que además de ser el líder en el número de publicaciones de patentes, más del 80% de ellas presentan atributos sostenibles.

En cuanto al análisis de la evolución y previsión tecnológica mediante la metodología curva S, los principales resultados muestran:

i) El campo de las LIB (LIB en LATAM) se encuentra en una fase de crecimiento-consolidación (II) desde 1998, lo que difiere de los resultados de Baumann et al., (2021), que encontró que los países líderes a nivel mundial en el patentamiento de LIB, se encuentran en

una fase de fuerte madurez (penetración de mercado (III)), incluso entrando en fase de saturación (IV) (releer y reescribir). La diferencia entre los dos estudios se puede explicar en gran medida por el hecho de que solo una pequeña parte de las patentes LIB se transfieren a LATAM y que existe un desfase significativo entre la fecha de publicación en el país prioritario y la fecha de publicación en LATAM. En promedio, este retraso es de 5,1 años, con una desviación estándar de 3,2 años.

ii) En el caso de las tecnologías de celdas de combustible, los resultados muestran que estas se encuentran en una fase de madurez y que podrían entrar en su fase de saturación dentro de la década actual en LATAM. Algunos estudios plantearon que la fase de madurez en el mundo se debía alcanzar aproximadamente en el 2015 (Mock & Schmid, 2009), e incluso que pudo haberse alcanzado en el 2009 (Haslam et al., 2012). En el caso de este campo, LATAM presenta mayor concordancia con el escenario mundial, lo que puede estar relacionado con un mayor número de transferencias a LATAM, con un menor rezago de 4,3 años, con una desviación estándar de 2,8 años.

Finalmente, mediante la propuesta de la matriz de adopción tecnológica (TAM) para el análisis estratégico de adopción de tecnología en LATAM, se reafirma el desarrollo tecnológico alcanzado por Brasil, que se encuentra en el cuadrante de Expansión. Seguido de México, en el cuadrante de Adopción, lo que implica que presenta un desempeño dependiente de la transferencia desde otros países. En tercer lugar, Argentina lidera el cuadrante de Iniciación con un registro total de patentes muy superior a los valores de los demás países de este cuadrante, Chile, Colombia y Perú. También en este cuadrante de Iniciación se encuentran Cuba, Honduras, Guatemala, Ecuador, Costa Rica, República Dominicana y El Salvador, aunque su comportamiento en el tiempo no permite inferir que efectivamente estén desarrollando algún tipo de estrategia para el desarrollo de estas tecnologías.

Artículo 3 (Guevara-Ramírez et al., 2023):

Por medio de la tercera publicación, se ha dado cumplimiento al tercer objetivo específico de la presente tesis (**OE3**), mediante la cual se han trazado los límites para la conceptualización del concepto H₂V. En la primera parte del estudio, se presentan resultados del análisis bibliométrico sobre la búsqueda de los términos asociados al H₂V, y que comúnmente son usado como sinónimos. El conjunto de publicaciones obtenida bajo estos términos se ha denominado “concepto de H₂” para facilitar la redacción.

Resultados del análisis bibliométrico.

En primer lugar, se ha determinado que las publicaciones bajo el concepto de H₂, datan de 1977, con valores discretos hasta el año 2000, a partir del cual el crecimiento ha sido

exponencial hasta el 2021, acumulando un total de 1.751 registros. Siendo el término renovable el más utilizado (con el 60,4% de los registros), y el primero en utilizarse en 1977. Un año después aparece el concepto de H₂E, que prácticamente no se utiliza (1,6%). El H₂S se ubica como el segundo tema con más publicaciones (con un 24,8%, desde 1989). Diez años después apareció el H₂L, pero solo representa un 5,4%, con poco crecimiento a la fecha. El término verde, es el término más moderno empleado en la investigación científica, principalmente se empieza a usar en el siglo XXI (2006) y representa un 9,2%. Si bien su uso muestra un crecimiento exponencial, su tasa de crecimiento es inferior a la del uso de los términos renovable y sostenible. Es importante resaltar que aunque su empleo en la literatura indexada se ubica en el actual siglo, existe evidencia que este (H₂V) se referenció por primera vez en 1995 en un artículo del Departamento de Energía de Estados Unidos (US Department of Energy, 1995).

Mediante el análisis de palabras clave, se han identificado los temas candentes o más abordados. Siendo los términos más generales como "hidrógeno", "producción de hidrógeno" y "energía renovable", los que destacan por su frecuencia y número de enlaces con otras palabras. En cuanto al término objeto de estudio más destacado, aparece "hidrógeno renovable" dentro de lo que destaca la relación con las palabras "Energía solar*", "biomasa", "biogás*" y "eólica*". Como las tecnologías más consideradas, destacan los electrolizadores y las pilas de combustible. El "hidrógeno verde" aparece como el segundo término más relevante, mostrando poca relación con términos vinculados a ciertas FER como son la solar y eólica. En cambio, los términos "biomasa" y "biocombustibles" son mucho más destacados en cuanto a la relación con el "hidrógeno verde". Por último, "se evidencia poco uso de las palabras clave "hidrógeno sostenible" e "hidrógeno limpio".

El término "hidrógeno sostenible" se relaciona con palabras como "reformado con vapor", "glicerol", "biohidrógeno". También se asocia con los elementos de la cadena de suministro de producción de H₂, por ejemplo, vehículos con celdas de combustible y almacenamiento de H₂. A la vez, resaltan sus vínculos con fuentes no renovables (por ejemplo, nuclear y gas natural). Una aparición notable es "steam reforming" (reformado con vapor) que es una de las tecnologías fundamentales para la obtención de H₂, ya sea a partir de combustibles fósiles o RES, como la biomasa (Nabgan et al., 2017). Esta tecnología funciona a altas temperaturas, que si se produce mediante combustibles tradicionales puede conducir a un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Zheng et al., 2021). Por tanto, se abre una posibilidad de mejora de este proceso con la incorporación del calor residual de las diferentes industrias para la producción de H₂ (Moogi et al., 2021; Zheng et al., 2020, 2021).

En general, se ha podido observar gran superposición de las palabras contenidas en los mapas H₂R, H₂V y H₂S, aunque se puede distinguir sensibles diferencias entre estos, como se ha explicado anteriormente.

Los países que lideran la generación de investigaciones en este campo son USA, China y Alemania, completan el top 10, otros países europeos, países asiáticos y Canadá. Evidenciándose la baja productividad de los países latinoamericanos y africanos. Se ha podido determinar que los países donde existe mayor producción de publicaciones son aquellos que disponen de mayor número de financiación. En general, el 64% de las publicaciones han recibido financiación, evidenciando un marcado interés por el tema.

En cuanto a las organizaciones se ha podido comprobar que existe poca colaboración internacional. Los principales clústeres tienen un carácter nacional. Como ejemplo destacado se puede citar a Ontario Tech University (Canadá), que colabora principalmente con la Universidad de Waterloo (Canadá), la Universidad de Western Ontario (Canadá). En segundo lugar, aparece el clúster formado por la Academia de Ciencias de China y su subordinada, la Universidad de la Academia de Ciencias de China, que colaboran principalmente con otras universidades chinas. También con un rol destacable está el Laboratorio Nacional de Energías Renovables, que lidera un clúster en USA. Otras organizaciones a pesar de mostrar resultados sobre el tema, no lo hacen de manera colaborativa.

El número de investigaciones a nivel de autor son encabezadas por el investigador canadiense Dr. Ibrahim Dincer de la Universidad Tecnológica de Ontario, Oshawa, Canadá, con 57 artículos en colaboración con 14 investigadores, principalmente de Canadá y Turquía. Sus áreas de investigación abarcan los temas de transferencia de calor y masa, sistemas de pilas de combustible y H₂, entre otros. Se han identificado también algunos clústeres con una productividad de entre 10 y 15 artículos que agrupan entre 10 y 15 investigadores, principalmente canadienses y chinos.

Resultados en torno a los valores del EROI de las FER candidatas para la producción de H₂V

Los valores de EROI que se compilieron mediante los estudios de metaanálisis para las FER, incluyen el alcance del análisis, la categorización y la fuente utilizada (ver Tabla 3). En resumen, los resultados indican que la hidroeléctrica, la eólica y la solar son las energías más eficientes, categorizada como “sin riesgo”. Por su parte, las biomásas se consideran de “alto riesgo”, y los biocombustibles inviables. En general, los valores del EROI presentan gran variabilidad. Por lo tanto, la categorización de riesgo asociada al valor de la mediana indica el potencial global de estas energías, sin embargo, las condiciones específicas deben analizarse dentro del contexto de cada país, dado que el cálculo de la EROI depende de las condiciones geográficas y otros factores específicos (Walmsley et al., 2017).

Tabla 3: Valores de EROI según estudio de metaanálisis para FER.

Tipo de energía	Alcance	EROI			Categoría	Fuente
		Mín.	Mediana	máx.		
Energía eólica	Nueva Zelanda	6.6	32.7	58.8	Sin riesgo	(Walmsley et al., 2017)
Energía hidroeléctrica	Mundo	2.4	20.3	38.2	Sin riesgo	(Walmsley et al., 2018)
Energía solar fotovoltaica	Mundo	8.7	21.5	34.2	Sin riesgo	(Bhandari et al., 2015)
Biomasa (proceso físico)	China	–	12.8 *	–	Riesgo bajo	(Wang et al., 2021)
Biomasa (proceso biológico)	China	–	4.4*	–	muy riesgo	(Wang et al., 2021)
Biomasa (Físico Químico)	China	1.26	4.3*	7.41	Muy arriesgado	(Wang et al., 2021)
Biomasa (biocombustible)	Mundo	0,64	3.9*	6.7	Muy arriesgado	(Prananta & Kubiszewski, 2021)
Biodiesel (Microalgas)	Mundo	0.01	1,6	3.35	No factible	(Ketzer et al., 2018)
Geotermia	Islandia	9.5	20,9	32.4	Sin riesgo	(Atlason & Unnthorsson, 2013)

*Valor estimado por los autores del metaanálisis.

Fuente: (Guevara-Ramírez et al., 2023).

Revisión de las estrategias sobre H₂

Los resultados de la revisión de las estrategias sobre H₂ muestran una convergencia en cuanto a la electrólisis como la tecnología que caracteriza la conversión a H₂. En cuanto a las energías, existe un consenso sobre la energía solar y eólica entre los que tienen los planes más ambiciosos en términos de desarrollo de capacidades, como son Chile, Australia y Alemania. En el caso de la Unión Europea (UE), generalmente se hace referencia al empleo de FER (Tabla 4). La visión estratégica del gobierno noruego es que para que el H₂ pueda ser un portador de energía de baja o cero emisiones, tiene que ser producido con cero o bajas emisiones. Postula que esto se puede lograr mediante la electrólisis del agua utilizando electricidad renovable, o mediante procesos de reformado con vapor con gas natural u otros combustibles fósiles combinados con CCUS. En esta estrategia, el H₂ bajo y cero emisiones no establece una posición específica hacia la producción de H₂V sino que se refiere a él como H₂L o simplemente H₂ (Norwegian Government's, 2020).

Tabla 4: Tecnologías descritas en las estrategias globales de H₂V.

País	Capacidad electrolizadora (GW)	Tecnología	Energía	Fecha del proyecto	Fuente
Francia	6.5	Electrólisis	Renovable	2030	(Pompil & Le Maire, 2020)
España	4	Electrólisis	Renovable	2030	(Spain, 2020)
Portugal	2.5	Electrólisis	Renovable	2030	(PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS, 2020)
Australia	23	Electrólisis	Solar-Eólica-Hidráulica	2030	(Energy Council Hydrogen Working Group, 2019)
Países Bajos	4	Electrólisis	Solar-Eólica Marina	2030	(Government of Netherlands, 2020)
Alemania	10	Electrólisis	Eólica-fotovoltaica	2040	(German Federal Government, 2020)
Chile	25	Electrólisis	Solar-Eólica	2030	(Chile & Energy, 2020)
Unión Europea	40	Electrólisis	Renovable	2030	(EUROPEAN COMMISSION, 2020)

Fuente: (Guevara-Ramírez et al., 2023).

En este artículo, luego de una extensa discusión donde se tienen en cuenta los desafíos en cuanto a los diferentes aspectos de sostenibilidad de ciertos tipos de fuentes de energías, como es el caso de la familia de las biomásas. En tal sentido considerando las perspectivas técnico-económica, ambiental y social, se realizó una propuesta con el fin de utilizar de manera adecuada los términos H₂V, H₂S y H₂R. Para ello, basado en cinco criterios: el tipo de energía, los valores de EROI estimados, las emisiones de CO₂, otros tipos de emisiones y la percepción de la comunidad sobre el tipo de proyecto. Estos se clasificaron en correspondencia con los conocimientos adquiridos durante esta investigación (Tabla 5). El incumplimiento de al menos uno de los criterios es suficiente para no alcanzar la categoría verde, por lo tanto, se ubicaría entre la categoría sostenible o renovable. Téngase en cuenta que la categoría renovable es la menos restrictiva, su única condición es utilizar una FER. La denominación sostenible, implica necesariamente que se producirán mejoras, en al menos uno de los criterios en términos relativos, siempre y cuando no tenga un efecto negativo en

uno de los demás criterios. Por ejemplo, no es sostenible si para aumentar el EROI implica aumentar las emisiones, o viceversa.

Tabla 5: Criterios propuestos para el uso de los términos H₂V, H₂S y H₂R.

Término	Tipo de energía	Valor del EROI	Emisiones de CO₂	Otras emisiones	Relaciones con la comunidad
H ₂ V	Renovables	sin riesgo; <10-15: 1 o bajo riesgo < 5-10: 1	Bajas emisiones	Libre de emisiones	Bien valorado por la comunidad.
H ₂ S	Renovables, solo o combinado con otras fuentes	sin riesgo; < 10-15: 1 o bajo riesgo < 5-10: 1	Reduce las emisiones en comparación con otras fuentes	Reduce las emisiones en comparación con otras fuentes	Mejora la aceptación por parte de la comunidad.
H ₂ R	Renovables	Cualquier valor	Cualquier valor, pero normalmente reduce en comparación con otras fuentes.	Puede emitir, por ejemplo, partículas, cenizas, olores, etc.	A veces pueden generar conflictos dentro de la comunidad (p. ej. proyectos a gran escala de biomasa a partir de residuos).

Fuente: (Guevara-Ramírez et al., 2023).

7. Fuentes referenciadas

- Abdelhamid, H. N. (2021). A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(1), 726–765. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.186>
- Agyekum, E. B., Ampah, J. D., Wilberforce, T., Afrane, S., & Nutakor, C. (2022). Research Progress, Trends, and Current State of Development on PEMFC-New Insights from a Bibliometric Analysis and Characteristics of Two Decades of Research Output. *Membranes*, 12(11), 1103. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES12111103>
- Alhassan, M., Jalil, A. A., Nabgan, W., Hamid, M. Y. S., Bahari, M. B., & Ikram, M. (2022). Bibliometric studies and impediments to valorization of dry reforming of methane for hydrogen production. *Fuel*, 328, 125240. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.125240>
- Alstott, J., Triulzi, G., Yan, B., & Luo, J. (2017). Mapping technology space by normalizing patent networks. *Scientometrics*, 110(1), 443–479. <https://doi.org/10.1007/S11192-016-2107-Y>
- Altuntas, S., Dereli, T., & Kusiak, A. (2015). Forecasting technology success based on patent data. *Technological Forecasting and Social Change*, 96, 202–214. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2015.03.011>
- Alvarez-Meaza, I., Zarrabeitia-Bilbao, E., Rio-Belver, R. M., & Garechana-Anacabe, G. (2020). Fuel-cell electric vehicles: Plotting a scientific and technological knowledge map. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su12062334>
- Araújo-Ruiz, J. A., & Arencibia, R. (2002). Informetría, bibliometría y cienciometría: aspectos teórico-prácticos. *ACIMED*, 10(4), 5–6. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352002000400004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Arsad, A. Z., Hannan, M. A., Al-Shetwi, A. Q., Mansur, M., Muttaqi, K. M., Dong, Z. Y., & Blaabjerg, F. (2022). Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(39), 17285–17312. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.03.208>
- Arvesen, A., & Hertwich, E. G. (2015). More caution is needed when using life cycle assessment to determine energy return on investment (EROI). *Energy Policy*, 76, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2014.11.025>
- Atlason, R. S., & Unnthorsson, R. (2013). Hot water production improves the energy return on investment of geothermal power plants. *Energy*, 51, 273–280. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.01.003>
- Aviv-Reuven, S., & Rosenfeld, A. (2023). A logical set theory approach to journal subject

- classification analysis: intra-system irregularities and inter-system discrepancies in Web of Science and Scopus. *Scientometrics*, 128(1), 157–175. <https://doi.org/10.1007/S11192-022-04576-3/FIGURES/15>
- Ayodele, B. V., & Mustapa, S. I. (2020). Life Cycle Cost Assessment of Electric Vehicles: A Review and Bibliometric Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6), 2387–2404. <https://doi.org/10.3390/SU12062387>
- Bao, Y., Mehmood, K., Saifullah, Yaseen, M., Dahlawi, S., Abrar, M. M., Khan, M. A., Saud, S., Dawar, K., Fahad, S., & Faraj, T. K. (2021). Global research on the air quality status in response to the electrification of vehicles. *Science of The Total Environment*, 795, 148861. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148861>
- Bar-Ilan, J. (2010). Citations to the “Introduction to informetrics” indexed by WOS, Scopus and Google Scholar. *Scientometrics*, 82(3), 495–506. <https://doi.org/10.1007/S11192-010-0185-9>
- Barbosa, W., Prado, T., Batista, C., Câmara, J. C., Cerqueira, R., Coelho, R., & Guarieiro, L. (2022). Electric Vehicles: Bibliometric Analysis of the Current State of the Art and Perspectives. *Energies*, 15(2), 395–411. <https://doi.org/10.3390/EN15020395>
- Baumann, M., Domnik, T., Haase, M., Wulf, C., Emmerich, P., Rösch, C., Zapp, P., Naegler, T., & Weil, M. (2021). Comparative patent analysis for the identification of global research trends for the case of battery storage, hydrogen and bioenergy. *Technological Forecasting and Social Change*, 165(1205505), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120505>
- Bhandari, K. P., Collier, J. M., Ellingson, R. J., & Apul, D. S. (2015). Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 133–141. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.02.057>
- Block, A., & Song, C. H. (2022). Exploring the characteristics of technological knowledge interaction dynamics in the field of solid-state batteries: A patent-based approach. *Journal of Cleaner Production*, 353, 131689. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131689>
- Bolaños, R., & Calderón, M. (2014). Introducción al meta-análisis tradicional. *Revista de Gastroenterología Del Perú*, 34(1), 45–51. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1022-51292014000100007
- Brandt, A. R. (2017). How Does Energy Resource Depletion Affect Prosperity? Mathematics of a Minimum Energy Return on Investment (EROI). *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S41247-017-0019-Y>
- Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., & Tarascon, J. M. (2012). LigO₂ and LigS

- batteries with high energy storage. *Nature Materials*, *11*(1), 19–29. <https://doi.org/10.1038/nmat3191>
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & González, L. J. M. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*, *26*, 1–26. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.100399>
- Chanchetti, L. F., Leiva, D. R., Lopes de Faria, L. I., & Ishikawa, T. T. (2019). A scientometric review of research in hydrogen storage materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(8), 5356–5366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.093>
- Chanchetti, L. F., Oviedo Diaz, S. M., Milanez, D. H., Leiva, D. R., de Faria, L. I. L., & Ishikawa, T. T. (2016). Technological forecasting of hydrogen storage materials using patent indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(41), 18301–18310. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.08.137>
- Chen, J., Li, K., & Yang, S. (2022). Electric Vehicle Fire Risk Assessment Based on WBS-RBS and Fuzzy BN Coupling. *Mathematics*, *10*(20), 3799. <https://doi.org/10.3390/MATH10203799>
- Chen, Y.-H., Chen, C.-Y., & Lee, S. (2010). Technology forecasting of new clean energy: The example of hydrogen energy and fuel cell. *African Journal of Business Management*, *4*(7), 1372–1380. <http://www.academicjournals.org/AJBM>
- Chen, Y. H., Chen, C. Y., & Lee, S. C. (2011). Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(12), 6957–6969. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.063>
- Chile, & Energy, M. of. (2020, November). *National Green Hydrogen Strategy Chile, a clean energy provider for a carbon neutral planet* (Correa Max., C. Barría, & B. Maluenda (Eds.)). Ministry of Energy, Government of Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf
- Choi, D., & Song, B. (2018). Exploring Technological Trends in Logistics: Topic Modeling-Based Patent Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(8), 2810–2836. <https://doi.org/10.3390/SU10082810>
- Choi, H., & Woo, J. R. (2022). Investigating emerging hydrogen technology topics and comparing national level technological focus: Patent analysis using a structural topic model. *Applied Energy*, *313*, 118898. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.118898>
- Choi, J. W., & Aurbach, D. (2016). Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities. *Nature Reviews Materials*, *1*(4), 1–16. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.13>

- Clarivate. (2023). *Trusted publisher-independent citation database - Web of Science Group*. <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>
- Cleveland, C. J., & Morris, C. (Eds.). (2015). *Dictionary of Energy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64490-1>
- Crespo-Gascón, S., Tortosa, F. S., & Guerrero-Casado, J. (2019). Producción de revistas científicas en América Latina y El Caribe en Scopus, Journal Citation Reports y Latindex en el área de los recursos naturales: su relación con variables económicas, ambientales y de inversión en investigación. *Revista Española de Documentación Científica*, 42(1), 224–234. <https://doi.org/10.3989/REDC.2019.1.1533>
- De Blas, I., Miguel, L. J., & Capellán-Pérez, I. (2019). Modelling of sectoral energy demand through energy intensities in MEDEAS integrated assessment model. *Energy Strategy Reviews*, 26(100419), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100419>
- Dias, A., Carlos, L., Junior, H., Yeung, S. S., & Oliveira, L. (2012). What are the Main Running-Related Musculoskeletal Injuries? *Sports Medicine*, 42(10), 891–905. <https://doi.org/10.1007/BF03262301>
- Díaz-Pérez, M., & De Moya-Anegón, F. (2008). Patent analysis as a strategy for innovative decisionmaking. *Profesional de La Informacion*, 17(3), 293–302. <https://doi.org/10.3145/epi.2008.may.05>
- Elsevier. (2023). *How Scopus Works - Scopus*. <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works/content>
- Energy Council Hydrogen Working Group, C. (2019). *AUSTRALIA'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY*. 1–94. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>
- Ernst, H. (1997). The Use of Patent Data for Technological Forecasting: The Diffusion of CNC-Technology in the Machine Tool Industry. *Small Business Economics*, 9(4), 361–381. <https://doi.org/10.1023/A:1007921808138>
- Ernst, H. (2003). Patent information for strategic technology management. *World Patent Information*, 25(3), 233–242. [https://doi.org/10.1016/S0172-2190\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0172-2190(03)00077-2)
- EUROPEAN COMMISSION. (2020). *COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. <https://www.eu2018.at/calendar-events/political-events/BMNT->
- Fabre, A. (2019). Evolution of EROIs of electricity until 2050: Estimation and implications on prices. *Ecological Economics*, 164(106351), 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2019.06.006>
- Fernández-Ríos, M., & Sánchez, J. (1997). *Eficacia organizacional: concepto, desarrollo y*

evaluación. Ediciones Díaz de Santos.
https://books.google.com.cu/books?id=d3z_i6znsFUC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

Fizaine, F., & Court, V. (2016). Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy*, 95, 172–186.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2016.04.039>

Gallini, N. T. (2002). The Economics of Patents: Lessons from Recent U.S. Patent Reform. *Journal of Economic Perspectives*, 16(2), 131–154.
<https://doi.org/10.1257/0895330027292>

Garechana, G., Rio, R., Cilleruelo, E., & Gavilanes, J. (2012). Visualizing the Scientific Landscape Using Maps of Science. In *Industrial Engineering: Innovative Networks* (pp. 103–112). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2321-7_12

Geissdoerfer, M., Savaget, P., And Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Gephi. (2023). *Gephi: la plataforma Open Graph Viz*. <https://gephi.org/>

German Federal Government. (2020). *The National Hydrogen Strategy*. https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Government of Netherlands. (2020). *Government Strategy on Hydrogen*. <https://www.government.nl/documents/publications/2020/04/06/government-strategy-on-hydrogen>

Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I., & Río-Belver, R. M. (2023). Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2022 25:1, 25(1), 69–91. <https://doi.org/10.1007/S10098-022-02388-W>

Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I., Río-Belver, R. M., & Alvarez-Meaza, I. (2022). Strategic management of patents on electrochemical conversion fuel cells and batteries in Latin America as a mechanism for moving towards energy sustainability. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1, 1–20. <https://doi.org/10.1007/S10800-022-01804-9>

Guevara-Ramírez, W., Río-Belver, R. M., Martínez de Alegría, I., & Letzkus, C. M. (2021). Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos. *Dirección y Organización*, 0(75), 62–73.
<https://doi.org/10.37610/DYO.V0I75.610>

Hall, C. A. S., Balogh, S., & Murphy, D. J. R. (2009). What is the minimum EROI that a

- sustainable society must have? *Energies*, 2(1), 25–47.
<https://doi.org/10.3390/en20100025>
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141–152.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hannan, M. A., Abu, S. M., Al-Shetwi, A. Q., Mansor, M., Ansari, M. N. M., Muttaqi, K. M., & Dong, Z. Y. (2022). Hydrogen energy storage integrated battery and supercapacitor based hybrid power system: A statistical analysis towards future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(93), 39523–39548.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.09.099>
- Haslam, G. E., Jupesta, J., & Parayil, G. (2012). Assessing fuel cell vehicle innovation and the role of policy in Japan, Korea, and China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(19), 14612–14623. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.06.112>
- Hayter, C. S., & Rooksby, J. H. (2016). A legal perspective on university technology transfer. *Journal of Technology Transfer*, 41(2), 270–289.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10961-015-9436-5>
- Hou, Y., Png, I. P. L., & Xiong, X. (2022). When stronger patent law reduces patenting: Empirical evidence. *Strategic Management Journal*. <https://doi.org/10.1002/SMJ.3464>
- Huang, Y., Wang, X., Zhang, Y., Chiavetta, D., & Porter, A. L. (2022). “Big data” driven tech mining and ST&I management: an introduction. *Scientometrics*, 127(9), 5227–5231. <https://doi.org/10.1007/S11192-022-04507-2/METRICS>
- IEA. (2021a). Global EV Outlook 2021 - Accelerating ambitions despite the pandemic. In *Global EV Outlook 2021*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVOutlook2021.pdf>
- IEA. (2021b). *Global Hydrogen Review 2021*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- IEA. (2022a). *Global EV Data Explorer – Data Tools - IEA*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
- IEA. (2022b). *Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>
- IEA, IRENA, UNSD, Bank-World, & WHO. (2022). Tracking SDG 7: The Energy Progress Report. In *The World Bank*. https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/2021_tracking_sdg7_chapter_6_outlook_for_sdg7.pdf
- IRENA. (2020a). *Green hydrogen: A guide to policy making*. International Renewable

Energy Agency. www.irena.org

- IRENA. (2020b). *Renewable Capacity Statistics 2020*. <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>
- IRENA. (2022). *Green hydrogen for industry: A guide to policy making*.
- Jackson, A., & Jackson, T. (2021). Modelling energy transition risk: The impact of declining energy return on investment (EROI). *Ecological Economics*, *185*, 107023. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2021.107023>
- Jiménez-Castro, M. P., Buller, L. S., Sganzerla, W. G., & Forster-Carneiro, T. (2020). Bioenergy production from orange industrial waste: a case study. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *14*(6), 1239–1253. <https://doi.org/10.1002/bbb.2128>
- Jung, N., & Ruiz-León, A. A. (2018). Lo local y lo global de la colaboración científica: ¿qué significa, y cómo visualizarlo y medirlo? *Revista Española de Documentación Científica*, *41*(2), 203–212. <https://doi.org/10.3989/REDC.2018.2.1463>
- Jürgens, B., & Herrero-Solana, V. (2017). Monitoring nanotechnology using patent classifications: an overview and comparison of nanotechnology classification schemes. *Journal of Nanoparticle Research*, *19*(4), 1–7. <https://doi.org/10.1007/S11051-017-3838-2>
- Kar, S. K., Harichandan, S., & Roy, B. (2022). Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(20), 10803–10824. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.137>
- Ketzer, F., Skarka, J., & Rösch, C. (2018). Critical Review of Microalgae LCA Studies for Bioenergy Production. *BioEnergy Research*, *11*(1), 95–105. <https://doi.org/10.1007/S12155-017-9880-1>
- Kovačić, M., Mutavdžija, M., & Buntak, K. (2022). New Paradigm of Sustainable Urban Mobility: Electric and Autonomous Vehicles—A Review and Bibliometric Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(15), 9525–9548. <https://doi.org/10.3390/SU14159525>
- Lahoti, G., Porter, A. L., Zhang, C., Youtie, J., & Wang, B. (2018). Tech mining to validate and refine a technology roadmap. *World Patent Information*, *55*, 1–18. <https://doi.org/10.1016/J.WPI.2018.07.003>
- Lanjouw, J. O., & Mody, A. (1996). Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology. *Research Policy*, *25*(4), 549–571. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(95\)00853-5](https://doi.org/10.1016/0048-7333(95)00853-5)
- Lassere, M. (2000). Pooled metaanalysis of radiographic progression: comparison of Sharp and Larsen methods. *J Rheumatol*, *27*(1), 269–275.

<https://europemc.org/article/med/10648053>

- Lee, Y., Lee, M. C., & Kim, Y. J. (2022). Barriers and strategies of hydrogen fuel cell power generation based on expert survey in South Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(9), 5709–5719. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.11.212>
- Liu, Z., Liu, L., & Zhou, Y. (2022). Modelling and simulation analysis of closed proton exchange membrane fuel cell system. *Energy Reports*, 8, 162–168. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.11.033>
- Loglet Lab 4. (2022). <https://www.logletlab.com/index?page=index&preload=library.get.1>
- Ma, S. C., Xu, J. H., & Fan, Y. (2022). Characteristics and key trends of global electric vehicle technology development: A multi-method patent analysis. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130502. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130502>
- Mao, G., Han, Y., Liu, X., Crittenden, J., Huang, N., & Ahmad, U. M. (2022). Technology status and trends of industrial wastewater treatment: A patent analysis. *Chemosphere*, 288, 132483. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132483>
- Marinova, D., & McAleer, M. (2006). Anti-pollution technology strengths indicators: International rankings. *Environmental Modelling & Software*, 21(9), 1257–1263. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2005.04.025>
- Mathieu, B., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*. <https://gephi.org/users/publications/>
- Miah, M. S., Hossain Lipu, M. S., Meraj, S. T., Hasan, K., Ansari, S., Jamal, T., Masrur, H., Elavarasan, R. M., & Hussain, A. (2021). Optimized Energy Management Schemes for Electric Vehicle Applications: A Bibliometric Analysis towards Future Trends. *Sustainability (Switzerland)*, 13(22), 12800–12838. <https://doi.org/10.3390/SU132212800>
- Michán, L., & Muñoz-Velasco, I. (2013). Cienciometría para ciencias médicas: definiciones, aplicaciones y perspectivas. *Investigación En Educación Médica*, 2(6), 100–106. [https://doi.org/10.1016/S2007-5057\(13\)72694-2](https://doi.org/10.1016/S2007-5057(13)72694-2)
- Ming-Yueh, T. (2008). A bibliometric analysis of hydrogen energy literature, 1965-2005. *Scientometrics*, 75(3), 421–438. <https://doi.org/10.1007/s11192-007-1785-x>
- Mirzadeh, A., Savage, D., Blackmore, K., & Juniper, J. (2020). The global patents dataset on the vehicle powertrains of ICEV, HEV, and BEV. *Data in Brief*, 32, 106042. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2020.106042>
- Mock, P., & Schmid, S. A. (2009). Fuel cells for automotive powertrains—A techno-economic assessment. *Journal of Power Sources*, 190(1), 133–140.

<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2008.10.123>

- Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, *106*(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/S11192-015-1765-5>
- Moogi, S., Nakka, L., Potharaju, S. S. P., Ahmed, A., Farooq, A., Jung, S. C., Rhee, G. H., & Park, Y. K. (2021). Copper promoted Co/MgO: A stable and efficient catalyst for glycerol steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(34), 18073–18084. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.08.190>
- Mori, M., Jensterle, M., Mržljak, T., & Drobnič, B. (2014). Life-cycle assessment of a hydrogen-based uninterrupted power supply system using renewable energy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *19*(11), 1810–1822. <https://doi.org/10.1007/S11367-014-0790-6>
- Mueller, S. C., Sandner, P. G., & Welp, I. M. (2015). Monitoring innovation in electrochemical energy storage technologies: A patent-based approach. *Applied Energy*, *137*, 537–544. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.06.082>
- Murphy, D. J., & Hall, C. A. S. (2010). Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1185*(1), 102–118. <https://doi.org/10.1111/J.1749-6632.2009.05282.X>
- Murugan, M., Saravanan, A., Elumalai, P. V., Murali, G., Dhineshabu, N. R., Kumar, P., & Afzal, A. (2022). Thermal management system of lithium-ion battery packs for electric vehicles: An insight based on bibliometric study. *Journal of Energy Storage*, *52*, 104723. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.104723>
- Nabgan, W., Tuan Abdullah, T. A., Mat, R., Nabgan, B., Gambo, Y., Ibrahim, M., Ahmad, A., Jalil, A. A., Triwahyono, S., & Saeh, I. (2017). Renewable hydrogen production from bio-oil derivative via catalytic steam reforming: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 347–357. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.069>
- Naciones Unidas. (2022). *Lucha contra el cambio climático - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change/>
- Nam, S., & Kim, K. (2017). Monitoring Newly Adopted Technologies Using Keyword Based Analysis of Cited Patents. *IEEE Access*, *5*, 23086–23091. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2764478>
- Norwegian Government's. (2020). *The Norwegian Government's hydrogen strategy*. <https://www.regjeringen.no/contentassets/8ffd54808d7e42e8bce81340b13b6b7d/hydrogenstrategien-engelsk.pdf>
- Oltra, V., & Saint, M. (2009). Variety of technological trajectories in low emission vehicles

- (LEVs): A patent data analysis. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 201–213. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2008.04.023>
- Osman, A. I., Deka, T. J., Baruah, D. C., & Rooney, D. W. (2020). Critical challenges in biohydrogen production processes from the organic feedstocks. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00965-x>
- Pinto, K., Bansal, H. O., & Goyal, P. (2022). A comprehensive assessment of the techno-socio-economic research growth in electric vehicles using bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 1788–1806. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-17148-4/TABLES/7>
- Pompil, B., & Le Maire, B. (2020). *National strategy for the development of low carbon hydrogen in France (In France)*. 1–17. <https://www.economie.gouv.fr/presentation-strategie-nationale-developpement-hydrogene-decarbone-france>
- Popp, D. (2003). Pollution control innovations and the Clean Air Act of 1990. *Journal of Policy Analysis and Management*, 22(4), 641–660. <https://doi.org/10.1002/PAM.10159>
- Popp, D. (2005). Lessons from patents: Using patents to measure technological change in environmental models. *Ecological Economics*, 54(2–3), 209–226. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2005.01.001>
- Porter, A. L., & Cunningham, S. W. (2005). Tech Mining: Exploiting New Technologies for Competitive Advantage. In *Tech Mining: Exploiting New Technologies for Competitive Advantage* (pp. 1–384). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/0471698466>
- Prananta, W., & Kubiszewski, I. (2021). Assessment of Indonesia’s Future Renewable Energy Plan: A Meta-Analysis of Biofuel Energy Return on Investment (EROI). *Energies*, 14(10), 2803–2818. <https://doi.org/10.3390/EN14102803>
- Prasad, R. (2016). Searching bioremediation patents through Cooperative Patent Classification (CPC). *Reviews on Environmental Health*, 31(1), 53–56. <https://doi.org/10.1515/REVEH-2015-0041>
- PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS. (2020). *Council of Ministers Resolution no. 63/2020 National Hydrogen Plan (In Portuguese)* (Diário da). Diário da República, 1.^a série. <https://dre.pt/application/conteudo/140346286>
- Pritchard, A. (1969). Statistical bibliography or bibliometrics. *Journal of Documentation*, 25, 348-. https://doi.org/10.18919/JKG.53.1_34
- Pu, G., Zhu, X., Dai, J., & Chen, X. (2022). Understand technological innovation investment performance: Evolution of industry-university-research cooperation for technological innovation of lithium-ion storage battery in China. *Journal of Energy Storage*, 46, 103607. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.103607>

- Raugei, M. (2019). Net energy analysis must not compare apples and oranges. *Nature Energy*, 4, 86–88. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0327-0>
- Sancho, R. (1990). Indicadores bibliométricos utilizados en la evaluación de la ciencia y la tecnología. Revisión bibliográfica. *Revista Española de Documentación Científica*, 13(3), 842–865. <https://doi.org/10.3989/REDC.1990.V13.I3.842>
- Schmuck, R., Wagner, R., Hörpel, G., Placke, T., & Winter, M. (2018). Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries. *Nature Energy*, 3(4), 267–278. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0107-2>
- Schubert, A., Glänzel, W., & Braun, T. (1989). Scientometric datafiles. A comprehensive set of indicators on 2649 journals and 96 countries in all major science fields and subfields 1981-1985. *Scientometrics*, 16(3), 478. <https://doi.org/10.1007/BF02093234/METRICS>
- Scientometrics*. (2022). <https://www.springer.com/journal/11192/aims-and-scope>
- Secinaro, S., Calandra, D., Lanzalonga, F., & Ferraris, A. (2022). Electric vehicles' consumer behaviours: Mapping the field and providing a research agenda. *Journal of Business Research*, 150, 399–416. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2022.06.011>
- Sinha, M., & Pandurangi, A. (2016). *Guide to Practical Patent Searching and how to use PatSeer for Patent Search and Analysis*. Gridlogics.
- Sinigaglia, T., Freitag, T. E., Kreimeier, F., & Martins, M. E. S. (2019). Use of patents as a tool to map the technological development involving the hydrogen economy. *World Patent Information*, 56, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2018.09.002>
- Song, H., Yang, X., & Yu, K. (2020). How do supply chain network and SMEs' operational capabilities enhance working capital financing? An integrative signaling view. *International Journal of Production Economics*, 220, 107447. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2019.07.020>
- Spain, M. (2020). *Hydrogen Roadmap. A commitment to renewable hydrogen (In Spain)*. https://www.miteco.gob.es/images/es/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF
- Spinak, E. (1996). *Diccionario enciclopédico de bibliometría, ciencias e informática* (UNESCO). UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243329>
- Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Senthil Kumar, P., Kapoor, A., & Xiao, L. (2022). Progress in the production of hydrogen energy from food waste: A bibliometric analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26326–26354. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.09.258>
- Swarnkar, R., Harikrishnan, R., & Singh, M. (2022). Analysis of Electric Vehicle Battery

- State Estimation Using Scopus and Web of Science Databases from 2000 to 2021: A Bibliometric Study. *World Electric Vehicle Journal*, 13(8), 157. <https://doi.org/10.3390/WEVJ13080157>
- The Contracting Parties. (1979). *Strasbourg Agreement Concerning the International Patent Classification*. <https://wipolex.wipo.int/en/text/291784>
- Tsang, S. S., Chang, F. C., & Wang, W. C. (2015). A survival analysis on fuel cell technology patent maintenance and values exploration between 1976 and 2001. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/387491>
- UNFCCC. (2015). *ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Paris Agreement text English*. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
- US Department of Energy. (1995). The Green Hydrogen Report. *The 1995 Progress Report of the Secretary of Energy's Hydrogen Technical Advisory Panel*. <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/greenhyd.pdf>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2020). VOSviewer Manual. *Universiteit Leiden, CWTS Meaningful Metrics*.
- Vantagepoint. (2023). *Software comercial de inteligencia artificial - VantagePoint*. <https://www.vantagepointsoftware.com/>
- Velazquez, 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>
- Verma, S., & Gustafsson, A. (2020). Investigating the emerging COVID-19 research trends in the field of business and management: A bibliometric analysis approach. *Journal of Business Research*, 118, 253–261. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2020.06.057>
- Vinkler, P. (2001). An attempt for defining some basic categories of scientometrics and classifying the indicators of evaluative scientometrics. *Scientometrics*, 50(3), 539–544. <https://doi.org/10.1023/A:1010519000767>
- Wagner, R., Preschitschek, N., Passerini, S., Leker, J., & Winter, M. (2013). Current research trends and prospects among the various materials and designs used in lithium-based batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*, 43(5), 481–496. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10800-013-0533-6>
- Walmsley, T. G., Walmsley, M. R. W., & Atkins, M. J. (2017). Energy Return on energy and carbon investment of wind energy farms: A case study of New Zealand. *Journal of Cleaner Production*, 167, 885–895. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.08.040>
- Walmsley, T. G., Walmsley, M. R. W., Varbanov, P. S., & Klemeš, J. J. (2018). Energy Ratio analysis and accounting for renewable and non-renewable electricity generation: A

- review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 328–345. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.09.034>
- Wang, C., Zhang, L., Chang, Y., & Pang, M. (2021). Energy return on investment (EROI) of biomass conversion systems in China: Meta-analysis focused on system boundary unification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110652. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110652>
- Wei, R., Lan, J., Lian, L., Huang, S., Zhao, C., Dong, Z., & Weng, J. (2022). A bibliometric study on research trends in hydrogen safety. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 1064–1081. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.01.078>
- Wenhua, L., Zihe, Y., Fangxu, S., Mingze, H., & Yangyang, W. (2021). Study on Near-Adiabatic Performance of Electric Vehicles' Lithium Battery at Low Temperature. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 16(5), 798–806. <https://doi.org/10.1002/TEE.23360>
- White, E., & Kramer, G. J. (2019). The Changing Meaning of Energy Return on Investment and the Implications for the Prospects of Post-fossil Civilization. *One Earth*, 1(4), 416–422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.010>
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A Definition of “Carbon Footprint.” In *In: C. C. Pertsova, Ecological Trends: Economics Research*. Nova Science Publishers. https://novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999
- WIPO. (2021, January). *IPC Publication*. <https://ipcpub.wipo.int>
- WIPO. (2022). *International Patent Classification (IPC) What is the IPC?* <https://tind.wipo.int/record/43106>
- Xi, Y., & Xiang, Y. (2020). Patent analysis for graphene technology in ICT industry. *26th International Association for Management of Technology Conference, IAMOT 2017*, 1125–1141.
- Xu, X., Shao, Z., & Jiang, S. P. (2022). High-Entropy Materials for Water Electrolysis. *Energy Technology*, 10(2200573), 1–17. <https://doi.org/10.1002/ENTE.202200573>
- Yang, W., Yu, X., Wang, D., Yang, J., & Zhang, B. (2019). Spatio-temporal evolution of technology flows in China: patent licensing networks 2000–2017. *The Journal of Technology Transfer*, 46(5), 1674–1703. <https://doi.org/10.1007/S10961-019-09739-8>
- Yong, J. Y., Ramachandramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365–385. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.130>
- Young, K. H. (2016). Research in nickel/metal hydride batteries 2016. *Batteries*, 2(4), 1–5.

<https://doi.org/10.3390/batteries2040031>

- Yu, M., Wang, K., & Vredenburg, H. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41), 21261–21273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>
- Yuan, R., Pu, J., Wu, D., Wu, Q., Huhe, T., Lei, T., & Chen, Y. (2022). Research Priorities and Trends on Bioenergy: Insights from Bibliometric Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15881. <https://doi.org/10.3390/IJERPH192315881>
- Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., & Amine, K. (2019). Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles. *Advanced Energy Materials*, 9(27), 1900161. <https://doi.org/10.1002/AENM.201900161>
- Zhang, H., Shen, G., Liu, X., Ning, B., Shi, C., Pan, L., Zhang, X., Huang, Z. F., & Zou, J. J. (2021). Self-supporting NiFe LDH-MoS_x integrated electrode for highly efficient water splitting at the industrial electrolysis conditions. *Chinese Journal of Catalysis*, 42(10), 1732–1741. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(21\)63796-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(21)63796-8)
- Zhang, H., Wong, K. H., & Chang, V. (2021). Patent Analysis in the 5G Network. *Journal of Global Information Management*, 29(6), 1–28. <https://doi.org/10.4018/jgim.20211101.0a28>
- Zhao, X., Wang, S., & Wang, X. (2018). Characteristics and Trends of Research on New Energy Vehicle Reliability Based on the Web of Science. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 3560. <https://doi.org/10.3390/SU10103560>
- Zheng, B., Shen, Y., Sun, P., Liu, R., Meng, J., Chang, R., Gao, T., & Liu, Y. (2021). Effects of particle sizes on performances of the multi-zone steam generator using waste heat in a bio-oil steam reforming hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34), 18064–18072. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.10.269>
- Zheng, B., Sun, P., Meng, J., Liu, Y., Wang, G., Tang, S., Xu, J., & Zhang, K. (2020). Effects of fin structure size on methane-steam reforming for hydrogen production in a reactor heated by waste heat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(39), 20465–20471. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.10.143>
- Zhong, B., Cheng, B., Zhu, Y., Ding, R., Kuang, P., & Yu, J. (2022). Hierarchically porous nickel foam supported Fe-Ni₃S₂ electrode for high-current-density alkaline water splitting. *Journal of Colloid and Interface Science*, 629, 846–853. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2022.09.007>
- Zhou, C., Ren, Y., Yan, X., Zheng, Y., & Liu, B. (2022). A Bibliometric and Visualized Overview of Hydrogen Embrittlement from 1997 to 2022. *Energies*, 15(23), 9218.

<https://doi.org/10.3390/EN15239218>

Zou, W., Sun, Y., Gao, D. ce, Zhang, X., & Liu, J. (2023). A review on integration of surging plug-in electric vehicles charging in energy-flexible buildings: Impacts analysis, collaborative management technologies, and future perspective. *Applied Energy*, 331, 120393. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120393>

Sección II: Conclusiones

En la presente sección se presentan las conclusiones más relevantes obtenida en cada uno de los artículos. Además, se incluyen conclusiones generales considerando los elementos abordados en las tres publicaciones y las futuras líneas de investigación.

1. Conclusiones de la publicación 1:

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes alcanzadas en la publicación 1:

El panorama científico en el campo de los EVs en LATAM está matizado por una baja productividad científica de sus organizaciones y autores. Sin embargo, es importante considerar que el número de publicaciones mantiene un crecimiento exponencial en los últimos años, sin que esto les permita alcanzar una posición de liderazgo a nivel mundial. Estos resultados pueden estar relacionado con el hecho de que, aunque existen redes de colaboración a nivel de los países, las organizaciones y autores, estas solo alcanzan a formar pequeños clústeres que colaboran con baja frecuencia.

Por otra parte, considerando el índice de actividad científica o índice de especialización se pudo evidenciar que aquellos países con mayor potencial científico en la región, como son el caso de Brasil y México, tienen escaso enfoque hacia la investigación sobre los EVs. Además, específicamente mediante el análisis de palabras clave se determinó que las investigaciones en el campo de los vehículos eléctricos en LATAM tienen baja orientación hacia las “Baterías de ion de litio”.

Al abordar el tema del financiamiento se determinó que existe una alta correlación positiva entre el financiamiento y el número de investigaciones publicadas por cada país. Siendo el coeficiente de correlación del 0,95.

Por tanto, teniendo en cuenta las conclusiones presentadas anteriormente, se considera importante que las principales agencias de financiamiento científico en la región Latinoamericana como son: el Consejo Nacional De Desarrollo Científico Y Tecnológico (CNPQ), la Fundacao De Amparo A Pesquisa Do Estado De Sao Paulo (FAPESP), la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), el Consejo Nacional De Ciencia Y Tecnología (CONACYT), el Consejo Nacional De Investigaciones Científicas Y Técnicas (CONICET), entre otras, consideren en la formulación de sus políticas el fortalecimiento del financiamiento hacia los proyectos de investigación que focalicen los aspectos relacionados con los EVs y fundamentalmente aquellos asociados a las tecnologías del litio. Además, favorecer aquellos proyectos que consideren el desarrollo de redes de colaboración tanto

nivel nacional, regional e internacional, siempre evaluando la relevancia de los investigadores que componen la red de colaboración propuesta.

2. Conclusiones de la publicación 2:

A continuación, se relacionan las principales conclusiones alcanzadas en la publicación 2:

En la segunda investigación se concluye que, en la región de LATAM, el espacio tecnológico en el campo de los procesos de conversión electroquímica está liderado por Brasil, México y Argentina en las categorías de país inventor y país de publicación. Siendo los países que lideran los flujos de transferencia de estas patentes hacia LATAM, USA, Japón y Alemania que representan más del 66% de todas las patentes publicadas en la región. Esto indica que existe alta dependencia de las patentes extranjeras, lo que evidencia un débil desarrollo del ecosistema de innovación para este campo en estos países.

El registro de las publicaciones de patentes clasificadas bajo los códigos específicos para pila de combustible (H01M 8/00) han tenido un mejor desempeño que las indexadas para las LIB (H01M 10/052). Lo cual entra en contraposición, con el hecho que las LIB son las que lideran este espacio tecnológico en el contexto internacional, por tanto, se estimaba que estas fuesen las más transferidas hacia LATAM. En la práctica este resultado tiene implicancia en el rezago identificado en este estudio para la curva tecnológica (curva S) de las LIB en LATAM, que la sitúa en fase de crecimiento-consolidación (II), al tiempo que otros estudios la ubican en penetración de mercado (III), e incluso en una fase de saturación (IV), en el contexto mundial. Como otras causas de este retraso también se pueden atribuir la baja productividad de los inventores locales y el retraso de los tiempos de transferencia desde los países de prioridad. Por su parte, las celdas de combustible se encuentran en una fase de madurez, mostrando una mayor sincronización respecto a la evolución mostrada por otros estudios, lo que se explica por el hecho de que estas han registrado un mayor número de transferencias a LATAM con un menor rezago en los tiempos de transferencia.

Desde el punto de vista metodológico esta publicación realizó dos importantes aportes que pueden aplicarse para realizar evaluaciones tecnológicas en cualquier campo:

En primer lugar, se propuso el indicador “Patentes amigables con las tecnologías sustentables” (PFST), el cual basado en la co-indexación con el código Y02 de la clasificación CPC, permitió determinar que las patentes publicadas en LATAM en el campo estudiado en un 79,3% presentan atributos que responden a la mitigación o adaptación al cambio climático. Por lo tanto, los esfuerzos y acciones que se realicen en este campo contribuirían a fortalecer los compromisos asumidos por los países de la región en el marco del Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La segunda propuesta fue una matriz de adopción tecnológica, que permitió realizar representaciones del estado de adopción tecnológica que presenta cada país latinoamericano basado en dos variables, el registro de patentes nacionales vs el registro de patentes transferidas desde los países extranjeros. Siendo Brasil el país que presenta mejor balance entre patentes desarrolladas por inventores brasileños y patentes transferidas desde otros países, lo que lo convierte en el único país clasificado en el cuadrante de “Expansión”. México se ubica en el cuadrante “Adopción”, y el resto de los países liderado por Argentina se ubican en el cuadrante de “Iniciación”. Al respecto se considera necesario promover retos de innovación para estimular la producción de soluciones locales que den respuesta a los problemas de este sector industrial y equilibrar la dependencia de las invenciones extranjeras. De igual manera, también existe la oportunidad de aumentar el número de patentes transferidas diversificando la transferencia de conocimiento de aquellos países con liderazgo mundial en el registro de patentes, como China, Corea del Sur y otros países del bloque europeo. En cualquier caso, las políticas relevantes de LATAM deben promover un equilibrio entre las patentes nacionales e internacionales.

Considerando que la mayoría de los países de LATAM se encuentran en una etapa temprana de adopción tecnológica, es necesario formular estrategias en tres direcciones: la primera, el desarrollo de investigación aplicada con desafíos relacionados con estas tecnologías; la segunda, la adopción subvencionada de tecnologías en este sector con el fin de impulsar la promoción de las mejores invenciones y consecuentemente el desarrollo de estas actividades industriales; y el tercero, diseñar e implementar legislaciones restrictivas o de incentivos enfocadas a la industria automotriz y sus proveedores de baterías que son los principales sectores industriales involucrados en este campo, considerando también a las empresas mineras y futuros proveedores de H₂, por su importancia en la cadena de valor de la fabricación automotriz, así como por su gran capacidad financiera.

También se enfatiza en la necesidad de acercar las universidades al sector productivo. Debido a que, en la práctica, muchos países de LATAM tienen políticas claras en cuanto a la promoción de la investigación y estas políticas son parte de los requisitos para la acreditación universitaria, lo que se refleja en la cantidad de artículos científicos publicados, sin embargo, no se establecen metas específicas enfocadas a la generación de patentes.

3. Conclusiones de la publicación 3:

A continuación, se relacionan las principales conclusiones alcanzadas en la publicación 3:

El análisis bibliométrico sobre los conceptos de H₂, indica que el H₂V es un concepto nuevo, del que no existe claridad en cuanto su conceptualización técnica. Al respecto se comprobó que en algunos casos este término se usa como sinónimo de H₂R y H₂S. Aunque también se

evaluó el uso de los términos H₂E y H₂L, se determinó que estos son muy pocos usados en la literatura científica. En general se determinó que el término H₂R, es el más usado seguido por el H₂S. En el caso de este último se pudo relacionar con investigaciones que abarcan fuentes de energías diferentes a las FER.

A partir de la revisión de las estrategias mundiales sobre H₂ se pudo determinar que, aunque algunos países tienen identificado la energía solar y eólica como las principales FER para producir H₂, otros hacen referencia al uso de las FER en general, lo que naturalmente incluye fuentes como la familia de las biomásas. Al respecto, en el artículo se plantean algunas deficiencias de los procesos de explotación de biomásas conocido en la actualidad, por lo cual se considera que estas solo deberían ser clasificadas como H₂R y no como H₂V. Un aspecto en lo que coinciden plenamente las estrategias, es que proyectan sus objetivos respecto en “capacidad instalada de electrolizadores (en GW)” por tanto, esto permite indicar que la principal tecnología para producir H₂ es la electrolisis.

Por otra parte, basado en los valores del EROI obtenido de los estudios metaanálisis se determinó que las FER, hidráulica, eólica y la solar son las más eficientes. Por tanto, esto las convierte en las principales candidatas para la producción de H₂V, especialmente la eólica y la solar que son la que presentan mayor posibilidad de crecimiento. Por el contrario, las biomásas presentan valores de EROI que la ubican como proyectos de riesgo, muy riesgoso e incluso no factible para el caso del Biodiesel (Microalgas).

Finalmente, en esta investigación se presenta un esquema de clasificación que permite establecer límites entre los conceptos de H₂V, H₂R e H₂S, a partir de evaluaciones de criterios de sostenibilidad de las fuentes de energías utilizadas para su producción. Al respecto se promueve el concepto de H₂V como un portador energético con características superiores en cuanto a uso de FER, con bajas emisiones de CO₂, libre de otras emisiones y alta valoración por parte de la comunidad. En cuanto al término H₂R, se considera que tiene un alcance más amplio, pudiendo incluir las biomásas u otras FER y métodos para la producción de H₂ que no sean totalmente limpios o eficientes. Incluso, si presentan bajos valores de EROI, lo que implicaría que no sería sostenible. Por último, el término H₂S, puede considerar la combinación de FER con otras fuentes, pero esencialmente debe considerar una mejora en al menos un criterio de sostenibilidad, sin que esta provoque el deterioro de uno de los otros criterios.

4. Conclusiones generales

En general, se puede concluir que la región de LATAM tiene un débil desempeño tanto a nivel de generación de publicaciones de investigaciones relacionadas con los EVs como a

nivel de generación de patentes de inventivas habilitantes para el desarrollo e implementación de los EVs, como son las LIB y las celdas de combustibles. Especialmente, el espacio tecnológico de la LIB ha sido poco abordado por investigadores e inventores latinoamericanos en comparación con los resultados que se muestran a nivel internacional.

El H₂V se proyecta como un vector energético que será capaz de alimentar un gran segmento de los EVs, particularmente los FCEV. Partiendo de este contexto es necesario tener una visión que integre en las políticas energéticas una visión de conjunto que considere en los procesos de producción de H₂ aspectos relacionados a la distribución y las unidades de consumo.

En esta tesis se validaron el uso de las herramientas de análisis bibliométrico de publicaciones científicas y la patentometría como metodologías capaces de caracterizar un campo tecnológico específico. Sin embargo, es importante realizar una observación en cuanto su utilidad, particularmente para el caso de la colaboración, las métricas de patentes no parecen ser adecuadas, ya que por naturaleza una patente constituye un mecanismo de protección al conocimiento mediante el cual se generan ingresos monetarios. En cambio, las investigaciones con resultados de publicaciones se han convertido en un espacio colaborativo, entre académicos, estudiantes e investigadores en general.

Finalmente, la principal recomendación de esta tesis es que dada la gran importancia que tienen los procesos relacionados con el H₂V y los EVs para el futuro cercano de la humanidad, los países de LATAM deben avanzar en estrategias concretas que les permitan tener un rol activo dentro de estos procesos. Evitando así el retraso tecnológico en temas que pueden tener un impacto directo en su sostenibilidad, competitividad y actividad económica en general.

Las conclusiones de la presente tesis tienen alta relevancia para los tomadores de decisión y los gestores de políticas públicas con capacidad de orientar la actividad investigadora de LATAM hacia los compromisos asumidos en el marco del Acuerdo de París y los ODS. De igual manera, las novedosas herramientas de análisis planteadas constituyen un aporte metodológico que puede ser aprovechado por los investigadores relacionados con el campo de la patentometría y la cienciometría en general. Por último, se espera que la conceptualización del H₂V propuesta, contribuya al reconocimiento por parte de los clústeres del sector energético, como un portador energético con atributos superiores con capacidad para lograr la descarbonización de la economía mundial.

5. Líneas futuras de investigación

Esta tesis me permitió adentrarme en el apasionante y dinámico campo de la transformación energética que experimenta la humanidad, concretamente en los aspectos relacionados con la producción científica para la temática de los EVs y la adopción de patentes de tecnologías de conversión electroquímica en LATAM. Además, se ha contribuido a lograr un mayor conocimiento de la caracterización de la conceptualización del H₂V. Sin embargo, dado la alta complejidad del campo y su amplio ámbito de tecnologías, quedan aspectos donde profundizar y que podrían ser desarrollados en futuras líneas de investigación:

En primer lugar, se pretende profundizar en otros aspectos de gran relevancia para la implementación masiva de los EVs y los FCEV. Especialmente los sistemas de carga, la seguridad y prevención de riesgos y aspectos económicos relacionados con su adopción.

En segundo lugar, considerando que la cadena de producción de H₂ involucra un amplio espectro de tecnologías, se proyectan otras investigaciones que analicen el estado de las tecnologías asociadas a la producción, el almacenamiento, distribución, y las formas de consumo del H₂. Abordando temas específicos como el uso del calor residual, el transporte por tuberías (ductos), la seguridad y prevención de riesgos en la cadena de suministro, entre otros. También se considera necesario abordar el potencial de producción de H₂V respecto al potencial de crecimiento que tienen las diferentes FER en cada país. En este sentido ya se inició una investigación que fue presentada en el XV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial y Gestión Industrial y XXV Congreso de Ingeniería de Organización.

Otra línea de investigación relevante sería el análisis de la sustentabilidad de la producción de H₂V, la cual puede verse impactada por factores tales como el tamaño de los proyectos, las distancias, la eficiencia tecnológica, la eficiencia de las FER y la eficiencia de la cadena de suministro. Por tanto, se proyectan otras investigaciones futuras que analicen las distintas etapas de la cadena de producción y distribución basado en los distintos modelos utilizados para los cálculos del EROI, es decir el EROI_{pou}, EROI_{ext}, entre otros.

Sección III: Trabajos publicados

En esta tercera sección se anexan los artículos publicados. De cada uno se presenta una ficha que indica los indicios de calidad e información general de la revista de publicación.

Artículo 1 (P1)

La tabla 6 muestra la información referente al impacto y datos de la revista del artículo 1.

Tabla 6: Indicadores del primer artículo.

Título: Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos	
Revista: Dirección y Organización	DOI: https://doi.org/10.37610/DYO.V0I75.610
Fecha de envío: 12-01-2021	Fecha de Publicación: 20-12-2021
Coautor 1: Willmer Guevara Ramírez	Grado: Candidato a Doctor
Coautor 2: Itziar Martínez De Alegría	Grado: Doctor
Coautor 3: Rosa María Río Belver	Grado: Doctor
Coautor 4: Cristian Morales Letzkus	Grado: Doctor
Base de datos de indexación: Scopus	
Categoría: Management	Índice de impacto: 0,201
Posición que ocupa la revista: 245	Número de revistas en el área: 351
Quartil: Q3	Año: 2021
Categoría: Engineering, Industrial and Manufacturing Engineering	Índice de impacto: 0,201
Posición que ocupa la revista: 253	Número de revistas en el área: 368
Quartil: Q3	Año: 2021
Citar como: Guevara-Ramírez, W., Río-Belver, R. M., Alegría, I. M. de, & Letzkus, C. M. (2021). Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos. Dirección y Organización, (75), 62–73. https://doi.org/10.37610/DYO.V0I75.610	

Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos

Willmer Guevara Ramirez, Rosa-Maria Río-Belver, Itziar Martínez de Alegria,
Cristian Morales Letzkus

Recibido: 12 de Enero de 2021
Aceptado: 5 de Abril de 2021

<https://doi.org/10.37610/dyo.v0i75.610>

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo analizar mediante un análisis bibliométrico la contribución científica latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos, utilizando las investigaciones indexadas en la Web of Science (WOS) en el periodo 2001-2019. Los resultados muestran poca contribución de los países latinoamericanos, sus organizaciones y autores, además de un bajo enfoque hacia las investigaciones sobre las baterías de litio. Lo que permite concluir que las organizaciones y agencias de financiamiento científico de la región deberían potenciar las investigaciones en la temática, favoreciendo los proyectos que proponga amplias redes de colaboración que permita una rápida transferencia de conocimiento.

Palabras clave

Vehículos eléctricos, Baterías de litio, Latinoamérica, Índice de actividad, Producción científica.

1. Introducción

Los vehículos eléctricos (en lo adelante “EVs”, por sus siglas en inglés) surgieron como una contribución importante a dos problemáticas que ocupan la agenda de muchos países y organizaciones mundiales. En primer lugar, se encuentra el cambio climático y su impacto sobre los ecosistemas (Walther et al., 2002; Thomas et al., 2004). Entre sus principales causas están las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a la quema de combustibles fósiles por parte de la industria y los medios de transporte (Fargione

et al., 2008; Tukker & Jansen, 2006). En segundo lugar y estrechamente asociada a la primera, está la preocupación acerca de las reservas mundiales de combustibles fósiles. En la actualidad estas reservas son limitadas y el incremento de su consumo (Owen et al., 2010) provoca importantes variaciones en sus precios y genera grandes conflictos en el control estratégico de estos recursos naturales.

Los EVs, como su nombre lo indica, son vehículos propulsados por motores eléctricos. Entre sus ventajas está la independencia de los combustibles tradicionales, la no emisión de gases a la atmósfera y una menor frecuencia entre mantenimientos (Delucchi, & Lipman, (2001). Algunos países como Noruega, Francia, Reino Unido se han puesto como meta la sustitución total o parcial de los vehículos a combustión por autos eléctricos. Según el Observatorio Europeo de Combustible Alternativos, en el 2019 varios países de bloque mostraron importantes crecimientos en término de venta de autos eléctricos, así como en el desarrollo de la infraestructura de carga. En general, el Parlamento Europeo estableció un objetivo para que el 40% de los automóviles y furgonetas nuevos sean vehículos con cero o bajas emisiones para 2030 (European Parliament, 2018). Sin embargo, otras regiones no muestran el mismo avance y perspectiva en el tema. Por ejemplo, los países latinoamericanos muestran discretas iniciativas dirigidas al transporte público y un débil crecimiento en la venta de unidades a particulares. Este tema tiene mayor relevancia en esta área geográfica si se analiza el rápido crecimiento que ha tenido la venta de vehículos nuevos de tipo convencional, lo que incrementa emisión de gases (Rehermann & Romero, 2018; González et al., 2019)

A pesar de las grandes ventajas la tecnología de los EVs aún tiene importantes desafíos como son la autonomía, el costo

✉ Willmer Guevara Ramirez *
willmer.guevara@incapmail.cl
 <https://orcid.org/0000-0001-9210-0786>

Rosa-Maria Río-Belver *
rosamaria.rio@ehu.es
 <https://orcid.org/0000-0002-4244-9098>

Itziar Martínez de Alegria **
itziar.martinezdealegria@ehu.es
 <https://orcid.org/0000-0003-0731-3010>

Cristian Morales Letzkus ***
cmorales@ucn.cl
 <https://orcid.org/0000-0003-1414-8906>

* University of the Basque Country (UPV/EHU) Faculty of Engineering in Vitoria-Gasteiz Industrial Organization and Management Engineering Department C/ Nieves Cano 12, 01007 Vitoria, Spain

** University of the Basque Country (UPV/EHU) Faculty of Engineering in Vitoria-Gasteiz Industrial Organization and Management Engineering Department PI Ingeniero Torres Quevedo 1, 48113 Bilbao, Spain

*** Escuela de Ciencias Empresariales, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile

de producción y la infraestructura para la carga. Sin embargo, las baterías de litio (ion de litio y de estado sólido) parece ser una solución para los dos primeros. Su rendimiento es superior que el de las tecnologías tradicionales, en al menos un factor de 2.5, en términos de energía entregada (Dunn et al., 2011). Adicionalmente, proporciona alta potencia específica considerándose la batería idónea para alimentar la próxima generación de vehículos eléctricos, aunque su autonomía sigue siendo menor a la de los vehículos de combustión (Bruce et al., 2012; Choi, & Aurbach, 2016; Schmuck et al., 2018). Estas baterías han revolucionado el almacenamiento de energía debido a su gran autonomía, rapidez de carga, menor peso, alta eficiencia y larga vida (Scrosati & Garche, 2010).

Entre los principales componentes para la fabricación de estas baterías está el litio. Y en los países sudamericanos se concentran las mayores reservas de este mineral a nivel mundial, siendo Chile el principal exportador de este bien (U.S. Geological Survey, 2019). Sin embargo, para que estos países logren maximizar sus beneficios deben dejar de ser exportadores de commodities y convertirse en productores y exportadores de tecnologías en este tópico. Por otra parte, una apuesta hacia el desarrollo de los EVs en la región podría tener un impacto importante en la generación de empleo y la reducción de la contaminación (Sauer et al., 2015). En este sentido, dada la relación vehículo eléctrico- batería de litio-reservas de litio disponibles en la región, la contribución de las investigaciones científicas sobre la temática resulta crucial para lograr estos objetivos. Así, este trabajo busca responder a la interrogante ¿Cuál ha sido la contribución de los investigadores latinoamericanos en la temática de los vehículos eléctricos? Aunque el foco de esta investigación no son las baterías de ion de litio, es conveniente analizar la participación que tiene las investigaciones este tema específico.

Las investigaciones sobre los vehículos eléctricos crecen a un ritmo que la evaluación de su progreso se vuelve obsoleto rápidamente (Scrosati & Garche, 2010; Girishkumar et al., 2010). Para entender el comportamiento y las tendencias

de un área de investigación específica, es frecuente el uso de la bibliometría que es una disciplina de la ciencia que emplea métodos estadísticos y matemáticos (Moed et al., 1995; Archambault et al., 2009). Entre sus ventajas esta la disponibilidad de varios softwares que permiten el procesamiento y representación de la información de manera amigable (Chen, 2006; Van Eck & Waltman, 2010; García et al., 2015). Su aplicación es transversal a cualquier tema en particular como por ejemplo la educación, los negocios, los combustibles, etc. (Martin et al., 2011; Chen et al., 2012; Liu et al., 2019). En particular, los estudios bibliométricos recientes relacionados a los vehículos eléctricos abordan temas como el impacto socioeconómico de la extracción de minerales de litio (Agusdinata et al., 2018), y la fiabilidad desde el punto de vista de la mantenibilidad de los vehículos eléctricos (Zhao et al., 2018). Otra línea de investigación dentro de los vehículos eléctricos, lo constituye las baterías de combustible de hidrogeno (Alvarez-Meaza et al., 2020).

En este contexto la presente investigación se enfoca en la región latinoamericana, y tiene como objetivo evaluar mediante un análisis bibliométrico la contribución científica de esta región en la temática de vehículos eléctricos. Para ello, se tuvieron en cuenta las investigaciones publicadas en revistas indexadas en la Web of Science (WOS) en el periodo 2001-2019. El estudio contempla el análisis de la evolución de la producción científica, la contribución por países, organizaciones, autores y revistas basada en la cantidad de publicaciones, números de citas y redes de coautoría. Incluye el análisis de palabras claves. También, se aplica el indicador de actividad científica para medir la especialización de los países en el tema, así como la relación entre productividad científica y financiamiento.

2. Metodología

Los datos fueron obtenidos de la Web of Science (WOS) en su colección principal. En la tabla 1 se detallan los aspectos relevantes de la búsqueda y resultados utilizando un procedimiento similar a (Alvarez-Meaza et al., 2019).

Tabla 1 Procedimiento de búsqueda de artículos científicos en la Web of Science sobre la temática de vehículos eléctricos y resultados obtenidos
 Fuente: Elaboración propia, 2020.

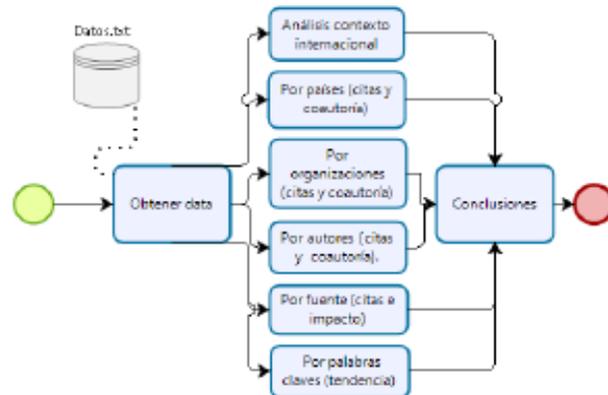
Aspectos	Descripción	Resultados
Ecuación	(TS = ((electric* NEAR/3 vehicle*) OR (*hybrid electric* NEAR/3 vehicle*) OR (electric* NEAR/3 car) OR (*hybrid electric* NEAR/3 car) OR (electric* NEAR/3 cars) OR (*hybrid electric* NEAR/3 cars)))	18748 docs
Filtro países	(Costa Rica O Colombia O México O Chile O Argentina O Cuba O Brazil O Panamá O Trinidad O Uruguay O Ecuador)	360 docs
Periodo	2001-2019	
Tipo de documentos	Artículos y contribuciones a congresos	
Fecha de la búsqueda	11 de enero 2020	

El procesamiento de los datos se realizó mediante el software gratuito VOSviewer que permite construir y visualizar redes bibliométricas de países, organizaciones, autores, revistas, y palabras claves (Van Eck y Waltman, 2007). Entre las ventajas de su uso están la capacidad de procesamiento de gran cantidad de datos y la disponibilidad

de literatura con descripción metodológica de su manejo (Van Eck, et al., 2006; Van Eck y Waltman, 2007; Van Eck y Waltman, 2010).

El procesamiento y análisis de los datos se realizó siguiendo la estructura que se muestra en la figura 1.

Figura 1 Estructura del análisis bibliométrico.



Para el análisis bibliométrico se utilizaron indicadores clave como son cantidad de cita por documentos (CPP), cantidad de documentos (récores), porcentaje que representa entre el total de documentos (%), factor de impacto (IF) y cuartil (Q) (Moed, et al., 1995; Moed, 2009; Liu et al., 2019).

P: Producción total de documentos en el mundo para todas las temáticas.

De manera general, existe una tendencia a analizar la producción científica de los países realizando comparaciones o ranking atendiendo a la cantidad de publicaciones, pero no se tiene en cuenta el tamaño de los países o si realmente tienen un enfoque hacia la temática analizada. En este estudio, utilizamos el índice de actividad (IA) de Schubert et al (1989), el cual estandariza la producción científica de los países para una temática específica con respecto a la producción mundial, lo que permite realizar comparaciones de manera más objetiva. Su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

Debido a la gran cantidad de documentos existentes, se recomienda que el IA se calcule año por año y se analice su evolución en el tiempo. Cuando el IA es mayor a 100 se considera que el país tiene especialización en el tema.

$$IA_{iK} = \frac{(p_{iK}/P_i)}{(P_K/P)} * 100 \tag{1}$$

Por último, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para identificar la relación existente entre la productividad científica en la temática de los EVs en cada país y la cantidad de publicaciones sobre EVs financiadas por las principales agencias de financiamiento científico estatal de cada país analizado.

Donde:

3. Resultados y Análisis

IA_{iK} : índice de actividad científica de país i en la temática K.

3.1. Análisis de la producción científica latinoamericana relacionada a vehículos eléctricos en el contexto internacional

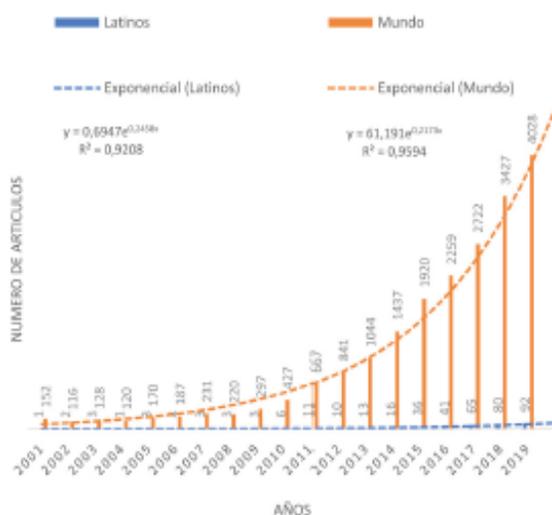
p_{iK} : Producción en cantidad de documento del país i en la temática k.

La participación promedio de la literatura Latinoamérica en el conocimiento sobre vehículos eléctricos en el contexto mundial es baja, solo un 1.8%. Es relevante que presenta una tendencia creciente exponencial similar a los resultados de los investigadores del mundo para la temática (Figura 2).

p_i : Producción total de documentos del país i.

P_K : Producción en cantidad de documento en el mundo para la temática k.

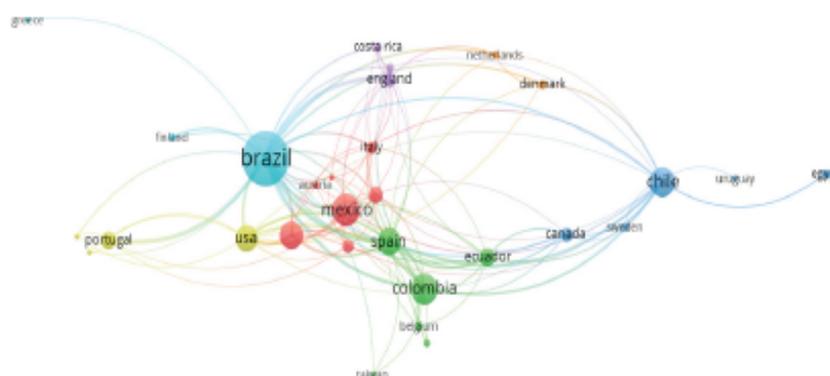
Figura 2 Publicaciones anuales sobre la temática de los vehículos eléctricos de los países latinoamericanos vs el mundo en periodo 2001-2019.



En la región, la investigación sobre esta temática está liderada por Brasil con 170 documentos citados 3310 veces, seguido por México (59 con 629 citas) y Colombia (56 con 346 citas). En el cuarto lugar aparece Chile con 50 documentos que, sin embargo, cuenta con un mayor número

de citas (1539) que los dos países que lo preceden. Los países donde existe un mayor flujo de conocimiento con Latinoamérica, reflejado a través de las citas de documentos son Estados Unidos (USA), España, Italia e Inglaterra, entre otros (Figura 3).

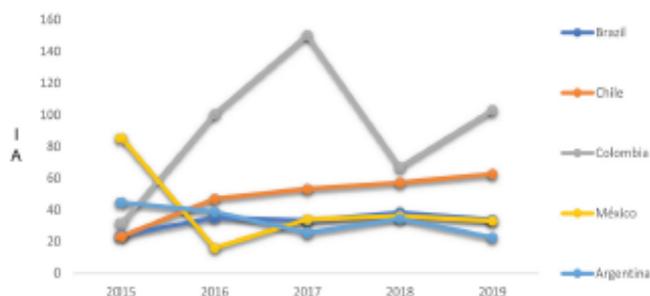
Figura 3 Mapa de citación de documentos generados por países latinoamericanos en estudios sobre vehículos eléctricos en el periodo 2001- 2019.



En general, los países latinoamericanos muestran baja especialización en la temática de los vehículos eléctricos. El índice de actividad científica (IA) posiciona a Colombia

como el país más especializado con un valor promedio de 91, seguido por Chile con 49 y México con 41 (Figura 4). Chile es el único país con tendencia creciente.

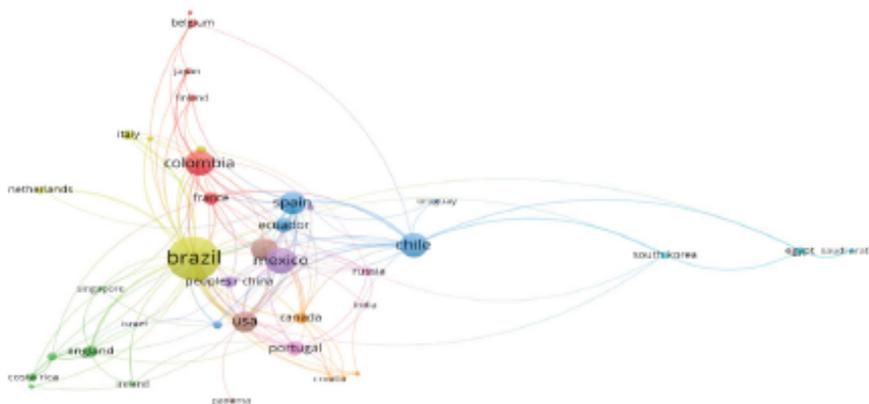
Figura 4 Índice de actividad científica (IA) para los países latinoamericanos en publicaciones sobre vehículos eléctricos en el periodo 2015-2019.



La colaboración de autoría entre países latinoamericanos es baja comparada con países de otras regiones, con clústeres de un máximo de tres países (Figura 5). Brasil lidera con 30 links y una fuerza total de asociación de 114. Le siguen Chile con 17 y Colombia con 16 conexiones, ambos con similar número de colaboraciones. Sin embargo, Chile colabora con mayor frecuencia según la fuerza total de asociación 42 vs

32. Respecto a la colaboración con países de otras regiones destacan las redes con Estados Unidos, España, China, Francia, entre otros. Estas redes son muy importante para los países latinoamericanos porque en muchos casos le permite acceder a recursos económicos y la transferencia de nuevos conocimientos (Jung, N. & Ruiz-León, A., 2018).

Figura 5 Mapa de coautoría de los países latinoamericanos en estudios sobre vehículos eléctricos en el periodo 2001- 2019.

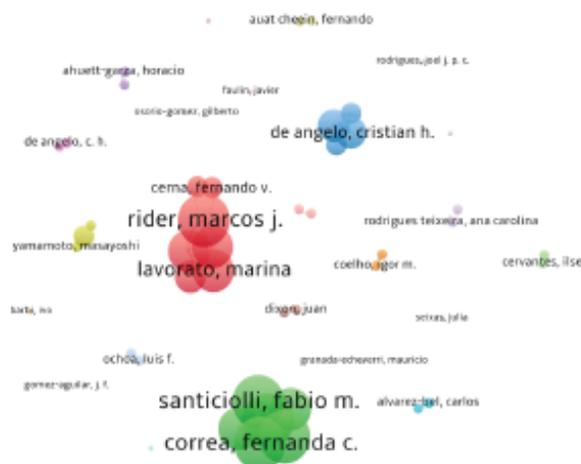


3.2. Análisis de producción, citas y coautoría por organizaciones

El top 10 de las organizaciones latinoamericanas está liderado por la Universidad de São Paulo (Brasil) con 19 publicaciones (Tabla 2). Por otra parte, la Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile) destaca en cantidad de

citas por documentos (CPP) con 84, muy superior al resto de las otras organizaciones. Como se puede apreciar el promedio de citas que alcanzan estos documentos es bajo. Esto puede estar influenciado porque es una temática emergente en la región y sus primeras publicaciones fueron a principio del siglo XXI con muy baja productividad de documentos en los primeros 10 años de análisis.

Figura 7 Mapa de coautoría de autores latinoamericanos en estudios sobre vehículos eléctricos (2001-2019).



Entre los autores latinoamericanos con mayor relevancia en la temática se encuentran Jorge Moreno, Micah E. Ortúzar y Juan W. Dixon con su artículo “Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks” que alcanza 416 citas, y otro artículo sobre la implementación y evaluación de este tema con 279 citas. La investigación de Mattos y Noranhan aparece con 403 citas a pesar de contar con fecha más reciente de publicación (Tabla

3). La relevancia de estos trabajos atendiendo al indicador número de citas, es menor a las investigaciones más destacadas temática a nivel mundial que superan las 5000 citas. Estos trabajos que alcanzan mayor número de citas a nivel global son estudios relacionados las baterías de ion de litio, sin embargo, las investigaciones latinoamericanas más relevante apuntan hacia otros aspectos de los EVs,

Tabla 3 Autores latinoamericanos más citados en investigaciones sobre vehículos eléctricos (2001-2019)
 Fuente: Elaboración propia a partir de WOS, 2020

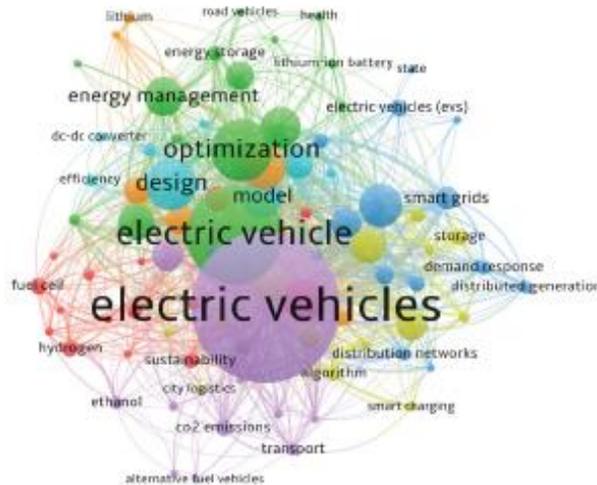
Autores	Año	País	Organización	Nº Citas
Moreno, J., Ortuzar, M. E., & Dixon	2006	Chile	Pontificia Universidad Católica de Chile	416
Mattos, L. V., & Noronha, F. B	2012	Brasil	Fluminense Fed Univ - Natl Inst Technol INT	403
Ortuzar, M., Moreno, J., & Dixon	2007	Chile	Pontificia Universidad Católica de Chile	279
Pomilio, J. A	2005	Brasil	Universidad Estatal de Campinas	235
Gomez, J. C.	2003	Argentina	Univ Nacl Rio Cuarto	185

3.4. Análisis de palabras claves

Entre las 2232 palabras claves utilizadas en los estudios analizados, solamente 87 tienen, al menos, cinco frecuencias de uso (Figura 8). Destacan entre las más

relevantes "Vehículos eléctricos" y "Vehículo eléctrico", "Optimización", "Sistema", "Batería", "Híbrido", "Diseño", "Energía" y "Administración". Llama la atención que "Baterías de ion de litio" no se encuentre entre las palabras con mayor frecuencia.

Figura 8 Mapa de coocurrencia de palabras claves en estudios sobre vehículos eléctricos de autores latinoamericanos (2001- 2019).



3.5. Análisis cuantitativo y cualitativo de revistas

En total son 181 las revistas que presentan publicaciones de autores latinoamericanos sobre el tema de vehículos eléctricos y que están indexadas en Journal Citation Reports (JCR). El top 10 presenta, en promedio, un factor de impacto de 5.706, lideradas por Renewable Sustainable Energy Reviews con 10.556 (Tabla 4). La revista con mayor número de publicaciones es Energies con 18, mientras que

IEEE Transactions On Industrial Electronics alcanza mayor cantidad de citas por documento (88). Cabe destacar que aquellas revistas de menor factor de impacto presentan menos citaciones por documento. Como se puede apreciar no hay ninguna revista latinoamericana indexada en WOS que tenga contribución destacada en la publicación de artículos relacionados con los EVs. Esta situación puede estar relacionada con la poca cantidad de revistas latinoamericanas que están indexada en JCR, además del bajo FI de estas (Crespo-Gascón, et al., 2019).

Tabla 4 Top 10 de revistas con artículos sobre vehículos eléctricos de autores latinoamericanos (2001-2019).
 Fuente: Elaboración propia a partir de WOS, 2020

Revista	País	Récord	%	CPP	FI	Q
Energies	Switzerland	18	4.6	5	2.707	Q3
IEEE Transactions on Industrial Electronics	EE. UU.	15	3.8	88	7.503	Q1
IEEE Latin America Transactions	EE. UU.	14	3.6	2	0.804	Q4
IEEE Transactions on Vehicular Technology	EE. UU.	12	3.1	20	5.339	Q1
Applied Energy	England	11	2.8	29	8.426	Q1
Energy	England	10	2.5	19	5.537	Q1
Renewable Sustainable Energy Reviews	England	10	2.5	33	10.556	Q1
Journal Of Power Sources	Netherlands	9	2.3	24	7.467	Q1
Electric Power Systems Research	Switzerland	8	2.0	12	3.022	Q2
Journal Of Cleaner Production	England	8	2.0	12	6.395	Q1

3.6. Análisis de financiamiento

En la tabla 5 se muestra el número de investigaciones que fueron financiadas por las principales agencias de financiamiento de cada país latinoamericano, para la temática de los EVs. Brasil cuenta con el mayor número de agencias y esto se ve reflejado en el número de publicaciones que logró este país. En segundo lugar, aparecen agencias de México y Chile, sin embargo, México logró mayor número de publicaciones en el tema. El caso de Colombia su agencia es la que menor porcentaje de proyectos financia, pero es el tercer país con mayor número de publicaciones.

El enfoque de la actividad científica puede estar definida por políticas internas de las organizaciones o por un marco país, donde se definen y potencian las áreas de conocimientos de interés nacional, las cuales se financian mediante instrumentos de fomento. En el caso de la temática de los EVs para Latinoamérica se aprecia que existe una correlación positiva de 0,95 entre financiamiento gubernamental y cantidad de publicaciones. En general se identificó que el 52% de las investigaciones son financiadas estas agencias. Otro grupo importante de investigaciones son financiadas o cofinanciadas por organizaciones internacionales.

Tabla 5 Principales agencias de financiamiento para investigaciones sobre EVs (2001-2019).
 Fuente: Elaboración propia a partir de WOS, 2020

Agencia estatal de financiamiento	País	Doc. por País	Doc. Financiado
NATIONAL COUNCIL CNPQ	Brasil		59
CAPES	Brasil	170	42
FUNDACAO DE AMPARO A PESQUISA (FAPESP)	Brasil		23
MINAS GERAIS STATE RESEARCH FOUNDATION FAPEMIG	Brasil		12
CONACYT	México	59	20
CONICYT	Chile	50	20
CONICET	Argentina	43	13
ANPCYT	Argentina		8
COLCIENCIAS	Colombia	56	7
SECRETARÍA DE TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Ecuador	19	1
NO INFORMA (AGENCIA)	Costa Rica	6	0
NO INFORMA (AGENCIA)	Cuba	2	0
NO INFORMA (AGENCIA)	Panamá	2	0
NO INFORMA (AGENCIA)	Uruguay	2	0
NO INFORMA (AGENCIA)	Trinidad y Tobago	2	0

4. Conclusiones

El panorama científico en la temática de vehículos eléctricos en Latinoamérica esta matizado por una baja productividad de sus organizaciones y autores. Para mejorar su productividad se debe mejorar la colaboración con otros países que concentran las instituciones líderes en la temática. A su vez es necesario fortalecer la colaboración entre instituciones y autores de la región.

El crecimiento de las investigaciones sobre los EVs tiene un crecimiento exponencial en la región. Sin embargo, no es suficiente para lograr un mayor protagonismo en consonancia con el estándar mundial, y que les permita una rápida evolución hacia implantación de esta tecnología.

El IA demuestra que aquellos países con mayor potencial científico como el caso de Brasil y México tienen poco enfoque hacia la temática. En el caso de Brasil tiene una participación destacada la Universidad de Sao Paulo en cuanto a cantidad de publicaciones y coautoría, pero bajo en comparación con las instituciones líderes en la temática a nivel mundial.

Los autores más destacados publican en las principales revistas especializadas en la temática como son Renewable Sustainable Energy Reviews, Applied Energy, y Energy, todas con buen factor de impacto, lo que evidencia que existe buena calidad en las investigaciones realizadas.

El análisis de palabras claves evidencia poco enfoque hacia las investigaciones relacionadas con desarrollo de las baterías de litio. Atendiendo al potencial productivo que tienen los autos eléctricos y las grandes reservas de litio existentes en la región. Es importante que las principales agencias de financiamiento científico como son, el Consejo Nacional De Desarrollo Científico Y Tecnológico (CNPQ), la Fundacao De Amparo A Pesquisa Do Estado De Sao Paulo (FAPESP) la Comisión Nacional De Investigación Científica Y Tecnológica (CONICYT) el Consejo Nacional De Ciencia Y Tecnología (CONACYT) el Consejo Nacional De Investigaciones Científicas Y Técnicas (CONICET), entre otras, implementen una política con enfoque hacia los temas relacionados con los vehículos eléctricos y al uso de tecnología asociadas al litio.

5. Referencias bibliográficas

- Alvarez-Meaza I., Zarrabeitia-Bilbao E., Rio-Belver R.M., & de Alegría I.M. (2019) Mapping Scientific and Technological Patterns: Hybrid Vehicles. In: Reis J., Pinelas S., Melão N. (eds) *Industrial Engineering and Operations Management I. IJCIEOM 2018*. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 280. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-14969-7_13
- Alvarez-Meaza, I., Zarrabeitia-Bilbao, E., Rio-Belver, R. M., & Garechana-Anacabe, G. (2020). Fuel-Cell Electric Vehicles: Plotting a Scientific and Technological Knowledge Map. *Sustainability*, 12(6), 2334. doi:10.3390/su12062334
- Archambault, É., Campbell, D., Gingras, Y., & Larivière, V. (2009). Comparing bibliometric statistics obtained from the Web of Science and Scopus. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 60(7), 1320–1326. doi:10.1002/asi.21062
- Agusdinata, D. B., Liu, W., Eakin, H., & Romero, H. (2018). Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda. *Environmental Research Letters*. doi:10.1088/1748-9326/aae9b1
- Bruce, P. G., Freumberger, S. A., Hardwick, L. J., & Tarascon, J.-M. (2012). Li–O₂ and Li–S batteries with high energy storage. *Nature Materials*, 11(1), 19–29. doi:10.1038/nmat3191
- Chen, C. (2006). CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(3), 359–377. doi:10.1002/asi.20317
- Chen, H., Chiang, R., & Storey V. (2012). Business Intelligence and Analytics: From Big Data to Big Impact. *MIS Quarterly*, 36(4), 1165. doi:10.2307/41703503
- Choi, J. W., & Aurbach, D. (2016). Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities. *Nature Reviews Materials*, 1(4). doi:10.1038/natrevmats.2016.13
- Crespo-Gascón, S., Tortosa, F. S., & Guerrero-Casado, J. (2019). Producción de revistas científicas en América Latina y El Caribe en Scopus, Journal Citation Reports y Latindex en el área de los recursos naturales: su relación con variables económicas, ambientales, y de inversión en investigación. *Revista Española de Documentación Científica*, 42 (1), 224.
- Delucchi, M. A., & Lipman, T. E. (2001). An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(6), 371–404. doi:10.1016/s1361-9209(00)00031-6
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J.-M. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, 334(6058), 928–935. doi:10.1126/science.1212741
- European Parliament (2018). More Electric Cars on EU Roads by 2030[Nieuws|Europees Parlement. Available online: <http://www.europarl.europa.eu/news/nl/press-room/20180911PR13114/more-electric-cars-on-euroads-by-2030> (accessed on 21 December 2020)
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235–1238. DOI: 10.1126/science.1152747
- García, A., Pardo, A., Ferrer, A., Peset, M. F., & González, L. (2015). Herramientas de análisis de datos bibliográficos y construcción de mapas de conocimiento: Bibexcel y Pajek. *BiD. Textos Universitaris de Biblioteconomia i Documentació*, (34), 1–8. dx.doi.org/10.1344/BiD2015.34.22
- Girishkumar, G., McCloskey, B., Luntz, A. C., Swanson, S., & Wilcke, W. (2010). Lithium–Air Battery: Promise and Challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(14), 2193–2203. doi:10.1021/jz1005384
- Goodenough, J. B., & Kim, Y. (2010). Challenges for Rechargeable Li Batteries†. *Chemistry of Materials*, 22(3), 587–603. doi:10.1021/cm901452z
- González, L. G., Siavichay, E., & Espinoza, J. L. (2019). Impact of EV fast charging stations on the power distribution network of a Latin American intermediate city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 309–318. doi:10.1016/j.rser.2019.03.017
- Gomez, J. C., & Morcos, M. M. (2003). Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3), 975–981. doi:10.1109/tpwrd.2003.813873
- Hu, Y., Sun, J., Li, W., & Pan, Y. (2013). A scientometric study of global electric vehicle research. *Scientometrics*, 98(2), 1269–1282. doi:10.1007/s11192-013-1067-8
- Liu, H., Hong, R., Xiang, C., Lv, C. y Li, H. (2019). Visualization and analysis of mapping knowledge domains for spontaneous combustion studies. *Fuel*, 116598. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116598

- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272–288. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.10.06
- Jung, N., & Ruiz-León, A. A. (2018). Lo local y lo global de la colaboración científica: ¿qué significa, y cómo visualizarlo y medirlo? *Revista Española de Documentación Científica*, 41 (2): e203. doi.org/10.3989/redc.2018.2.1463
- Ortuzar, M., Moreno, J., & Dixon, J. (2007). Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(4), 2147–2156. doi:10.1109/tie.2007.894713
- Owen, N. A., Inderwildi, O. R., & King, D. A. (2010). The status of conventional world oil reserves—Hype or cause for concern? *Energy Policy*, 38(8), 4743–4749. doi:10.1016/j.enpol.2010.02.026
- Mattos, L. V., Jacobs, G., Davis, B. H., & Noronha, F. B. (2012). Production of Hydrogen from Ethanol: Review of Reaction Mechanism and Catalyst Deactivation. *Chemical Reviews*, 112(7), 4094–4123. doi:10.1021/cr2000114
- Martin, S., Diaz, G., Sancristobal, E., Gil, R., Castro, M., & Peire, J. (2011). New technology trends in education: Seven years of forecasts and convergence. *Computers & Education*, 57(3), 1893–1906. doi:10.1016/j.compedu.2011.04.003
- Moed, H. F. (2009). New developments in the use of citation analysis in research evaluation. *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*, 57(1), 13–18. doi:10.1007/s00005-009-0001-5
- Moed, H. F., De Bruin, R. E., & Van Leeuwen, T. N. (1995). New bibliometric tools for the assessment of national research performance: Database description, overview of indicators and first applications. *Scientometrics*, 33(3), 381–422. doi:10.1007/bf02017338
- Moreno, J., Ortuzar, M. E., & Dixon, J. W. (2006). Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(2), 614–623. doi:10.1109/tie.2006.870880
- Rehermann, F., & Pablo-Romero, M. (2018). Economic growth and transport energy consumption in the Latin American and Caribbean countries. *Energy Policy*, 122, 518–527. doi:10.1016/j.enpol.2018.08.006
- Sauer, I. L., Escobar, J. F., da Silva, M. F. P., Meza, C. G., Centurion, C., & Goldemberg, J. (2015). Bolivia and Paraguay: A beacon for sustainable electric mobility? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 910–925. doi:10.1016/j.rser.2015.06.038
- Schubert, A., Glänzel, W., & Braun, T. (1989). Scientometric datafiles. A comprehensive set of indicators on 2649 journals and 96 countries in all major science fields and subfields: 1981–1985. *Scientometrics*, 16(1-6), 3–478. doi:10.1007/bf02093234
- Schmich, R., Wagner, R., Hörpel, G., Placke, T., & Winter, M. (2018). Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries. *Nature Energy*, 3(4), 267–278. doi:10.1038/s41560-018-0107-2
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419–2430. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.11.048
- Solero, L., Lidozzi, A., & Pomilio, J. A. (2005). Design of Multiple-Input Power Converter for Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(5), 1007–1016. doi:10.1109/tpel.2005.854020
- Van Eck N. J., & Waltman L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*; 84(2):523–38.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2007). Bibliometric mapping of the computational intelligence field. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 15(5), 625–645.
- Van Eck, N. J., Waltman, L., Van den Berg, J., & Kaymak, U. (2006). Visualizing the computational intelligence field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 6–10.
- Twigg, M. V. (2007). Progress and future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 70(1-4), 2–15. doi:10.1016/j.apcatb.2006.02.029
- Tukker, A., & Jansen, B. (2006). Environmental Impacts of Products: A Detailed Review of Studies. *Journal of Industrial Ecology*, 10(3), 159–182. doi:10.1162/jiec.2006.10.3.159
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., ... Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145–148. doi:10.1038/nature02121

U.S. Geological Survey, (2019), Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey, 200 p. doi.org/10.3133/70202434.

Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., ... Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389–395. doi:10.1038/416389a

Zhao, X., Wang, S., & Wang, X. (2018). Characteristics and trends of research on new energy vehicle reliability based on the web of science. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 1–25. doi.org/10.3390/su10103560

Artículo 2 (P2)

La tabla 7 muestra la información referente al impacto y datos de la revista del artículo 2.

Tabla 7: Indicadores del segundo artículo.

Título: Strategic management of patents on electrochemical conversion fuel cells and batteries in Latin America as a mechanism for moving towards energy sustainability	
Revista: Journal of Applied Electrochemistry	DOI: https://doi.org/10.1007/s10800-022-01804-9
Fecha de envío: 04-10-2022	Fecha de Publicación: 19-11-2022
Coautor 1: Willmer Guevara Ramírez	Grado: Candidato a Doctor
Coautor 2: Itziar Martínez De Alegría	Grado: Doctor
Coautor 3: Rosa María Río Belver	Grado: Doctor
Coautor 3: Izaskun Alvarez Meaza	Grado: Doctor
Base de datos de indexación: JCR (WOS)	
Categoría: ELECTROCHEMISTRY	Índice de impacto: 2.925
Posición que ocupa la revista: 22	Número de revistas en el área: 30
Quartil: Q3	Año: 2021
Base de datos de indexación: Scopus	
Categoría: Chemical Engineering (miscellaneous)	Índice de impacto: 0,54
Posición que ocupa la revista: 94	Número de revistas en el área: 326
Quartil: Q2	Año: 2021
Citar como: Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I., Río-Belver, R.M. et al (2022). Strategic management of patents on electrochemical conversion fuel cells and batteries in Latin America as a mechanism for moving towards energy sustainability. J Appl Electrochem. https://doi.org/10.1007/s10800-022-01804-9	

Fuente: Elaboración Propia, 2023.



Strategic management of patents on electrochemical conversion fuel cells and batteries in Latin America as a mechanism for moving towards energy sustainability

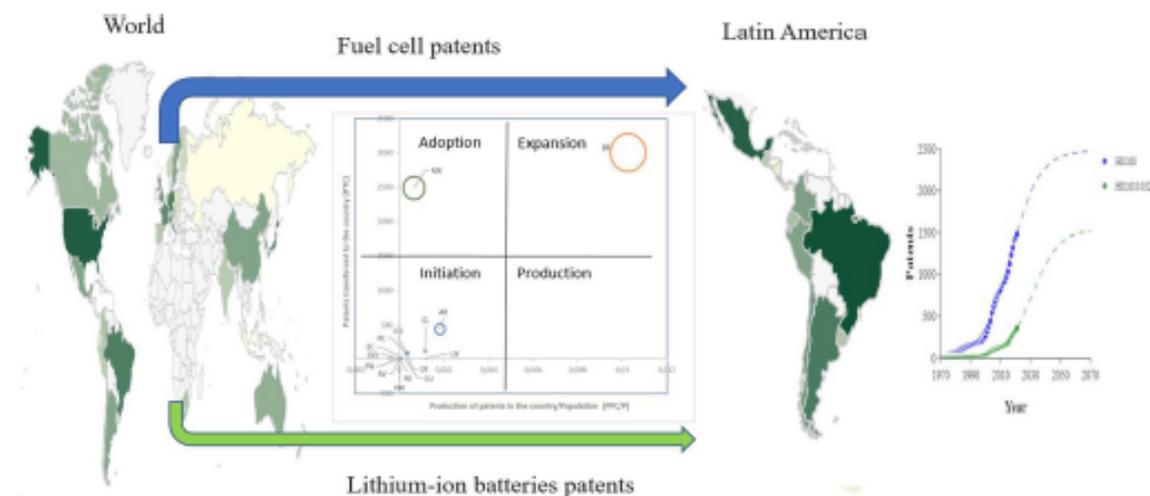
Willmer Guevara-Ramírez^{1,3} · Itziar Martínez-de-Alegría² · Rosa María Río-Belver¹ · Izaskun Alvarez-Meaza²

Received: 4 October 2022 / Accepted: 10 November 2022
© The Author(s) 2022

Abstract

Electrochemical conversion batteries (ECBs), especially fuel cells and lithium-ion batteries (LIBs), are the focus of attention of the scientific community due to their potential contribution to the decarbonization of the economy. In this context, the objective is to analyze patent publication flows on LIBs in Latin America (LATAM) by proposing a technology adoption matrix, a Patents friendly to sustainable technologies (PFST) indicator, and the use of technology s-curves. Data collection and analysis were carried out using the PatSeer knowledge base, Gephi, VantagePoint, and Loglet Lab software. The results show the leadership of Brazil, Mexico, and Argentina, with high dependence on the United States, Japan, and Germany. The PFST indicates that 79.3% of the published patents address climate change mitigation. In general, there is a low rate of publication of ECB patents in LATAM, marked by a technological lag in the evolution of key technologies. Patents on fuel cells are more published than those related to LIB. Under this scenario, it is unlikely that LATAM will achieve the necessary competitiveness to produce complex technologies in this field. In this regard, it follows that to reverse the position of traditional exporters of low value-added commodities, these countries should formulate strategies that allow the development of the innovation ecosystem, promoting open and applied innovation mechanisms, subsidized adoption, greater integration of universities and, at the same time, strengthening technological integration with countries that currently lead the transfer and others with great potential such as China and South Korea.

Graphical abstract



Extended author information available on the last page of the article

Published online: 19 November 2022

Springer

Keywords Fuel cells · Lithium-ion batteries · Technology adoption matrix · Analysis of patent information · Sustainable · s-Curve

1 Introduction

In response to environmental and energy challenges, there is a group of technologies that seek to become widespread to reduce Greenhouse Gas (GHG) emissions. Among these are the different battery systems (cells, batteries) that are called to play a fundamental role in the energy transition processes undertaken by different countries [1]. Batteries are already essential for the operation of many of the goods or systems aimed at providing society with greater comforts. Their importance is growing as fuel cell electric vehicle (FCEV), electric vehicle (EV), and stationary electricity storage system technologies become more widespread [2].

On the one hand, several countries have bet on the development of green hydrogen (H_2) as the energy carrier of the future [3]. To this end, these nations have to develop the chain of production and use of H_2 , which can be structured in four phases: (i) the selection of the type of renewable energy to produce H_2 [4]; (ii) the electrolytic separation where H_2 is obtained [5, 6]; (iii) the storage and distribution of H_2 [7]; and (iv) the form of H_2 use (consumption) [1]. Each of these phases has become a major challenge for the scientific community. In the case of the form of use, one of the solutions developed for H_2 consumption is the “hydrogen fuel cell,” which have high conversion efficiency and do not emit pollutants into the atmosphere [8]. These cells are powered by H_2 , converting its chemical energy into electrical energy, which is used to power the electrical elements used in different types of electric propulsion means of transportation, heating systems, and other industrial systems.

There are different types of fuel cells. Among the most collaboratively addressed by researchers are H_2 fuel cells, direct methanol, microbial, solid oxide, molten carbonate, proton electrolyte membrane, and phosphoric acid fuel cells [9]. The function of these cells is to provide electrical energy to a system (motor or other), for which they depend on the supply of chemical energy provided by an energy carrier (such as, for example, methanol, ammonia, H_2 , or fuel sources). These fuel cells, especially H_2 fuel cells, have enabled the development of FCEV. Thanks to the incorporation of these fuel cells, these vehicles have become one of the main candidates for providing society with clean, economical, and efficient means of transportation [10, 11]. The fuel cell system converts hydrogen into the electrical energy needed to power the electric motor of the FCEV propulsion system [12].

On the other hand, the other technology anticipated to achieve the decarbonization of the economy are the EVs, which depend on power from an external electric power source, and therefore a high dependence on charging stations. Nonetheless, these vehicles currently command a greater presence in the markets. Their success is based mostly on the incorporation of lithium-ion batteries (LIB) that have allowed them to improve their autonomy and charging times [13]. However, autonomy, charging times, and safety remain important challenges to be improved by researchers and stakeholders in general [13].

Fuel cells and LIB play an essential role in the development of EVs and FCEVs as evidenced by their high dynamism from the point of view of patent generation and indexed scientific articles [14, 15]. In particular, different data on patents associated with these types of technologies are a valuable input for assessing the links between environmental policies and technological change [16, 17].

In this field of knowledge, as in other scientific topics, there are leading nations and others lagging in terms of the production of scientific papers and/or patents. However, given the commitment made by nations in the context of the Paris agreement and the Sustainable Development Goals (SDGs), (specifically goal 7), the technologies that arise in response to climate change (as is the case) must advance significantly in all countries. Therefore, technologies that emerge in response to climate change (as is the case) need to advance significantly. Accordingly, it is fundamental to generate studies that describe the existing gaps in the adoption of these technologies, especially in less developed countries [18, 19], as is the case of Latin America (LATAM).

According to a report by the United Nations Development Program (UNDP), (2021), there is a lag in annual per capita economic growth in the LATAM region compared to the rest of the world. This places LATAM below countries in East Asia and slightly above those in Africa [20]. Despite this, some of these nations have made significant progress in their aspirations to become developed countries: implementing strategies that have allowed them to join important global development groups, such as the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), a forum that brings together developed and other countries with the greatest potential for development. These governments work to promote solutions to member countries' problems; identify best practices and coordinate domestic and international policies [21]. LATAM

countries are also part of the main global agreements to minimize the effects of climate change, such as the SDGs and the Paris Agreement [18].

Energy transition to clean energy in LATAM is gaining momentum. This is evidenced by the publication of ambitious strategies in the field of green H₂ production [3]. There is no doubt about the region's enormous potential for renewable energy production [22]. But do LATAM countries have the inventive skills to enable them to address the major challenges posed by this transition?

1.1 Patents analysis background

Patents are considered as active forms of disclosure of protected knowledge to other parties in exchange for a monopoly for a limited period of time [23]. Patents provide a rich source of practical technical information and in recent years there has been a significant increase in the number of studies using patent data to capture technological information from different industrial areas [24]. Detailed patent classification systems make it possible to identify advances in technological fields. Moreover, since inventors can apply for patents in several countries, the diffusion of technologies between countries can also be tracked [17].

In particular, a patent registration contains relevant technological information which can be used to monitor competitors, evaluate technologies, manage the R&D portfolio, and track and assess potential sources for external generation of technological knowledge [25]. Patent counts are therefore an important metric for assessing technologies and the innovative and technological capacity of companies and countries [17, 26]. In recent times, they have become an indicator of progress towards a green economy [27] and low-carbon technologies [28].

There are studies that have addressed important environmental issues using patent analysis. For example, Lanjou and Mody [29] used patent data from the United States (US), Japan, Germany, and 14 low- and middle-income countries to assess environmental innovation. They concluded that environmentally friendly innovation increases as spending to reduce pollution increases. The authors showed that in developed countries most of these patents are domestic. In contrast, developing countries adopt patents from foreign countries, which highlights the importance of diffusion for less developed countries [29].

1.2 Patent classification systems

A key aspect of patent analysis research is data collection and processing. The definition of search parameters is a determining factor in research results. Particularly in the case of patents, it is common to use keywords for searches on specific topics. However, for certain topics the construction

of the search syntax can be complex. It is possible to find some patent studies in the energy field based on the use of keywords. The study by Pu et al. [30] used the keywords "lithium-ion battery" and "battery and lithium-ion" to study the evolution of the industry–university–research cooperation network in the field of energy storage technology in China. The paper from Leu et al. [31] focuses on the keywords "biofuels and biohydrogen" to analyze the technological trends in that energy field.

Another alternative as regards patent analysis research is based on the use of the codes or classification systems that index the different topics. These codes are described by main world organizations in charge of regulating patents and used to group the statistical information of the different patent families [32, 33].

In 1979, the Strasbourg Agreement Concerning the International Patent Classification (IPC) was established [34]. The IPC defines the classification of patents and utility models according to the different technological areas to which they belong [35]. Patents are divided into eight sections, from "A" to "H," which in turn are subdivided into classes, subclasses, groups, and subgroups, making it possible to classify and search all patent-related information [35]. Particularly within section H (electricity), we find subclass H01M which covers primary or secondary galvanic cells or batteries, fuel cells or cells (see detailed description in Sect. 2).

For its part, Cooperative Patent Classification (CPC) is an extension of the IPC and is jointly administered by the European Patent Office (EPO) and the U.S. Patent and Trademark Office (USPTO). In addition to the existing sections (in the IPC), a new "Y" section has been added. This new section covers general labeling of new technological developments, general labeling of cross-cutting technologies covering several sections of the IPC. Y02, in particular, refers to climate change mitigation or adaptation technologies or applications [36]. This classification is used in a cross-cutting manner to label documents that are already classified or indexed in another code [33]. For example, a patent labeled within a technology area "H01M" that presents attributes that mitigate climate change can also be labeled with Y02. Mueller et al. [36] provide a broad description of technology classes related to battery types for energy storage, the authors indicate that batteries are grouped in the "H" and "Y" sections of the CPC classification. In their study, they underline that patent related to regenerative fuel cells doubled during the period 2009 to 2011. At the same time, they highlight that LIB continue to produce the best performance [36].

In the field of electrochemical conversion batteries (ECB), the use of IPC and CPC codes to obtain research data is more frequent. For example, Tsang et al. [37] studied emerging fuel cell technologies using data from the USPTO for the period 1976 to 2011 for codes H01M 008/00–H01M

008/24, focusing on patent survival, i.e., renewal over time. Alvarez-Meaza et al. [14] used the CPC code Y02T90/34 to study fuel cell powered electric vehicles. In order to identify and compare the patent landscape of solid-state batteries (SSB) with that of LIB, Block and Song [38] used the CPC codes H01M0010052 OR H01M00100525 OR Y02E0060122 OR Y02T00107011 employing the Derwent Innovations Index (DII) database. On the other hand, Shen et al. [39] used H01M 2/-, H01M 4/-, H01M 10/- to analyze the factors influencing the performance of EV technology in China. In this study, the authors underline the importance that the Chinese government's support from has had on the country's outstanding performance in that field [39].

Another practice used is data retrieval by combining keywords and IPC/CPC classifications. Such is the case of Stephan et al. [40] who analyzed the development and diffusion of LIB knowledge in Japan by obtaining patent information related to main components, peripheral components, cell system, and battery integration. In the study by Albino et al. [28], a recovery of codes is observed through the use of the IPC green inventory. This makes it possible to identify patents that contribute to the development of low-carbon energy sources [28].

For its part, the International Energy Agency & the European Patent Office [2] carried out wide-ranging research on electrical energy storage technologies. Although the study had a worldwide scope, the results focus on certain Asian and European countries, and USA. This research reveals important contributions from the point of view of the methodology used for patent retrieval, incorporating the participation of experts to determine the

relevant technologies in the field of ECBs [2]. As stated by Ma et al. [41], determining the words is a rigorous task, which may include working with experts and/or a thorough review of the literature covering the subject matter.

1.3 Main highlights of patent studies in the battery field

Table 1 shows a summary of the main reflections regarding the most studied and highlighted countries, methodological tools, and results. These were obtained by reviewing the main literature related to published patents in the field of battery technologies.

Despite abundant research focused on analyzing patents on ECB (i.e., fuel cells, LIB, among others), we have not identified relevant studies on the subject that focus on developing countries, especially LATAM. In this context, the objective of this research is to analyze the status of patent publications on ECB technologies, especially fuel cells and LIB, in the LATAM region. For this purpose, the use of a model based on the application of a Technology adoption matrix (TAM) and a Sustainable Co-occurrence indicator is proposed to analyze the implications of BCEs in the Y02 technological field (i.e., technologies to mitigate climate change), as well as launching an analysis of technological evolution and forecasting.

For the development of this article, the following structure is followed: Sect. 2 presents the methodology proposed to achieve the objectives; Sect. 3 gives the results; Sect. 4 is dedicated to the discussion and, finally, Sect. 5 provides the conclusions.

Table 1 Highlights of main publications related to patents of battery technologies

Highlights	Sources
China, Japan, Germany, the United States, South Korea, and other European countries are the focus of patent studies in the field of batteries. China and Japan lead the way in patent production in this field	[2, 42, 43]
The main forms of patent data retrieval in the field of batteries are the use of IPC and CPC classification codes	[37, 38, 44]
The CPC Y02 technology fields and the IPC green inventory allow climate change mitigation and/or carbon emission reduction technologies to be monitored	[14, 36]
Interdisciplinary patents play a key role in the future trajectory of electric vehicle development. Therefore, new patents in the various related fields need to be further developed	[41, 42]
Network analysis with centrality indicators stands out among the methodologies used for patent analysis	[41, 45, 46]
Governments play an essential role in the development and maintenance of patents in the battery field, especially those aimed at reducing carbon emissions	[28, 39, 47]
In general, patents related to LIB technologies are the most prominent worldwide. Asian manufacturers dominate the patent space	[36, 38, 44]
Universities play a secondary role in the production of battery patents	[30]
Fuel cells as well as LIB are increasing significantly within the context of global energy transformation	[11, 12, 42, 48]
Sustainable recycling of LIBs is essential to achieve a sustainable energy transition	[42, 45]

Source Own authors

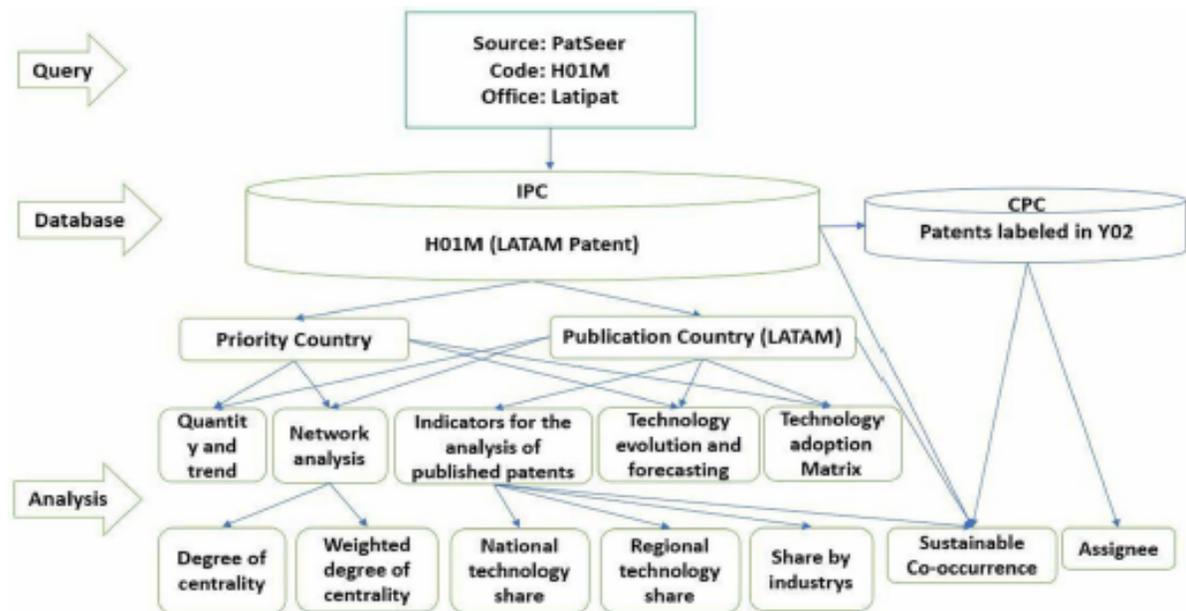


Fig. 1 Structure of research methodology. Source Own authors

2 Methodology

The methodology proposed to analyze the status of patent publications on ECB technologies, especially fuel cells and LIB, in the LATAM region, is summarized in the scheme provided in Fig. 1. First, key aspects of data retrieval are indicated (see Sect. 2.1 for a complete description). This results in a database obtained according to the CPI classification and its corresponding equivalence in the CPC. In the latter, only the information specific to code Y02 is retrieved. As a first step in the level of analysis, a quantitative analysis of priority countries and countries of publication is indicated (see Sect. 2.2 for a complete description). This is followed by a network analysis based on the centrality indicator to visualize the transfer flows between priority countries and recipient countries in LATAM (see Sect. 2.3 for a full description). Subsequently, the proposal of indicators to analyze patents published in LATAM is shown (see Sect. 2.4 for a complete description). Within this section, the degree of co-occurrence of BCEs with the Y02 classification (i.e., the one that identifies climate change mitigation technologies according to the CPC) is evaluated (see Sect. 2.4.2). Finally, the state of adoption of ECBs by LATAM countries is analyzed, proposing a TAM (i.e., a matrix relating the production of priority patents and the number of patents extended from other countries) (see Sect. 2.5 for a complete description).

2.1 Data recovery

As explained, a key aspect of patent analysis research is data collection and processing. In our case, we mainly used the data indexed under code H01M, which “covers primary or secondary galvanic cells or batteries, fuel cells or batteries” [32]. This code belongs to the International Patent Classification (IPC), described by the World Intellectual Property Organization (WIPO). The H01M code includes fuel cells (H01M 008/00 to H01M 008/24) and LIB (H01M 10/052). Although the present study focuses on the aforementioned batteries/cells, the analysis has adopted a broader perspective by analyzing the general context in which they are developed within the ECB subclass. On the one hand, this perspective allows us to better understand their relative importance or representativeness and, on the other hand, to determine whether or not there is a favorable innovation ecosystem for the transition to new technologies (LIB and fuel cells) based on the existing knowledge of related technologies. This analysis from a broader perspective also offers an input for future studies on battery patents. Accordingly, and to facilitate an understanding of the ECB subclass grouping, Fig. 2 shows the classification structure defined by WIPO for the H01M code [32], which is composed of eight groups, explained below:

- Electrodes (H01M 4/00) “when classifying the electrodes of hybrid cells, the individual half-cells of the hybrid cell

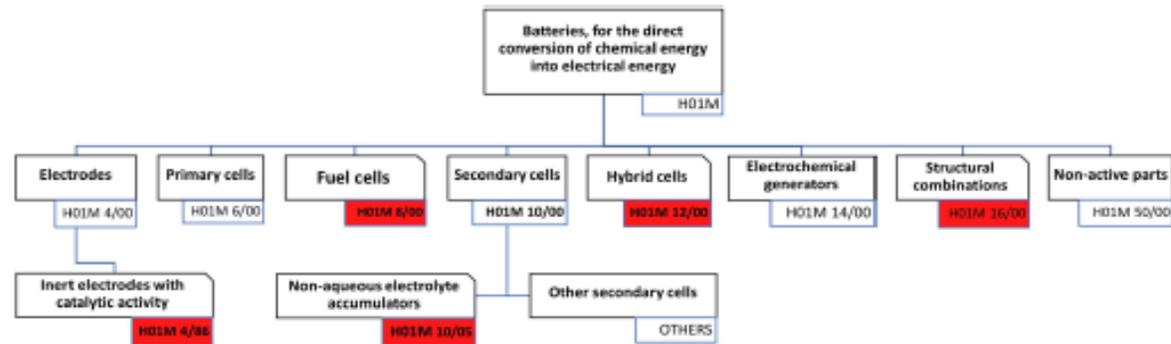


Fig. 2 Classification structure for electrochemical conversion batteries (ECB). Source Own authors

- are considered separately.” Specifically, the code H01M 4/86 “inert electrodes with catalytic activity” is associated with fuel cells [32].
- Primary cells (H01M 6/00) “are electrochemical generators in which the energy of the cell is present in chemical form and is not regenerated” [32]. This type of battery has traditionally been used in calculators, watches, medical equipment, toys, etc. [49].
 - Fuel cells (H01M 8/00) are “electrochemical generators in which the reagents are supplied from the outside” [32]. These would allow the massive exploitation of hydrogen through fuel cell EVs, contributing to sustainable mobility [50].
 - Secondary cells (H01M 10/00) are one of the most diverse codes, defined as “accumulators receiving and supplying electrical energy by reversible electrochemical reactions” [32]. This group includes the most dynamic and promising battery systems, including batteries with non-aqueous electrolyte and, within this subgroup, LIB (H01M 10/052). The latter have been key in the current development of EVs [13].
 - Hybrid cells (H01M 12/00) are “electrochemical generators having two different types of half-cells, the half-cell being a combination of electrode and electrolyte of a primary, secondary or fuel cell” [32]. These batteries

are particularly promising because they combine features of different technologies to achieve better results [51].

- Electrochemical generators (H01M 14/00), this group includes generators other than those provided for in groups H01M 6/00–H01M 12/00 [32].
- Structural combinations (H01M 16/00), as the name suggests, cover structural combinations such as “fuel cells with rechargeable batteries” [32]. This code may also be of interest for the analysis of fuel-battery-related technologies.
- And finally “construction details or manufacturing processes of non-active parts of electrochemical cells” (H01M 50/00), excluding those related to fuel cells [32]. This code is equivalent to H01M 2/00.

The data obtained were filtered for the Latipat office, which allowed access to all the results from LATAM, obtaining 6742 patents over the time period 1973 to 24-06-2021. The PatSeer Pro web application was used, with an option called Quick stats, which make it possible to obtain useful information for the analysis, similar to other studies that used this tool [52, 53]. Subsequently, the patents transferred to the LATAM region were characterized by using VantagePoint text mining tools, considering the definitions and scope of Table 2.

Table 2 Definitions and scope of methodological parameters

Parameter	Definition and scope	Results
H01M	Processes Or Means, E.G., Batteries, For The Direct Conversion Of Chemical Energy Into Electrical Energy	6742
Timespan	No time restriction, downloaded: 24-06-2021	1973–2021
Priority Country	It is the country where the patent was first registered	57
Publication Country	Country where the patent was extended, in this case the LATAM countries	13
Edge	Number of patents extended from Priority Country to Publication Country	141

Source Own authors, based on (PatSeer and WIPO 2021)

The geographical assignment of authorship of a patent is fundamental, as it may influence the interpretation of the research results. There are several ways to assign authorship of a patent to a country. One option is the first inventor's country of residence. Another way is to assign it to each participating inventors' country [27]. These two options can be confusing. Should it be assigned using the first option, the weight of the other participants is underestimated. Conversely, when assigned to all inventors, there are records that create duplicity of information. In this case, one solution proposed has been to assign a fraction to each inventor's country [2, 42], which can be cumbersome from an information processing perspective. Another option, the one chosen for this study, is to assign it by the priority country field. We consider that country-specific conditions attract patent priority. These conditions could be given by the attractiveness and needs of industry, as well as by aspects such as nationality or residence. Another approach could be to use the geographic location of the owner or assignee of the patent. Since the inventor or inventors are generally under an obligation to assign their patent rights to the company or institution where they are employed, the location of the inventor or inventor's employer is generally equivalent.

2.2 Quantitative description

First, a quantitative analysis was carried out to characterize priority countries and countries of publication. In the case of publication countries, an analysis of the evolution of the trend in the number of patent publications over time was performed.

2.3 Network analysis

To relate the priority countries and publication countries, a network was created using Gephi software, which allows a user-friendly representation of the nodes and destinations, as well as the relationship between them [54, 55]. In this case, the relationship between the countries is reflected in the number of industrial property registrations (patents) received by the country of publication from the priority countries. The degree of centrality (DC) was used for network analysis. This indicator describes the number of nodes connected to a specific network node [30]. The Gephi software allows us to obtain the DC and weighted degree of centrality (WDC). The latter incorporates the number of links between one node and another [56].

2.4 Indicators for the analysis of published patents

Three indicators were used to characterize the patents transferred to the LATAM region. The National/Regional technological share indicator and the "Patents friendly to

sustainable technologies" indicator. In addition, the analysis of patents included a count of the number of patents by industrial sector.

2.4.1 Indicators for technological share

Based on the National technology share (NTS) indicator described in Baumann et al. (2021), we derived two types of technology share analysis. The first at the national level, in this case, the relative frequency of participation by country in each of the 20 main technology subgroups was represented. The second was adapted to calculate (Eq. 1) the Regional technology share (RTS) indicator for the different technological groups according to the classification shown in Fig. 2. This measures the relevance of technology groups for the region.

$$RTS = \frac{P_G}{\sum P_G} * 100 \quad (1)$$

RTS: Regional technological share, P_G : Number of patents belonging to a specific group, for example, H01M2, H01M4... , $\sum P_G$: Sum of the patent number classified in each group of subclass H01M.

2.4.2 "Patents friendly to sustainable technologies" Indicator

In order to determine the degree of association or relationship of ECB with climate change mitigation technologies, the Patents friendly to sustainable technologies (PFST) indicator is proposed. It is important to note that a patent may present attributes that allow it to be indexed in different codes. In particular, the Cooperative Patent Classification (CPC) created code Y02, which groups climate change mitigation or adaptation technologies or applications. Through a broad classification scheme, it indexes patents that seek to control, reduce, or avoid greenhouse gas (GHG) emissions [14, 57]. In this regard, the following indicator is proposed to evaluate sustainable co-occurrence. This ratio establishes the percentage of patents that have been published in each country that can be considered sustainable, by presenting co-indexation with code Y02:

$$PFST_{jk} = \frac{PPC(Y02)_k}{NTP_{jk}} * 100 \quad (2)$$

PFST_{jk}: Patents friendly to sustainable technologies of country j for patent type k . PPC(Y02)_k: Number of patents published in country j belonging to IPC k that are co-indexed with the CPC Y02 classification. NTP_{jk}: Total number of patents published in country j belonging to IPC k . J Corresponds to the analyzed country, e.g., Brazil, Mexico, etc. K : Corresponds to the analyzed IPC, in this case "H01M."

The indicator can take values between 0 and 100%, reaching the maximum value when all its patents present attributes that respond to mitigation and/or adaptation to climate change.

Based on the analysis of sustainability technologies, the most relevant assignees in terms of the acquisition of sustainable technologies were identified. Within this analysis, the role of universities was also identified. These analyses were performed using a co-occurrence map of the Y02 vs Assignee family of codes (see Fig. 9).

2.5 Technological evolution and forecast

One of the most widely used tools for analyzing the speed of adoption, maturity, prognosis, and technological evolution, in general, is the *s*-curve. This graphical method allows a technology to be assessed based on the number of scientific publications and/or patent publications [58]. The evolution of the publication record over time makes it possible to place the assessed technology in one of the four stages: emergence, growth, maturity, and saturation. At the same time, it makes it possible to forecast when the next stage will be reached when the saturation stage has not yet been reached. Detailed descriptions of the *s*-curve method can be found in Baumann et al. [42], Chanchetti et al. [59].

In this research, the *s*-curve method was performed by employing patent data, specifically for LIB and fuel cell technologies, accumulating patent publication records over time during the period 1973–2020 for codes H01M10/052 and H01M8. The year 2021 was not used because it was not complete at the time of data download.

The *s*-curve model was built using the Loglet Lab 4 software that allows specialized analysis in this method [60]. It presents a simple and informative user interface that through four simple steps produces the set of graphs for analyzing the model. Additionally, Loglet Lab 4 presents an advanced fitting engine for analyzing complex data [61].

Before using the software, the type of curve to be used has to be defined, evaluating between Gompertz and logistic curves. In our case, following the methodology proposed by Franses [62], it was determined that logistic curves are the most appropriate.

2.6 Tool for strategic analysis of technology adoption

In this study, we also analyze technological adoption of ECB by considering two dimensions. On the one hand, the capacity to generate technologies, reflected in the number of patents. On the other hand, the capacity to identify and assimilate technologies, reflected in the number of patents extended from other countries. Correspondingly, a matrix was proposed to evaluate the degree of technological

adoption of LATAM countries in a specific sector (conversion of chemical products into electrical energy) (Fig. 3).

Other studies have used similar matrix models, for example, to evaluate patent portfolios in companies, using as variables (axes) the relative growth rate of patents and relative participation of technology, in order to facilitate decision making in terms of R&D spending by organizations [63]. A recent study focused on analyzing trends in the patenting of three energy technologies with a focus on Germany and the leading countries in the field. In their case, the variables on the *x* axis were the patenting activity in a given technological field per GDP and on the *y* axis the growth rate of patents in recent years [42]. The present study proposes using a TAM for LATAM countries, which is similar to the one proposed by the authors cited above. In this case, the four quadrants are formed from the combination of the country's patent production divided by its number of inhabitants, represented on the *x* axis, and the patents that are transferred to the country (extension from other countries) on the *y* axis. A bubble representing the total value of patents registered in that field by each country is also included. On the *x* axis, the division by the number of inhabitants was applied to reduce the distortion inherent to the size of the countries.

The proposed matrix provides information on the state of adoption of these technologies, given that the country may have the capacity to generate patents and/or extension from other countries. The four possible scenarios are described below:

ATE: The country produces and adopts patents from other countries, in practice it means that the nation

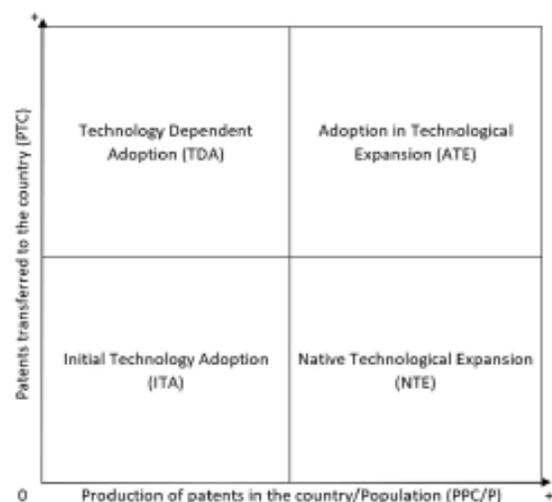


Fig. 3 Technology adoption matrix (TAM) for countries. Source adapted from [42, 63]

is combining the two strategies to adopt technologies, therefore, it is in technological expansion for that sector.

- TDA:** The country adopts patents from other countries, in practice it means that there is a technological adoption with high dependence on other countries. In other words, the national innovation ecosystem is underdeveloped.
- NTE:** The country produces and does not adopt patents from other countries, in practice it means that there is an autochthonous technological adoption, which produces a slow growth of the sector in the case of a LATAM country.
- ITA:** The country produces and/or adopts patents from other countries in small quantities, in practice it means that there is no technological development for this sector, or that it is at an initial stage that has not yet taken off.

For a country to be placed in the upper quadrants, its value for the evaluated variable has to be higher than the average of the set analyzed.

3 Results and discussion

3.1 Quantitative description

3.1.1 Priority countries from which patents are transferred to LATAM

The priority countries that have transferred the largest number of ECB patents to LATAM countries are led by the USA with 2975 patents, Japan with 736 patents and Germany with 606 patents. Together they have transferred 64.6% of the total number of patents (Fig. 4). The study by Baumann et al. [42] shows that Germany presents a lower patenting activity worldwide in relation to other countries such as Japan, China, or the USA in the case of LIB. On the other hand, for all ECBs transferred to LATAM, Germany ousts China (Fig. 5) [42]. The latter has only transferred 89 patents to the region. On the other hand, it is important to highlight Brazil with 564 in its role as the country of first registration.

3.1.2 Latin American countries of publication

Figure 5 shows the evolution of the number of patents registered in the countries of publication in LATAM. Brazil has concentrated the largest number of publications with

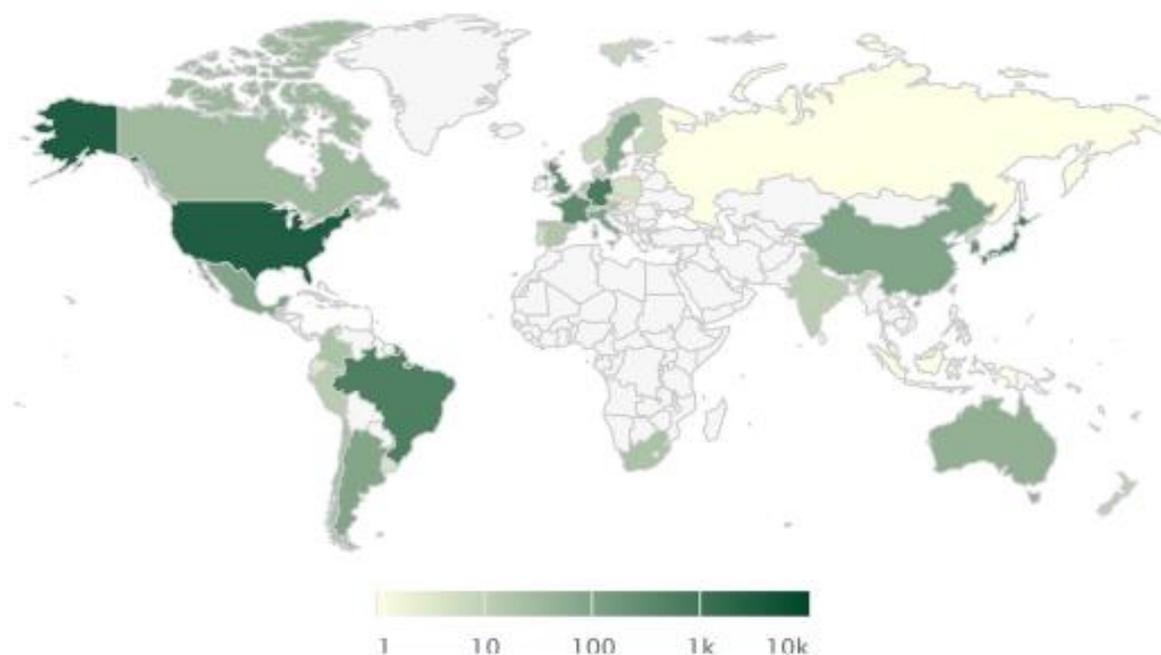


Fig. 4 Priority countries from which patents registered under the H01M code have been transferred to LATAM. Source Own authors using Pat-Scor

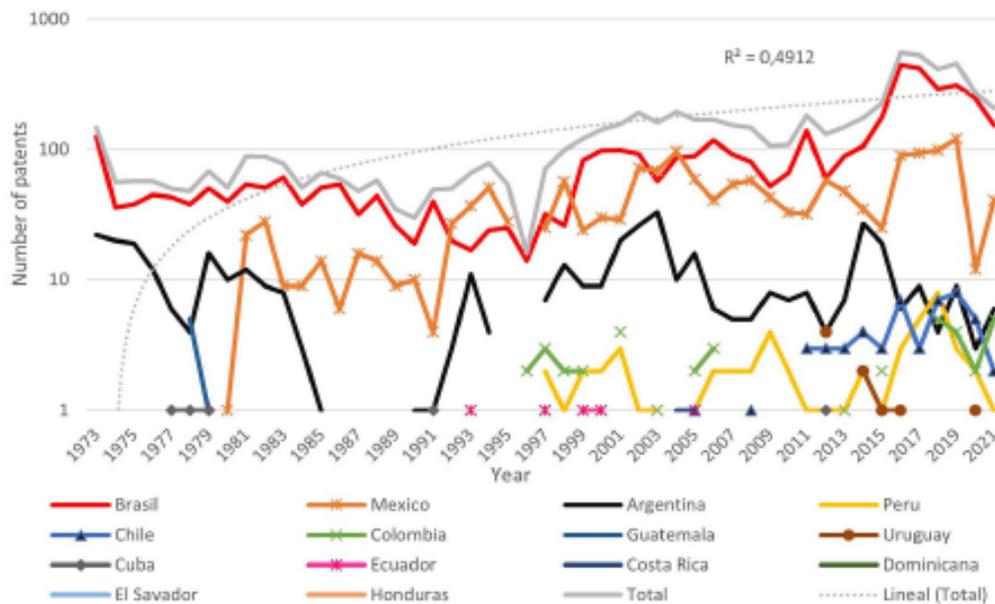


Fig. 5 LATAM countries in which patents registered with the H01M code have been published in the period 1973–2021. Source Own authors

58.7%, followed by Mexico (29.1%) and Argentina (7.5%). The other ten LATAM countries that complete this list represent only 4.7%. In terms of evolution over time, there is no statistically significant growth trend; however, the number of patents published in Brazil has increased significantly over the last 10 years. Brazil is the only country that presents results for all the years of the series. In the case of Mexico, it presents results since 1980, with the exception of 1996. Argentina presents a continuous series since 1979, with results that had not been systematized. As shown, generally the results before 2011 are discrete, this seems to be typical behavior worldwide as demonstrated by the study of [37], which only collected 2269 patents for the case of fuel cells for the period 1976 and 2011, using the US Patent and Trademark Office. This shows that these patents were underdeveloped until that period. On the other hand, the study developed by Díaz et al. [64] on patent analysis in general for the LATAM region determined that 21 countries in the period 1996–2007 presented patent registrations. Although the registrations were generally discrete, the same leadership structure shown in our study was observed (Brazil, Mexico, and Argentina). In the world more than 65,000 patents on electricity storage were filed [2] only within the period 2000 and 2018. Considering the existing methodological differences with respect to the information cited from this study, we can have an approximation of LATAM's weak performance in this field.

3.2 Transfer flows to and between Latin America (code H01M)

The main patent transfer flows to and between LATAM countries are shown in Fig. 6. Brazil is at the epicenter of the adoption of these technologies in the region, with a wide network of 47 countries (including incoming and outgoing), making it possible to compute a WDC of 5758 patent publications (including those registered by the country itself). In second place is Mexico, which has the same DC (47), however, its WDC is much lower with 2660. In both countries, the main flows come from the United States, Japan, and Germany. In the case of Argentina, it has a DC of 30 with 757 WDC patents, although the registrations are also led by the USA, in this case followed by the UK and Germany. Following in the ranking (DC-WDC) are Chile (23–173), Colombia (16–124), and Peru (15–86). It is noteworthy that in all LATAM countries, the USA leads in the registration of these patents, except in Cuba, which is the only country in the region that does not register any patents from this destination. This is a clear example of how political differences can affect technology transfer relations. An important aspect that we can observe is that there is little transfer between LATAM countries, only tenuous links are shown from Argentina and Chile to Brazil, from Argentina to Brazil and Mexico, and from Brazil to Argentina, all within a range of between 3 and 5 patents transferred.

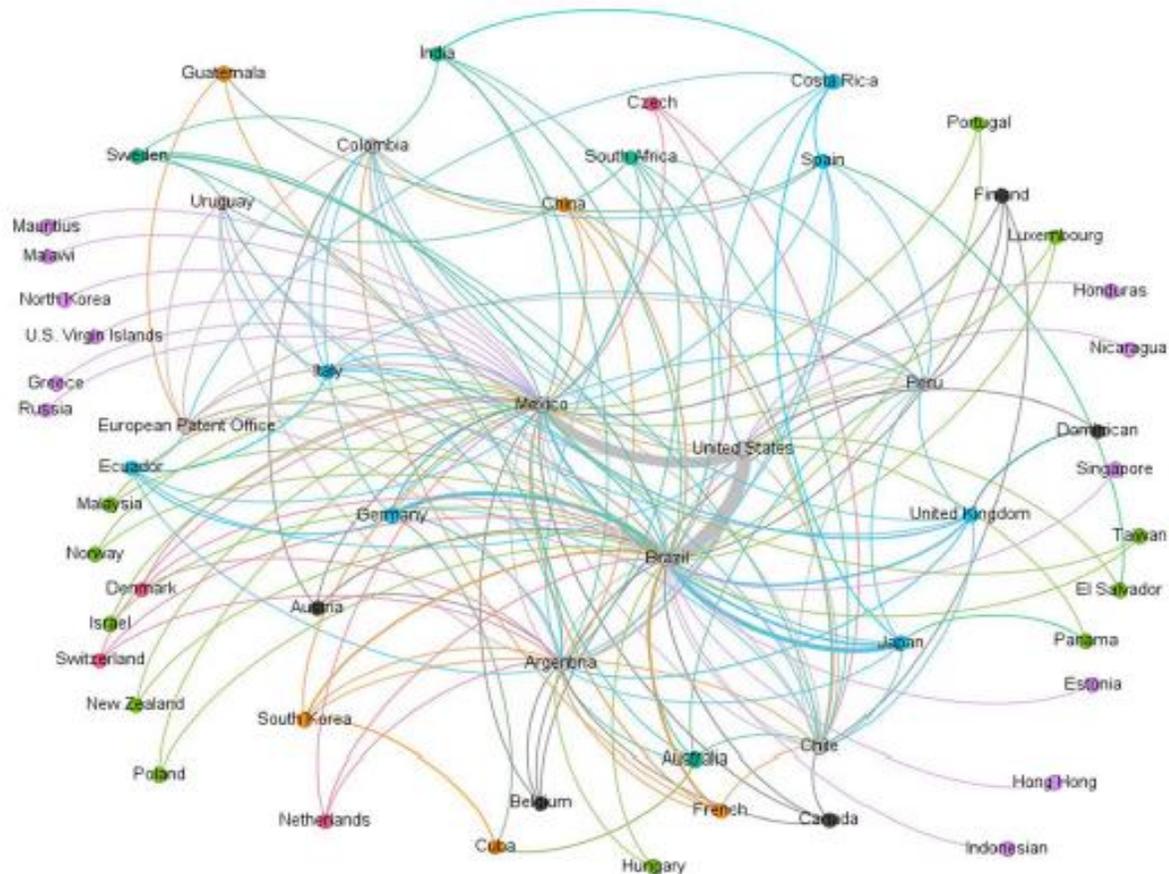


Fig. 6 Patent transfer map to LATAM (Code H01M). Source Own authors using Gephi

3.3 Analysis of patents published in LATAM

3.3.1 Analysis of technology share indicators

As stated by Baumann et al. [42], IPC searches may contain a large number of subcategories [42]. The analysis of these codes allowed us to understand which are the most relevant topics for the region in terms of ECBs. Accordingly, Fig. 7 shows the main 20 published technology subgroups in a structured way, the most relevant being H01M8/04: "auxiliary arrangements, e.g., for pressure control or for fluid circulation." These elements are used to control heat exchange fluids and are associated with fuel cells. Other codes of the fuel cell family are also displayed among the most published. On the other hand, the specific indexing for LIB (H01M 10/052) presents a

discrete record. This result differs from other research that has concluded that LIBs widely lead the world in patent applications compared to other ECB patents [36, 38, 44].

The calculation of the RTS for the groups that form subclass BCE shows the following: group H01M4: "Electrodes" is the most relevant in terms of participation, followed by H01M2, which, as explained above, is equivalent to H01M50: "Details of construction or manufacturing processes of inactive parts of electrochemical cells other than fuel cells." Then code H01M10: "Secondary cells." Fourth, the code pertaining to "fuel cell" (H01M8) (Table 3). Although some fuel cell system subgroups lead the patent registrations of subclass H01M, at the group level, the H01M8 group is relegated to fourth position.

Most notably among the main industries where these patents have been transferred are the "battery and

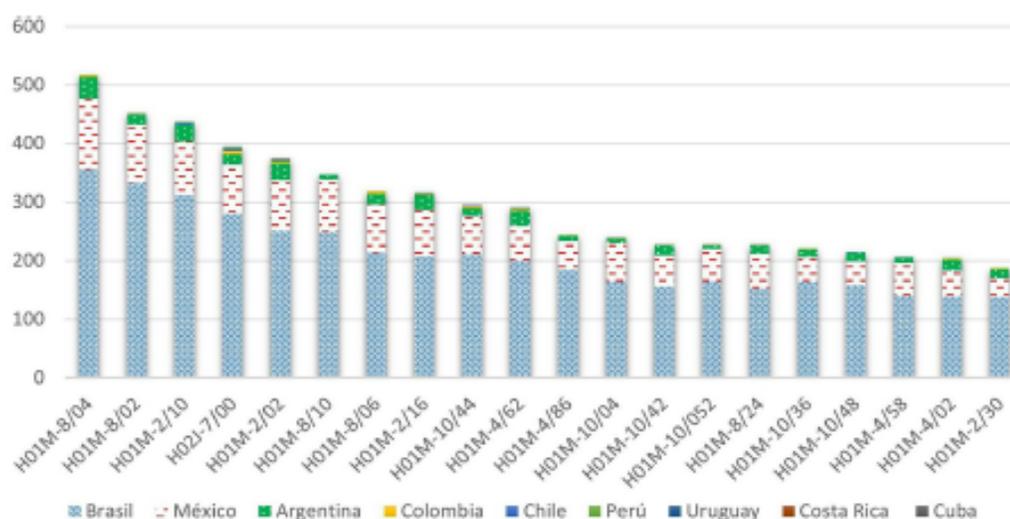


Fig. 7 Share by country in each of the top 20 technology subgroups. Source Own authors

accumulator” and “motor vehicle” industries, accounting for more than 76.4% (Fig. 8). The former can be considered a supplier to the automotive industry, although not exclusively, but it does show the general relevance of the automotive sector for the development of this field. According to some authors, in the case of this industry, the regulatory context has encouraged the innovative activities of automakers and their suppliers [16]. Correspondingly, it can be established that the LATAM countries that lead the adoption of patents on the subject are those where foreign automakers have established factories, as is the case of Brazil [65], Mexico [66], and Argentina [67]. This means that the adoption of patents on specific topics is related to the industrial development of the sector, thus reaffirming that patents can be a useful metric to evaluate the sectoral performance of industries.

Table 3 RTS indicator results in LATAM

Group	RTS (%)
H01M2	21.96
H01M4	27.41
H01M6	6.19
H01M8	20.01
H01M10	21.78
H01M12	1.65
H01M14	0.62
H01M16	0.40

Source Own authors

3.3.2 Analysis of Patents friendly to sustainable technologies

Table 4 illustrates the results obtained for the PFST indicator (see Eq. 2). In general, the results show a high co-indexation of ECB technologies with code Y02. This can be interpreted as 79.3% of the ECB patents published in Latin America countries present attributes that respond to climate change mitigation or adaptation. It should be stated that in the case of Dominican Republic, Honduras, and Ecuador, which present values of 100% for the co-occurrence indicator, this is due to few records of publications. In turn, there are other countries, such as Peru and Uruguay, where the technologies published have little to do with sustainability approaches. Brazil undoubtedly stands out, as it is the leader in the number of patent publications, with greater than (or >) 80% of them having sustainable attributes.

The co-occurrence map of the Y02 vs assignee code family shows the most prominent assignee companies in the acquisition of these ECB patents with sustainable attributes (Fig. 9). Most noticeable among them are foreign companies, led by GENERAL ELECTRIC CO (US), TOYOTA MOTOR CO LTD (JP) and NISSAN MOTOR CO LTD (JP). The role of certain national and international universities can also be seen, led by Brazil, where 99 universities are the assignees of 166 patents; Mexico, 36 universities with 62 patents; Argentina and Chile, 7 universities with 8 patents. Universities in the other countries have little or no participation. In general, Y02E 60/10 (energy storage using batteries) and Y02E 60/50 (fuel cells) are the highest grade.



Fig. 8 Main industrial sectors related to patent publications on ECB in LATAM. Source Own authors

3.4 Analysis of technological evolution and forecast

Patenting in the field of LIBs in LATAM has been in a growth-consolidation phase (II) since 1998 (Fig. 10). This differs from the results of Baumann et al. [42], which found that in the case of the countries leading in LIB patenting, they are in a phase of strong maturity [market penetration (III)], even estimating that they may be entering a saturation phase (IV). The difference between the two studies can be largely explained by the fact that only a small part of LIB patents are transferred to LATAM, and that there is a significant lag between the publication date in the priority country

and the publication date in Latin American countries. On average, this lag is 5.1 years with a standard deviation of 3.2 years.

On the other hand, fuel cell technology is in a maturity phase and could enter its saturation phase within the current decade in LATAM. Mock and Schmid [68], using information on world fuel cell patents up to 2003, estimated that fuel cells should reach their saturation phase by approximately 2015. Subsequently, Haslam et al. [69], using patent information up to 2011 from China, Japan, and South Korea, noted that since 2009 there has been a drop in the number of publications. However, the authors consider various causes such as delays in updating the database, the financial crisis of 2008, or simply arrival at the saturation stage. In general, the results shown in the s-curve for fuel cells in LATAM (Fig. 10) reinforce the idea that they are very close to the saturation stage. Considering that in the case of these patents there has been a greater number of transfers to LATAM, with a lower lag of 4.3 years and a standard deviation of 2.8 years.

Table 4 PFST indicator results in LATAM countries

Publication Country (N= 6742)	PFST (Y02; H01M) (%)
Brazil	83.9
Mexico	68.9
Argentina	77.8
Peru	33.9
Chile	64.0
Colombia	68.4
Guatemala	88.9
Uruguay	44.4
Cuba	60.0
Ecuador	100.0
Costa Rica	75.0
Dominican Republic	100.0
Honduras	100.0
Total	79.3

Source own authors

3.5 Strategic analysis of technology adoption: the Technology adoption matrix (TAM)

Figure 11 shows the strategic analysis of the technological performance of each country in the LATAM context where, in addition to the position in the quadrants, the total number of patents adopted is also represented by the diameter of the bubble. This reaffirms the technological development achieved by Brazil, which is in the Expansion quadrant. In second position is Mexico, but in the Adoption quadrant, which means that its performance has depended on transfer from other countries. Argentina

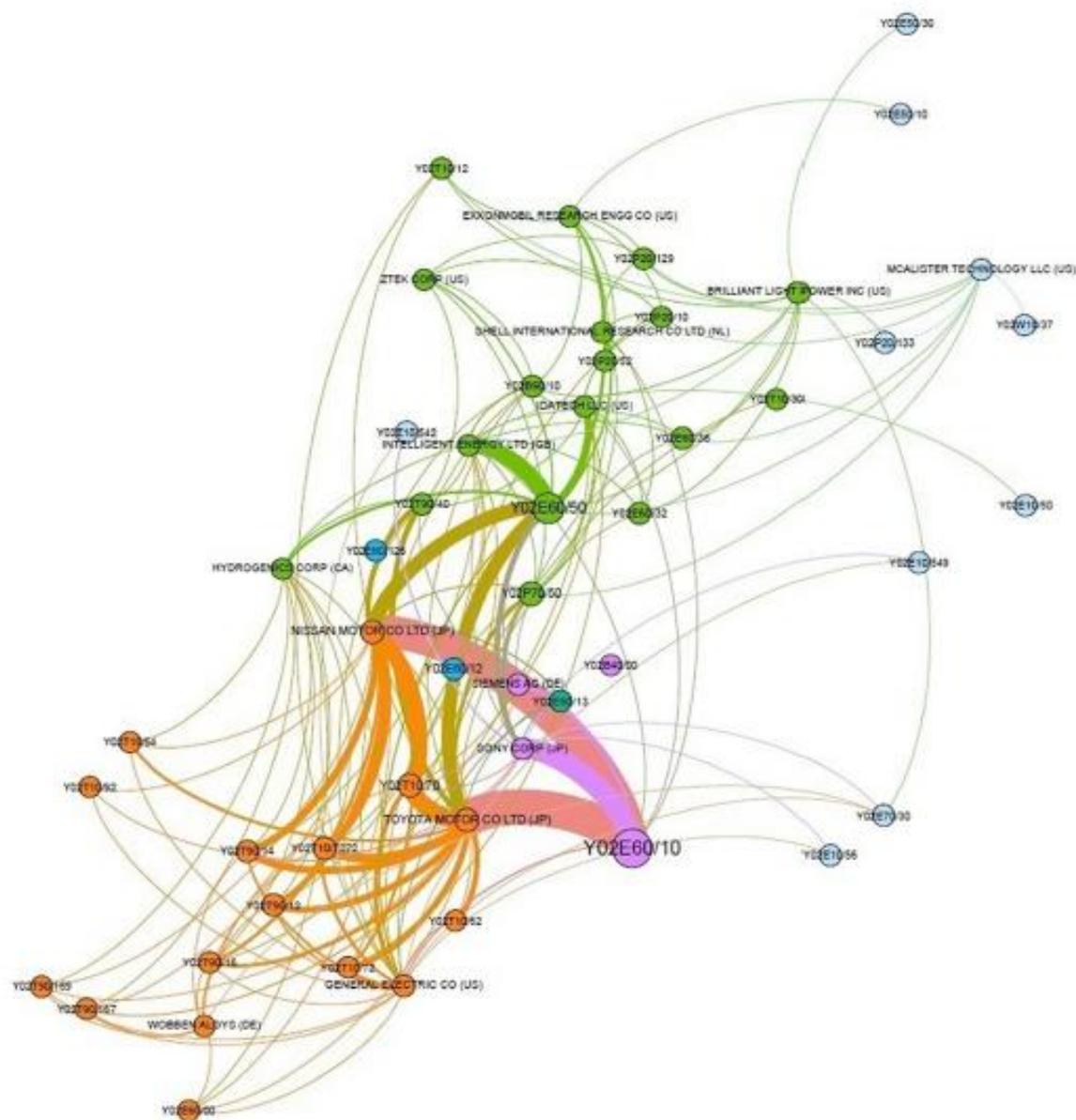


Fig. 9 Co-occurrence flows (main) of Assignee vs sustainable codes (Y02). Source Own authors using Gephi

leads the Initiation quadrant with a total patent registration much higher than the values of the other countries in this quadrant. Although most of the countries are in the Initiation quadrant, within this group there are some that have a higher level of progress, such as Chile, Colombia, and Peru. Also considering the results in Fig. 5, the records over time of countries such as Cuba, Honduras, Guatemala, Ecuador, Costa Rica, Dominican Republic,

and El Salvador do not allow us to affirm that they are currently immersed in the development of these technologies. This is because their records are neither systematic nor recent. Finally, no country has a significantly higher level of production of priority patents than those transferred from other countries, so as to be considered in the Production quadrant.

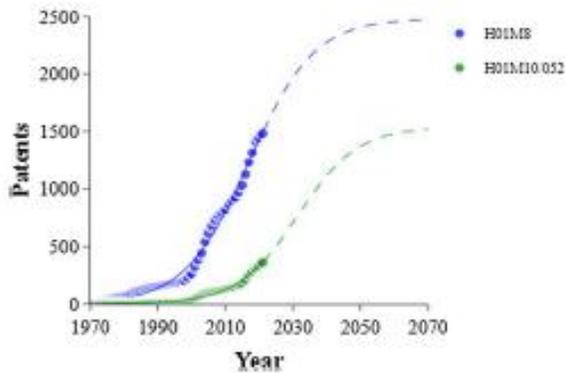
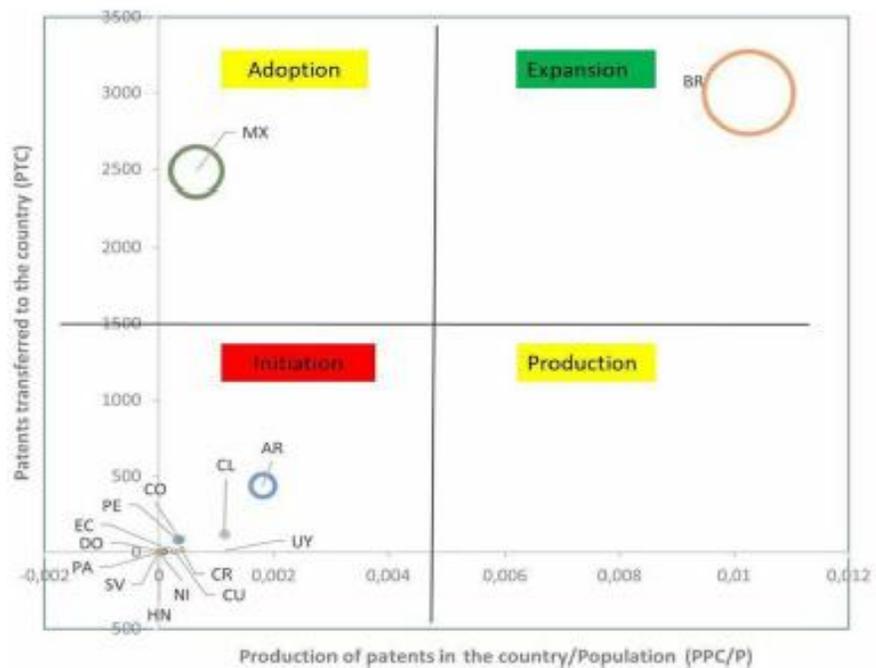


Fig. 10 LIB and Fuel cells s-curves in LATAM. Source Own authors using Loglet Lab

other governments such as Bolivia, Costa Rica, El Salvador, Panama, Paraguay, Trinidad and Tobago, and Uruguay are working on their own strategies [71]. Furthermore, South America has the world's largest lithium reserves, located specifically in Chile, Argentina, and Bolivia, in an area known as the lithium triangle [72].

Despite the Region's enormous potential in these areas, the findings of this study regarding the low rate of adoption of patents on ECBs in LATAM countries and the technological lag in the evolution of key technologies, ring alarm bells regarding these countries' real possibilities of developing a full strategy to exploit hydrogen through the use of fuel cells or to make maximum use of lithium reserves by manufacturing components for LIB systems in the Region. The present low or null patenting rate indicates the fledgling state of these industrial sectors in the Region. This leads us to believe that, if the current levels of patenting in these

Fig. 11 Technology adoption matrix for LATAM countries. Source Own authors



4 Discussion

Currently, some LATAM countries are clearly focused on developing hydrogen as the energy carrier of the future. As is the case with Chile, which outlined a strategy that seeks to take its production worldwide [70], being supported by other countries such as Colombia, which also published a roadmap, and Brazil, which presented the basis for consolidating the Brazilian hydrogen strategy. At the same time,

areas are maintained, LATAM will maintain its current role as an exporter of commodities or low value-added goods [73]. In general, countries develop R&D policies according to their technological leadership position and the complexity of technologies [74]. For this reason, it is unlikely that LATAM countries will achieve leadership in the production of highly complex technology such as ECB systems. Instead, the development of a policy focused on the adoption of new inventions would allow them to play a more active role in

the supply chain within the framework of the expansion of green technologies.

In this regard, the key is to strengthen open innovation ecosystems, allowing them to adopt major inventions in order to reach their maximum potential in terms of exploiting these resources with a sustainable approach [75]. For this purpose, it is essential to continue strengthening alliances with countries such as the USA, Japan, China, and Germany, which have high productivity in patent registration on the subject [42]. In this case, South Korea should also be considered, despite not currently being among the countries leading the transfer of patents to the region, however, its national hydrogen strategy includes plans to position itself as a leader in the production of technologies related to the hydrogen chain [76].

On the other hand, the low patenting rate in some countries may be related to what was raised in a recent Chilean based study that identified a very fragmented inventor system, consequently the authors emphasize the need for strong government intervention to direct research funding and greater collaboration among inventors, especially local ones [77]. Additionally, we consider that funding should be conditioned to projects containing clear goals in terms of patent registration since, as Popp [17] posits, innovation responds quickly to incentives. Another cause may be associated with the low presence of the automotive industry in the Region, given that these countries have traditionally been exporters of commodities and importers of technologies [78].

Given the strong sustainable focus of patents on ECBs, these technologies are expected to be strongly supported by governments in the pursuit of achieving environmental goals and achieving greater national competitiveness of their companies [74]. There is evidence that innovation incentive policies can have a positive effect on technological development and consequently a higher production of inventions [17]. In addition, national environmental regulations could force the sector's clusters to develop mechanisms to provide the innovation ecosystem with the means to achieve concrete goals in terms of solutions that allow the massive incorporation of new inventions that respond to local problems. As shown in Fig. 8, the automotive industry and its suppliers play a leading role in adopting these patents, according to Borgstedt et al. [79], therefore, regulations could have greater effects if applied within these sectors. In this sense, it is important to indicate that the automotive industry has not established itself in many countries of the Region, consequently regulations or actions should focus on those companies that exploit natural resources (copper, lithium, nickel) and those companies that will be in charge of the future development of hydrogen, i.e., formal requirements should be established to develop innovation ecosystems and therefore develop a value chain around primary resource. As evidenced in the study by Yeh et al. [80], who used patent data to demonstrate that

in the cases of Japan, Germany, and the USA, control technologies for innovations in nitrogen oxides (NO_x) were not implemented until strict government regulations were established, and that this forced innovation [80]. This is also the case for the Zero Emission Vehicle Mandate, introduced by the California Air Resources Board in 1990, where automakers focused on developing more efficient engine technologies [16]. In turn this innovative pressure is transmitted from automakers to their suppliers [79].

Some regulatory instruments have in fact been formulated among the countries analyzed, such as the energy efficiency label in Chile, the energy efficiency and CO₂ emissions standard in Mexico, and the Inovar-Auto program in Brazil [65, 81, 82]. In this regard, we consider that LATAM countries currently require more demanding standards to enable progress with the commitments assumed in the main international agreements for climate change mitigation [18, 83].

5 Conclusions and future research directions

Using IPC data and taking the registration of patents associated with ECBs as a reference, it can be concluded that in the LATAM region, Brazil and Mexico are clearly leading in the inventor and publication country categories. Argentina, on the other hand, shows some progress in adopting these technologies, being mostly dependent on the extension from other countries. Therefore, in their case, it is necessary to promote innovation challenges to stimulate the production of local solutions that respond to the problems of this industrial sector and balancing dependence on foreign inventions. In any case, the relevant LATAM policies should promote a balance between national and international patents. However, when initially developing the sector, greater dependence on international inventions would be acceptable to accelerate and create new capacities both in production and in the innovation ecosystem.

In terms of transfer flows, it can be concluded that there is a high dependence on patents from the USA, Japan, and Germany. Therefore, there is an opportunity to increase the number of patents transferred by diversifying the transfer of knowledge from those countries that command worldwide leadership in the registration of patents, such as China, South Korea, and other European bloc countries. To achieve this, LATAM governments and companies should consider the high dependence of these countries (China and South Korea) on the region's raw materials, which are essential components for the manufacture of ECBs. Therefore, if they succeed in negotiating changes in value chain structures by implementing greater integration with LATAM countries, this could have positive medium-term effects for developing

new patents registered in their national offices and the development of the industrial sector.

Patent publications classified under the specific codes for fuel cell (H01M 8/00) have performed better than those indexed for LIB (H01M 10/052), however, in both cases they are mainly concentrated in three countries: Brazil, Mexico, and Argentina. Therefore, it can be concluded that considerable asymmetry exists within the region in terms of adopting these technologies. In general, patent publications have depended mainly on foreign countries.

Technological evolution in LATAM for LIBs has been affected by the low production and transfer of patents, as well as the existing lag in the transfer from priority countries to LATAM countries. On the other hand, in the case of fuel cells, there is greater synchronization with respect to the evolution shown by other studies, which can be explained by the fact that there has been a greater number of transfers to LATAM with a smaller lag.

The analysis of the IPCs carried out is a first step towards future studies on these topics, since it provides a general overview of the codes that have been most widely adopted in LATAM. The most important industrial sectors have also been defined, making it possible to establish that the major technological adoptions are related to the automotive industry and battery suppliers.

Given that most LATAM countries are at an early stage of technological adoption, it is necessary to formulate strategies in three directions: the first, the development of applied research with challenges related to these technologies; the second, the subsidized adoption of technologies in this sector [84, 85] in order to advance the promotion of the best inventions and consequently the development of these industrial activities; and the third, to design and implement restrictive or incentive legislations focused on the automotive industry and its battery suppliers, also considering mining companies and future H₂ suppliers, due to their importance in the automotive manufacturing value chain, as well as their great financial capacity.

In parallel and in correspondence with the first strategy mentioned above, it would be beneficial to bring universities closer to the productive sector. In practice, many LATAM countries have clear policies regarding the promotion of research, and these policies are part of the requirements for university accreditation, which is reflected in the number of scientific papers published, however, no specific goals focused on the generation of patents are set. Therefore, we believe that promoting regulations in both the productive sector and universities may foster an important symbiosis in generating patents that respond to environmental problems and the development of this industrial sector in the national spheres. In this sense, it is essential to strengthen the legal aspects of university technology transfer, such as the obligation in some cases of academics to cede their inventions to the university

for which they work, the ownership of the patent when an academic works in collaboration with an external company on a university project, and the use of patents for educational purposes, among others [86].

By means of the sustainable concurrence indicator or Patents friendly to sustainable technologies, it was determined that 79.3% of the patents on BCE published in LATAM have attributes that contribute to mitigating or adapting to climate change. Therefore, the efforts and actions carried out in this field would contribute to strengthening the commitments assumed by the countries of the region within the framework of the Paris Agreement and the SDGs [18, 19]

The proposed Technology adoption matrix makes it possible to establish comparisons and evaluate the degree of technological incorporation for a set of countries. Although it does not seem useful when comparing countries with high asymmetry in terms of their level of development, it is a useful tool for evaluating developing countries. This is because the high values of patent registration presented by countries such as the USA, Japan, China, among others, would always place LATAM countries in a relatively lower position.

The present study has focused exclusively on patent publications associated with ECB, including fuel cells that would lead to large-scale use of H₂. However, given that the H₂ production chain involves a wide spectrum of technologies, future lines of research include studies analyzing the state of adoption of patents for other phases, such as energy production, electrolytic separation of H₂ (production), storage and distribution, and even other forms of H₂ use. It would also be interesting to address other phases related to EVs, such as charging systems.

Acknowledgements This project has received Open Access funding provided by University of Basque Country.

Author contributions All authors contributed to the conception and design of the study. Material preparation, data collection and analysis, and manuscript writing were performed by WG-R, IM- ϕ -A, RMR-B, and IA-M. All authors read and approved the final manuscript.

Funding Open Access funding provided thanks to the CRUE-CSIC agreement with Springer Nature.

Data availability The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author.

Declarations

Competing Interests The authors confirm that there are no conflicts of interest with this publication.

Ethics approval and consent to participate Not applicable.

Consent for publication Not applicable.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source,

provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Lee Y, Lee MC, Kim YJ (2022) Barriers and strategies of hydrogen fuel cell power generation based on expert survey in South Korea. *Int J Hydrogen Energy* 47:5709–5719. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.212>
- International Energy Agency (IEA), European Patent Office (EPO) (2020) Innovation in batteries and electricity storage. In: IEA. <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>. accessed 7 May 2022
- International Energy Agency (IEA) (2021) Global Hydrogen Review 2021. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. accessed 7 Oct 2021
- Yu M, Wang K, Vredenburg H (2021) Insights into low-carbon hydrogen production methods: green, blue and aqua hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 46:21261–21273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>
- Amorim I, Xu J, Zhang N et al (2021) Dual-phase CoP–CoTe₂ nanowires as an efficient bifunctional electrocatalyst for bipolar membrane-assisted acid-alkaline water splitting. *Chem Eng J* 420:130454. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130454>
- Li Z, Sun H, Pang Y et al (2021) Investigation on fabrication of reduced graphene oxide-sulfur composite cathodes for Li–S battery via hydrothermal and thermal reduction methods. *Mater (Basel, Switzerland)* 14:861. <https://doi.org/10.3390/ma14040861>
- Stöckl F, Schill WP (2021) Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen. *Sci Rep* 11:1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92511-6>
- Liu Z, Liu L, Zhou Y (2022) Modelling and simulation analysis of closed proton exchange membrane fuel cell system. *Energy Rep* 8:162–168. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.033>
- Shi X, Cai L, Jia J (2018) The evolution of international scientific collaboration in fuel cells during 1998–2017: a social network perspective. *Sustain* 10:4790. <https://doi.org/10.3390/SU10124790>
- Zhou L, Zhang F, Wang L, Zhang Q (2022) Flexible hydrogen production source for fuel cell vehicle to reduce emission pollution and costs under the multi-objective optimization framework. *J Clean Prod* 337:130284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130284>
- Tanç B, Arat HT, Conker Ç et al (2020) Energy distribution analyses of an additional traction battery on hydrogen fuel cell hybrid electric vehicle. *Int J Hydrogen Energy* 45:26344–26356. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.241>
- İnci M, Büyüç M, Demir MH, İlbey G (2021) A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. *Renew Sustain Energy Rev* 137:110648. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648>
- Hu J, Fan F, Zhang Q et al (2022) Effects of long-term fast charging on a layered cathode for lithium-ion batteries. *J Energy Chem* 67:604–612. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.10.030>
- Alvarez-Meaza I, Zarrabeitia-Bilbao E, Rio-Belver RM, Garchana-Anacabe G (2020) Fuel-cell electric vehicles: plotting a scientific and technological knowledge map. *Sustainability* 12:1–25. <https://doi.org/10.3390/su12062334>
- Li M, Lu J, Chen Z, Amine K (2018) 30 Years of lithium-ion batteries. *Adv Mater* 30:1–24. <https://doi.org/10.1002/adma.201800561>
- Oltra V, Saint M (2009) Variety of technological trajectories in low emission vehicles (LEVs): a patent data analysis. *J Clean Prod* 17:201–213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.023>
- Popp D (2005) Lessons from patents: using patents to measure technological change in environmental models. *Ecol Econ* 54:209–226. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.01.001>
- UNFCCC (2015) ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Paris Agreement text English. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/09r01.pdf>. accessed 31 May 2021
- General Assembly United Nations (2015) Report of the Secretary-General on the Work of the Organization. In: United Nations. <https://undocs.org/es/A/70/1>
- United Nations Development Programme (UNDP) (2021) Regional Human Development Report 2021. Trapped: High inequality and low growth in Latin America and the Caribbean. In: United Nations Dev. Program. https://www.latinamerica.undp.org/content/rblaclew/home/library/human_development/regional-human-development-report-2021.html
- OECD (2021) About the OECD. <https://www.oecd.org/about/>. accessed 6 Oct 2021
- ESMAP (2020) Global photovoltaic power potential by country. <https://solargis.com>. accessed 19 Feb 2021
- Gallini NT (2002) The economics of patents: lessons from recent U.S. patent reform. *J Econ Perspect* 16:131–154. <https://doi.org/10.1257/0895330027292>
- Choi D, Song B (2018) Exploring technological trends in logistics: topic modeling-based patent analysis. *Sustainability* 10:2810. <https://doi.org/10.3390/SU10082810>
- Nam S, Kim K (2017) Monitoring newly adopted technologies using keyword based analysis of cited patents. *IEEE Access* 5:23086–23091. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2764478>
- Yang W, Yu X, Wang D et al (2019) Spatio-temporal evolution of technology flows in China: patent licensing networks 2000–2017. *J Technol Transf* 46:1674–1703. <https://doi.org/10.1007/S10961-019-09739-8>
- Lindman Å, Söderholm P (2016) Wind energy and green economy in Europe: measuring policy-induced innovation using patent data. *Appl Energy* 179:1351–1359. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.128>
- Albino V, Ardito L, Dangelico RM, Messeni Petruzzelli A (2014) Understanding the development trends of low-carbon energy technologies: a patent analysis. *Appl Energy* 135:836–854. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.012>
- Lanjouw JO, Mody A (1996) Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology 1. *Res Policy* 25:549–571. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(95\)00853-5](https://doi.org/10.1016/0048-7333(95)00853-5)
- Pu G, Zhu X, Dai J, Chen X (2022) Understand technological innovation investment performance: evolution of industry-university-research cooperation for technological innovation of lithium-ion storage battery in China. *J Energy Storage* 46:103607. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103607>
- Leu HJ, Wu CC, Lin CY (2012) Technology exploration and forecasting of biofuels and biohydrogen energy from patent analysis. *Int J Hydrogen Energy* 37:15719–15725. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.143>
- WIPO (2021) IPC Publication. <https://ipcpub.wipo.int>. accessed 30 Jan 2022

33. CPC (2022) CPC Scheme - Y GENERAL TAGGING OF NEW TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS; GENERAL TAGGING OF CROSS-SECTIONAL TECHNOLOGIES SPANNING OVER SEVERAL SECTIONS OF THE IPC; TECHNICAL SUBJECTS COVERED BY FORMER USPC CROSS-REFERENCE ART COLLECTIONS [XRACs] AND DIGESTS. <https://www.uspto.gov/web/patents/classification/cpc/html/cpc-Y.html>. accessed 19 Jun 2022
34. The Contracting Parties (1979) Strasbourg Agreement Concerning the International Patent Classification. <https://wipolex.wipo.int/en/text/291784>
35. WIPO (2022) International Patent Classification (IPC) What is the IPC? <https://tind.wipo.int/record/43106>
36. Mueller SC, Sandner PG, Welpe IM (2015) Monitoring innovation in electrochemical energy storage technologies: a patent-based approach. *Appl Energy* 137:537–544. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.082>
37. Tsang SS, Chang FC, Wang WC (2015) A survival analysis on fuel cell technology patent maintenance and values exploration between 1976 and 2001. *Adv Mater Sci Eng.* <https://doi.org/10.1155/2015/387491>
38. Block A, Song CH (2022) Exploring the characteristics of technological knowledge interaction dynamics in the field of solid-state batteries: a patent-based approach. *J Clean Prod* 353:131689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131689>
39. Shen ML, Lee CF, Liu HH et al (2021) Effective multinational trade forecasting using LSTM recurrent neural network. *Expert Syst Appl* 182:115199. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115199>
40. Stephan A, Anadon LD, Hoffmann VH (2021) How has external knowledge contributed to lithium-ion batteries for the energy transition? *iScience* 24:101995. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101995>
41. Ma SC, Xu JH, Fan Y (2022) Characteristics and key trends of global electric vehicle technology development: a multi-method patent analysis. *J Clean Prod* 338:130502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130502>
42. Baumann M, Domnik T, Haase M et al (2021) Comparative patent analysis for the identification of global research trends for the case of battery storage, hydrogen and bioenergy. *Technol Forecast Soc Change* 165:1–5. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120505>
43. Yuan X, Wu J (2020) Research on the Development of pure electric vehicle power battery Technology based on patent analysis. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* <https://doi.org/10.1088/1755-1315/615/1/012081>
44. Wagner R, Preschitschek N, Passerini S et al (2013) Current research trends and prospects among the various materials and designs used in lithium-based batteries. *J Appl Electrochem* 43:481–496. <https://doi.org/10.1007/s10800-013-0533-6>
45. Piątek J, Afyon S, Budnyak TM et al (2021) Sustainable Li-ion batteries: chemistry and recycling. *Adv Energy Mater.* <https://doi.org/10.1002/aenm.202003456>
46. Young KH (2016) Research in nickel/metal hydride batteries 2016. *Batteries* 2:1–5. <https://doi.org/10.3390/batteries2040031>
47. Ma SC, Fan Y, Feng L (2017) An evaluation of government incentives for new energy vehicles in China focusing on vehicle purchasing restrictions. *Energy Policy* 110:609–618. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.057>
48. Liu W, Placke T, Chau KT (2022) Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Rep* 8:4058–4084. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016>
49. Dolker T, Pant D (2020) Metals extraction from waste button cell battery. *Curr Dev Biotechnol Bioeng Resour Recover Wastes.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64321-6.00017-3>
50. Farhani S, N'Diaye A, Djerdir A, Bacha F (2020) Design and practical study of three phase interleaved boost converter for fuel cell electric vehicle. *J Power Sources* 479:228815. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228815>
51. Yu W, Liu Y, Liu L et al (2022) Rechargeable aqueous Zn-LiMn₂O₄ hybrid batteries with high performance and safety for energy storage. *J Energy Storage* 45:103744. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103744>
52. Akinsolu FT, de Paiva VN, Souza SS (2017) Patent landscape of neglected tropical diseases: an analysis of worldwide patent families. *Glob Health* 13(13):1–13. <https://doi.org/10.1186/S12992-017-0306-9>
53. Chartoumpakis DV, Fu CY, Ziros PG, Sykiotis GP (2020) Patent review (2017–2020) of the Keap1/Nrf2 pathway using patsee pro: focus on autoimmune diseases. *Antioxidants* 9:1138. <https://doi.org/10.3390/ANTOX9111138>
54. Alasam MSM, Mezher T (2021) Analyzing existing UAE national water, energy and food nexus related strategies. *Renew Sustain Energy Rev* 144:111031. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111031>
55. Zhang HE, Wong KH, Chang V (2021) Patent analysis in the 5G network. *J Glob Inf Manag* 29:1–28. <https://doi.org/10.4018/jgim.20211101.ou28>
56. Qi X, Fuller E, Wu Q et al (2012) Laplacian centrality: a new centrality measure for weighted networks. *Inf Sci (NY)* 194:240–253. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.027>
57. Veeffkind V, Hurtado-Albir J, Angelucci S et al (2012) A new EPO classification scheme for climate change mitigation technologies. *World Pat Inf* 34:106–111. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2011.12.004>
58. Mao G, Han Y, Liu X et al (2022) Technology status and trends of industrial wastewater treatment: a patent analysis. *Chemosphere* 288:132483. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132483>
59. Chanchetti LF, Oviedo Diaz SM, Milanez DH et al (2016) Technological forecasting of hydrogen storage materials using patent indicators. *Int J Hydrogen Energy* 41:18301–18310. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.137>
60. Loglet Lab 4. <https://www.logletlab.com/index?page=index&preload=library.get.1>. accessed 4 Nov 2022
61. Meyer PS, Yung JW, Ausubel JH (1999) A primer on logistic growth and substitution: the mathematics of the Loglet Lab software. *Technol Forecast Soc Change* 61:247–271. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00021-9)
62. Franses PH (1994) A method to select between Gompertz and logistic trend curves. *Technol Forecast Soc Change* 46:45–49. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0040-1625(94)90016-7)
63. Ernst H (2003) Patent information for strategic technology management. *World Pat Inf* 25:233–242. [https://doi.org/10.1016/S0172-2190\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0172-2190(03)00077-2)
64. Díaz M, Rivero S, de Moya-Aneón F (2010) Latin American technological production with higher international visibility: 1996–2007. a case study: Brazil. *Rev Española Doc Científica* 33:34–62. <https://doi.org/10.3989/REDC.2010.1.708>
65. Sanchez EA, Macêdo Barbalho SC, Regina Martin A (2021) An exploratory analysis of possible effects of “nudge” on public policies to support innovation in Brazil: the case of inovar-auto program. *Int J Innov Technol Manag.* <https://doi.org/10.1142/S0219877021500152>
66. Garcia-Remigio CM, Cardenas MA, Campoy-Muñoz P, Venegas-Martínez F (2020) VAssessment of the impact of the automotive industry in the Mexican economy: an approach through social accounting matrices. *Trimest Econ* 87:437–461. <https://doi.org/10.20430/ETE.V87I346.852>
67. Fitzsimons A, Guevara S (2018) The Argentine automotive industry and its sources of profit: a long-term analysis (1960–2013).

- América Lat en la Hist económica 25:239–274. <https://doi.org/10.18232/ALHE.V25I1.859>
68. Mock P, Schmid SA (2009) Fuel cells for automotive powertrains—A techno-economic assessment. *J Power Sources* 190:133–140. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.10.123>
 69. Haslam GE, Jupusta J, Panayil G (2012) Assessing fuel cell vehicle innovation and the role of policy in Japan, Korea, and China. *Int J Hydrogen Energy* 37:14612–14623. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.06.112>
 70. Chile, Energy M of (2020) National Green Hydrogen Strategy Chile, a clean energy provider for a carbon neutral planet. https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf. accessed 15 Feb 2021
 71. International Energy Agency (IEA) (2021) Hydrogen in Latin America. *Hydrog Lat Am*. <https://doi.org/10.1787/68467068-en>
 72. Barandiarán J (2019) Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia. *World Dev* 113:381–391. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.09.019>
 73. Gala P, Camargo J, Freitas E (2018) The Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC) was right: scale-free complex networks and core-periphery patterns in world trade. *Camb J Econ* 42:633–651. <https://doi.org/10.1093/CJE/BEX057>
 74. Hughes L, Meckling J (2018) Policy competition in clean technology: scaling up or innovating up? *Bus Polit* 20:588–614. <https://doi.org/10.1017/BAP.2018.20>
 75. Leitão J, Pereira D, de Brito S (2020) Inbound and outbound practices of open innovation and eco-innovation: contrasting bioeconomy and non-bioeconomy firms. *J Open Innov Technol Mark Complex* 6:145. <https://doi.org/10.3390/OITMC6040145>
 76. South Korean, Ministry of Trade and E (2019) Hydrogen Economy: Roadmap of Korea. http://www.motie.go.kr/motie/nel/press/prs2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=81&cate_n=1&bbs_seq_n=161262_seq_n=161262
 77. Pinto PE, Vallone A, Honores G (2019) The structure of collaboration networks: findings from three decades of co-invention patents in Chile. *J Informetr* 13:100984. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2019.100984>
 78. Gorenstein S, Ortiz R (2018) Natural resources and primary sector-dependent territories in Latin America. *Area Dev Policy* 3:42–59. <https://doi.org/10.1080/23792949.2018.1431555>
 79. Borgstedt P, Neyer B, Schewe G (2017) Paving the road to electric vehicles—a patent analysis of the automotive supply industry. *J Clean Prod* 167:75–87. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.08.161>
 80. Yeh S, Rubin ES, Taylor MR, Hounshell DA (2012) Technology innovations and experience curves for nitrogen oxides control technologies. *J Air Waste Manage Assoc* 55:1827–1838. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464782>
 81. de Salvo JO, Saraiva de Souza MT, Vaz de Almeida FG (2021) Implementation of new technologies for reducing fuel consumption of automobiles in Brazil according to the Brazilian Vehicle Labelling Programme. *Energy* 233:121132. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121132>
 82. Martínez H, Castellanos S (2015) Label and energy efficiency standard for light vehicles (in Spanish). *Banco Interam Desarro*. <https://doi.org/10.18235/0001877>
 83. United Nations (2015) Sustainable Development Goals – 17 Goals to Transform Our World. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. accessed 28 Mar 2021
 84. Glachnt M, Ménérier Y (2013) Technology diffusion with learning spillovers: patent versus free access. *Manchester Sch* 81:683–711. <https://doi.org/10.1111/J.1467-9957.2012.02337.X>
 85. Hattori M, Tanaka Y (2016) Competitiveness and subsidy or tax policy for new technology adoption in duopoly. *Glob Econ Rev* 46:18–32. <https://doi.org/10.1080/1226508X.2016.1256787>
 86. Hayter CS, Rooksby JH (2016) A legal perspective on university technology transfer. *J Technol Transf* 41:270–289. <https://doi.org/10.1007/s10961-015-9436-5>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Authors and Affiliations

Willmer Guevara-Ramírez^{1,3} · Itzlar Martínez-de-Alegría² · Rosa María Río-Belver¹ · Izaskun Alvarez-Meaza²

✉ Willmer Guevara-Ramírez
wguevara001@ikasle.ehu.es

¹ Faculty of Engineering in Vitoria-Gasteiz, University of the Basque Country (UPV/EHU), C/Nieves Cano, 2, Vitoria-Gasteiz, Spain

² Faculty of Engineering in Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU), Paseo Rafael Moreno "Pitxitxi" No. 3, Bilbao, Spain

³ Universidad Católica del Norte, Escuela de Ciencias Empresariales, Larrondo 1281, Coquimbo, Coquimbo, Chile

Artículo 3 (P3)

La tabla 8 muestra la información referente al impacto y datos de la revista del artículo 3.

Tabla 8: Indicadores del tercer artículo.

Título: Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies	
Revista: Clean Technologies and Environmental Policy	DOI: https://doi.org/10.1007/s10098-022-02388-w
Fecha de envío: 31-03-2022	Fecha de Publicación: 10-09-2022
Coautor 1: Willmer Guevara Ramírez	Grado: Candidato a Doctor
Coautor 2: Itziar Martínez De Alegría	Grado: Doctor
Coautor 3: Rosa María Río Belver	Grado: Doctor
Base de datos de indexación: JCR (WOS)	
Categoría: Engineering, Environmental	Índice de impacto: 4,7
Posición que ocupa la revista: 26	Número de revistas en el área: 54
Quartil: Q2	Año: 2021
Categoría: Environmental sciences	Índice de impacto: 4,7
Posición que ocupa la revista: 98	Número de revistas en el área: 279
Quartil: Q2	Año: 2021
Base de datos de indexación: Scopus	
Categoría: Business, Management and Accounting (miscellaneous)	Índice de impacto: 0,756
Posición que ocupa la revista: 77	Número de revistas en el área: 351
Quartil: Q1	Año: 2021
Categoría: Management, Monitoring, Policy, and Law	Índice de impacto: 0,756
Posición que ocupa la revista: 102	Número de revistas en el área: 366
Quartil: Q2	Año: 2021
Citar como: Guevara-Ramírez, W., Martínez-de-Alegría, I. & Río-Belver, R.M. (2023). Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies. Clean Techn Environ Policy 25, 69–91. https://doi.org/10.1007/s10098-022-02388-w	

Fuente: Elaboración Propia, 2023.



Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies

Willmer Guevara-Ramírez^{1,3} · Itziar Martínez-de-Alegría² · Rosa María Río-Belver¹

Received: 31 March 2022 / Accepted: 18 August 2022 / Published online: 10 September 2022
© The Author(s) 2022

Abstract

In order to address Climate Change and energy dependency challenges, hydrogen (H₂) is emerging as a promising energy carrier. Studies related to its production have conceptualized it as green (GH₂), clean, renewable (RH₂), ecological, and sustainable (SH₂). The aim of this research is to deepen the understanding of the GH₂ concept and to state boundaries between different terms. To reach this objective, a bibliometric analysis of publications indexed in SCOPUS is launched. Also, in order to assess the potential of renewable energy sources (RES) for GH₂ production, a review of the meta-analysis literature on the Energy Return on Energy Invested (EROI) ratio as regards these RES is performed. Additionally, an analysis of main national strategies on GH₂ is launched. Results indicate that the GH₂ concept is gaining remarkable relevance, while the keyword maps show no significant differences between SH₂, RH₂ and GH₂. EROI reveals low average values for the different biomass energy production processes. For their part, GH₂ national strategies focus mainly on solar and wind technologies, albeit leaving the door open to biomass, where EROI could become an adequate metric to guide these strategies towards a low carbon energy path. Although the role of biomass may become fundamental in this energy transition process, given its low EROI values and considering that it is not a totally clean RES, it should be indexed as RH₂, but not always as GH₂. Finally, a proposal that guides a more appropriate use of the term GH₂ is made.

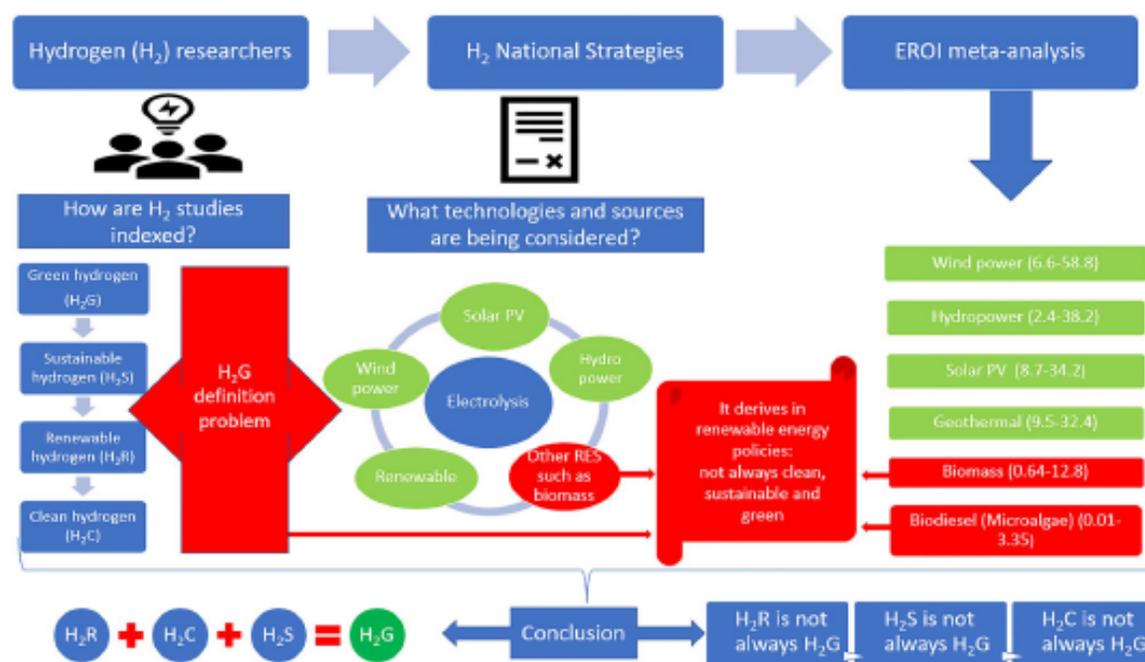
✉ Willmer Guevara-Ramírez
wguevara001@ikasle.ehu.eus

¹ Faculty of Engineering in Vitoria-Gasteiz, University of the Basque Country (UPV/EHU), C/Nieves Cano, 12, Vitoria-Gasteiz, Spain

² Faculty of Engineering in Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU), C/Alameda de Urquijo, s/n, Bilbao, Spain

³ Escuela de Ciencias Empresariales, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile

Graphical abstract



Keywords Bibliometric · Energy return on energy invested (EROI) · Green hydrogen (GH₂) · Policy strategy · Renewable hydrogen (RH₂) · Sustainable hydrogen (SH₂)

Abbreviations

CCUS	Carbon capture, use and storage
CO	Carbon monoxide
CO ₂	Carbon dioxide
EROI	Energy return on energy invested
EBPT	Energy payback time
H ₂	Hydrogen
GH ₂	Green hydrogen
GHG	Greenhouse gases
GW	Gigawatt
LCA	Life cycle assessment
PM ₁₀	Particulate matter with diameters of 10 μm
PV	Photovoltaic
O ₃	Ozone: NEA: Net energy analysis
NO ₂	Nitrogen dioxide
RH ₂	Renewable hydrogen
RES	Renewable energy sources
SH ₂	Sustainable hydrogen
SDGs	Sustainable development goals
UK	United Kingdom
USA	United States of America

SDGs	Sustainable development goals
SO ₂	Sulfur dioxide

Introduction

In recent decades, humankind has viewed two directly related problems with great concern: On one hand, dependence on non-renewable energy sources (non-RES) such as fossil fuels. On the other hand, the environmental damage caused by overuse of fossil fuels (Bamati and Raoofi 2019). Multiple initiatives have been generated from these problems, primarily among which are the use of renewable energy sources (RES) and the development of electric cars (Hannan et al. 2017; Herez et al. 2020), leading to many nations being in the process of transitioning to RES (Diesendorf and Wiedmann 2020; REN21 2021).

To address these challenges, hydrogen (H₂) is emerging as a sustainable energy carrier. Its use as a non-polluting energy vector is gaining relevance and is considered one of the most promising in the future (Ni et al. 2007; Hosseini and Wahid 2016; Osman et al. 2020a). Although there are

other substances in nature that contain H₂, water is one of the most abundant substances on the planet. The great dream of propelling an automobile fueled by water might well be materialized in H₂, and herein lies its greatness.

Green hydrogen (GH₂), energy return on energy invested (EROI) and national energy strategies

One of the main problems in obtaining H₂ is that in nature it is not found in a pure state, requiring the application of different separation processes. These techniques include thermolysis, reforming, gasification and electrolysis (Carmo et al. 2013; Hosseini and Wahid 2016; Çelik and Yıldız 2017). Three main classifications associated with the different H₂ production techniques and their environmental impact have been established: (i) Gray H₂, being the most widely used and the least environmentally friendly, as its generation requires fossil fuels using hydrocarbon reforming and pyrolysis, (Nikolaidis and Poullikkas 2017; Newborough and Cooley 2020); (ii) Blue or low-carbon H₂, while still requiring fossil fuels, achieves carbon emission reductions through capture and storage (Noussan et al. 2021); (iii) Green hydrogen (GH₂), which is produced from RES, using electrolysis, with a near-zero carbon production pathway (Kakoulaki et al. 2021). At present, it is estimated that 95% of H₂ production is obtained by processes associated with the exploitation of fossil fuels, 4% using electrolysis and only 1% from biomasses (Hosseini and Wahid 2016).

GH₂ is defined as the set of methods, techniques and processes employed to produce H₂ using RES. As a clean (CO₂-free) renewable fuel, its large-scale production makes it a sustainable alternative for future generations (Nikolaidis and Poullikkas 2017; Noussan et al. 2021; Rabiee et al. 2021; Kim et al. 2021; Mohideen et al. 2021). Velazquez and Dodds (2020) argues that there is no universally accepted definition for GH₂, which may result in technologies that do not meet currently accepted standards (Velazquez and Dodds 2020). Therefore, it is important to determine whether research on GH₂ has established boundaries with respect to other terms such as clean H₂, sustainable hydrogen (SH₂), renewable hydrogen (RH₂), and ecological H₂, or whether they are being understood as synonyms. Hereafter, the term "H₂ concept" will be used to refer to the above-mentioned set of terms to synthesize the wording. Accordingly, a universally accepted concept of GH₂ that defines the types of RES and the technologies it encompasses, can standardize the certification processes, thus, avoiding future disputes in the international commercialization process.

Net energy analysis (NEA) assesses how much "net" energy a given energy carrier can provide to society, once all the energy costs incurred along its supply chain have been subtracted. A key indicator for NEA analysis is the energy return on (energy) investment, identified by the

acronym EROI or EROEI (Raugei 2019). EROI is defined as the ratio between the total energy produced or returned by an energy source and the energy invested or consumed to obtain it (Hall et al. 2014; Arvesen and Hertwich 2015; Walmsley et al. 2018; Fabre 2019; Capellán-Pérez et al. 2019; Diesendorf and Wiedmann 2020; Wang et al. 2021; Jackson and Jackson 2021). Together with the energy pay-back time (EBPT), EROI is the most widely used metric to evaluate the energy benefit of different energy technologies (Bhandari et al. 2015; Jackson and Jackson 2021).

Specifically, through EROI, a relationship can be established between the energy lost or not used by society and the net energy that is available to society (Arvesen and Hertwich 2015). This relationship between the energy available and the energy consumption required to produce it can be interpreted as the efficiency of a technology to provide energy (Hall et al. 2014; Fabre 2019). Therefore, it is estimated that a decrease in EROI below a certain limit could affect the availability of energy for certain activities, compromising the operation of certain systems within society. Correspondingly, a reduction in EROI is reflected in negative economic results, thus favoring investment in those energies that offer higher EROI (Jackson and Jackson 2021). Therefore, NEA in combination with other sustainability indicators, could be considered as an adequate metric when defining energy technologies as sustainable and/or green.

When estimating the EROI of different RES technologies, many methodological discrepancies appear due to the databases used (Carbajales-Dale et al. 2014; Diesendorf and Wiedmann 2020), the characteristics of the variables (e.g., a megajoule (MJ) of electricity versus a MJ of heat energy) and system boundaries. In regard to these boundaries, the following distinction is necessary when estimating the EROI of different technologies: standard EROI (EROI_{st}),¹ EROI 'at point of use' (EROI_{pou})² (Capellán-Pérez et al. 2019) and extended EROI (EROI_{ext})³ (White and Kramer 2019; Raugei 2019; Capellán-Pérez et al. 2019; de Castro and Capellán-Pérez 2020; Diesendorf and Wiedmann 2020), the latter being traditionally more used to assess fossil fuels. A critical review of the main modeling tools currently used to assess energy transition can be found in (de Blas et al. 2019; Samsó et al. 2020). As explained by these authors, there are a wide range of modeling forecasting

¹ The calculation includes the on-site energy production or extraction costs and the cost of the items used (energy cost) (Capellán-Pérez et al. 2019).

² This EROI calculation encompasses production to transportation to the point of consumption, including production, processing and transportation (Capellán-Pérez et al. 2019).

³ This case also includes the energy consumption necessary to supply and use certain amounts of energy by the end user (Capellán-Pérez et al. 2019).

tools to design alternatives for a more sustainable future. Among the most relevant in relation to our area of study are: "energy models", which focus on energy systems, and "Integrated Assessment Models" (IAMs), with a more extensive approach to the eco-social-environmental systems and their interrelationships [31]. IAMs are complex software that includes mathematical models used to portray fundamental dimensions for the de-carbonization of the economy (i.e., environmental, social, economic, climatic, and also institutional dimensions). Decision-makers increasingly rely on these IAMs to guide their decisions regarding energy transition (Samsó et al. 2020). These models are fundamental tools in order to model transportation, mineral use and static and dynamic⁴ EROI estimations (MEDEAS 2017; de Blas et al. 2019; Samsó et al. 2020).

Given the great expectations created around the production and commercialization of GH₂, several countries have identified the huge potential offered by this fuel in environmental and economic terms. This has led them to propose relevant specific policies, some examples being the European bloc (EU-27 and the United Kingdom (UK) (Kakoulaki et al. 2021), USA (Clark and Rifkin 2006), China (Huang and Liu 2020), Japan (Chaube et al. 2020), and Chile (Armijo and Philibert 2020; Chile 2020). Interpretation of these strategies may help to determine how those countries that show the most progress are actually conceptualizing GH₂.

Scientometry applied to GH₂

The necessary natural conditions are not nearly enough when it comes to install GH₂ production capacities, the scientific capabilities to efficiently assimilate the processes of technology transfer and development are also important. Identifying where knowledge is generated and which clusters take special relevance is crucial, as this allows policies that provide effective actions for managing technology transfer to be formulated. Likewise, the identification of hot topics being studied by the scientific community helps to focus on those technologies with greater potential, as well as identifying relevant topics that are currently receiving little attention. In this sense, researchers play a fundamental role in the symbiotic nature between science and industry in terms of providing information of high scientific rigor that efficiently advances the implementation of those technologies that may have a substantial impact on the future of humanity, providing clear indicators for stakeholders within the sector.

Bibliometric studies can be used to visualize an area of knowledge, reflecting the main indicators to provide a quick

and intuitive understanding of the social and cognitive structure of the subject under analysis (Garechana et al. 2012). Examples of the most recent and impactful bibliometric studies related to environmental concepts have focused on bringing conceptual clarity to the terms "circular economy" and "sustainability" (Geissdoerfer et al. 2017), and a complete comparative analysis of the three concepts of "circular economy"; "green economy" and "bioeconomy" (D'Amato et al. 2017). Both studies address the concepts in specific terms, without including interpretations derived from the definitions, i.e., only general keywords were included without including interpretations derived from other terms. On the other hand, the study by Garrido et al. (2019) explores the association between supply chain performance and RES incorporation using the keywords associated with the existing RES typologies: biofuel, biomass, bioethanol, ethanol, geothermal energy, wind energy, wind power, solar energy, thermal energy, photovoltaic cells, ocean energy, hydroelectric energy, hydropower and landfill gas. The difference with respect to the previous approach is that in this case, the search includes terms derived from the global concept of RES.

As regards the concept of GH₂, being a relatively new term (US Department of Energy 1995; Clark and Rifkin 2006), bibliometric studies on this concept have not been specifically addressed. However, topics related to H₂ have already been addressed, such as the study by Ming-Yueh (2008) that explored the characteristics of the literature on H₂ energy from 1965 to 2005. It found that growth of scientific production in the said period grew at a rate of about 18%, revealing leadership by the USA, Japan and China (Ming-Yueh 2008). Hydrolysis or hydrolytic dehydrogenation of sodium borohydride was recently addressed (Abdelhamid 2021), H₂ production from organic raw materials, industrial wastes or byproducts (Jiménez-Castro et al. 2020), as well as capture, storage and production methods (Chanchetti et al. 2019; Liu et al. 2020; Osman et al. 2020b). In 2011 a study presented technological S-curves integrating bibliometrics and patenting for fuel cell and H₂ energy technologies, determining that technologies used to generate and store H₂ had not yet reached technological maturity (Chen et al. 2011). Later, in 2020, Alvarez-Meaza et al. (2020) researched bibliometrics and patents to generate technology knowledge maps of fuel cell electric vehicles to be able to forecast future trajectories of research trends and expected scenarios. Other authors have studied H₂ production methods with a clean, sustainable approach produced biologically, usually by algae and bacteria, and microbial electrolysis cells (MEC), such as biohydrogen (Leu et al. 2012; Hsu and Lin 2016; Osman et al. 2020a; Zhao et al. 2020). However, the results shown in these studies establish no relationship with the term GH₂. The strategies associated with the production of GH₂ have been linked to more

⁴ The dynamic EROI covers all energy costs of the entire system, including feedback, and can be calculated dynamically, i.e., taking into account time periods (Capellán-Pérez et al. 2019).

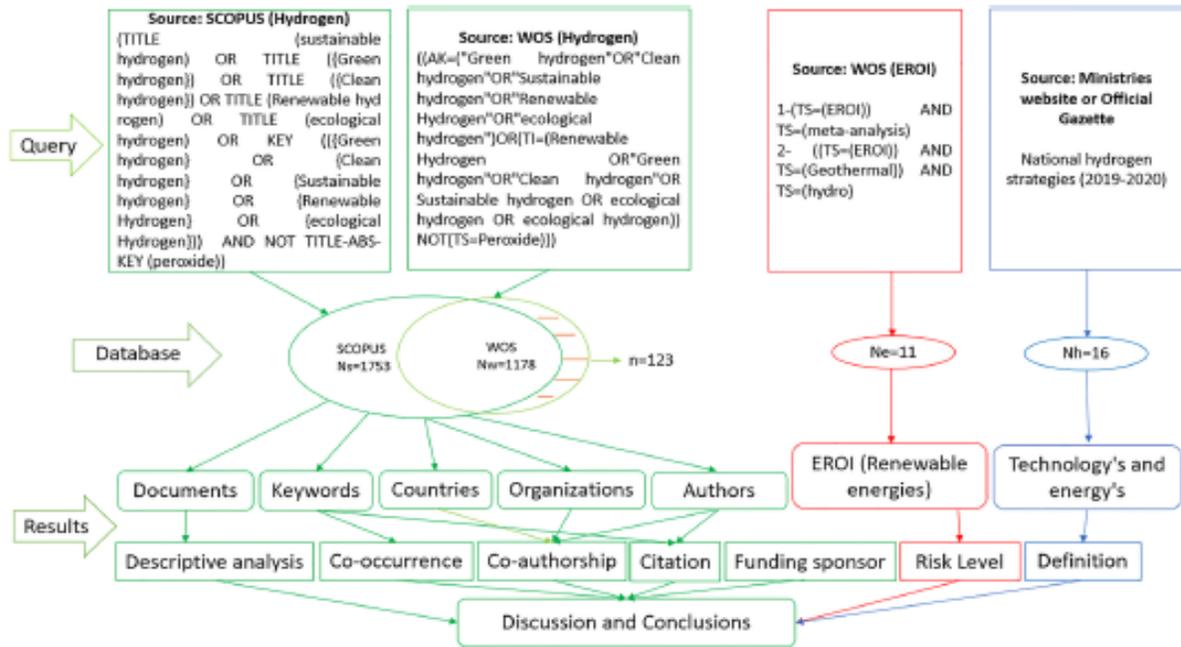


Fig. 1 Structure of the present investigation's methodology

traditional RES production processes such as solar, wind and hydro, (Kazi et al. 2021; Chien et al. 2021). Biomass is also recognized, albeit with lower potential (Kakoulaki et al. 2021).

The objective of this research is to better understand the concept of green GH₂ through a bibliometric analysis of publications indexed in the SCOPUS database, in order to comprehend the boundaries between the term GH₂ and others used synonymously. Additionally, a review of the existing meta-analysis literature on EROI applied to different RES is performed with the aim of evaluating its potential for GH₂ production. Finally, an analysis of the main national strategies on GH₂ is launched. The rest of the article is organized as follows: Sect. 2 explains the methodology utilized to meet the research objective. Sections 3 and 4 present the results obtained and the discussion respectively, and finally, the conclusions are illustrated in Sect. 5.

Material and methods

Figure 1 illustrates the methodology developed for the present study. A total of three stages have been performed. The first stage focuses on a bibliometric analysis of the scientific production of publications on the concept of H₂ (in green); the second, on the literature review of meta-analysis studies

on EROI (in red); and the third stage, on the review of main national strategies on GH₂ (in blue).

Bibliometric analysis

As explained, the most recent and impactful bibliometric studies related to environmental concepts have followed two different approaches. This study follows the approach of (Geissdoerfer et al. 2017; D'Amato et al. 2017) (i.e., only including the search terms encompassed in the "H₂ concept").

Two principles were defined for the choice of database: the first was based on the impact of the source and the second on the greatest coverage in terms of the number of indexed documents. This made it possible to focus the analysis on the SCOPUS and Web of Science (WOS) databases. Figure 1 illustrates the methodology used for the bibliometric analysis, (shown in green). On April 16, 2021, the defined terms, representing the main meanings that can be related to the evolution of the concept of H₂, were introduced as a query in the title and as an author keyword; to avoid indirect references to the term, the abstract was not searched. This yielded a total of 1753 documents in SCOPUS and 1178 in WOS, with a coincidence between the two sets of 1055 and a difference of 123 in the number of WOS documents not included in SCOPUS.

To analyze the overlap between the databases, four steps were defined. In the first step, the smaller dataset (WOS) was added to the larger one (SCOPUS). In step two, a unique Digital Object Identifier (DOI) was assigned to those documents that did not have one. In step three, duplicates were removed from the DOI column. And in step four, a second simplification was applied taking the title column into account. A decision was taken to use the SCOPUS database because it includes 89.56% of the WOS documents and has a higher indexing coverage. We also added the 123 non-content WOS documents. These data were analyzed using VOSviewer software, which allows bibliometric networks of countries, organizations and authors to be constructed and visualized in order to identify and characterize the clusters and their interaction with the subject matter (Van Eck and Waltman 2010, 2020), based on co-authorship, co-occurrence and citation analysis (Sharifi 2021).

The initial step within the first stage was a descriptive analysis based on the growth of the documents associated with each search concept (see Sect. 3.1.1.). Then, in Sect. 3.1.2, a keyword map was developed and used to determine the relationships of the terms used with the different production methods, and to analyze the main research trends in these topics, as well as the maturity of each concept (Guan et al. 2021; Wu et al. 2021). The analysis by country was carried out by developing a co-authorship map to assess scientific productivity and collaborative networks (Sect. 3.1.3.). The funding by country analysis identifies which countries have provided greater financial support and how this is reflected in the scientific productivity for the topic studied (Sect. 3.1.4.). In the case of organizations producing knowledge, a co-authorship map was developed to determine the levels of collaboration and whether these are in a national or international context (Sect. 3.1.5.). Finally, the co-authorship map was used to determine which researchers are the most productive and collaborative, enabling us to identify the topics that are allowing them to achieve this relevance (Sect. 3.1.6.).

EROI for renewable energy sources

The second stage of the analysis is aimed at establishing the limits of the GH₂ concept, based on the efficiency expressed in the EROI standard (see Fig. 1 in red).

Despite several studies having focused on performing meta-analyses to identify the EROI values of RES (Bhandari et al. 2015; Walmsley et al. 2018; Capellán-Pérez et al. 2019), as far as we know, there is no paper that performed EROI estimates for GH₂.

Therefore, in order to establish these limits, the following steps have been followed:

- i. A review of main literature on current meta-analysis studies published in WOS centered around the EROI calculations for the different RES with the potential to produce H₂. A meta-analysis consists of collecting and statistically analyzing data through methodical reviews. This tool has been widely used and disseminated in health sciences and clinical research, progressively extending to other areas such as life cycle assessment (LCA) and EROI. (Bhandari et al. 2015; Walmsley et al. 2018). As shown in Fig. 1 (in red), the search was performed under the queries (meta-analysis and EROI); in the case of geothermal energy searched by (EROI and geothermal) and for hydro-power (EROI and hydro) because when combined with "meta-analysis" no results appear.
- ii. In order to categorize the EROI values, in addition to Prananta and Kubiszewski (2021), the scale proposed by Capellán-Pérez et al. (de Blas et al. 2019) has been used. The IAM used by these authors is an energy-economy-environment model (i.e. the MEDEAS model) that computes the EROI of each technology and also the whole energy system endogenously and dynamically. This makes it possible to identify potentially hazardous situations of growth in gross energy production that does not lead to an increase in the net energy consumed by society, which has been called the "energy trap" (de Blas et al. 2019; Capellán-Pérez et al. 2019). According to the scale proposed by these authors:

"EROI > 15:1, no risk; <10-15:1, low risk; <5-10:1, dangerous; <5:1, very dangerous; <2-3:1, unfeasible system."

The proposed scale promotes a different view compared to a large part of the literature on NEA that centers on exceeding the "break-even point" (EROI of 1:1). Promoting values higher than 1:1 for EROI mean that not only can the elementary needs of humanity such as food, shelter and clothing be met, but also aspects such as the arts, healthcare, education, and the well-being of the average citizen are supported, as high-quality energy contributes to social well-being (Hall et al. 2014; Fizaine and Court 2016; Prananta and Kubiszewski 2021).

In general, we consider RES classified as low or no risk viable to produce GH₂.

National GH₂ strategies

The third stage of the analysis includes a review of national H₂ strategies, identified using the most relevant global sources of information related to these issues (i.e. the reports of the International Energy Agency (IEA) and the International Renewable Energy Agency (IRENA) (see Fig. 1 in blue)). These reports present a compilation of the countries

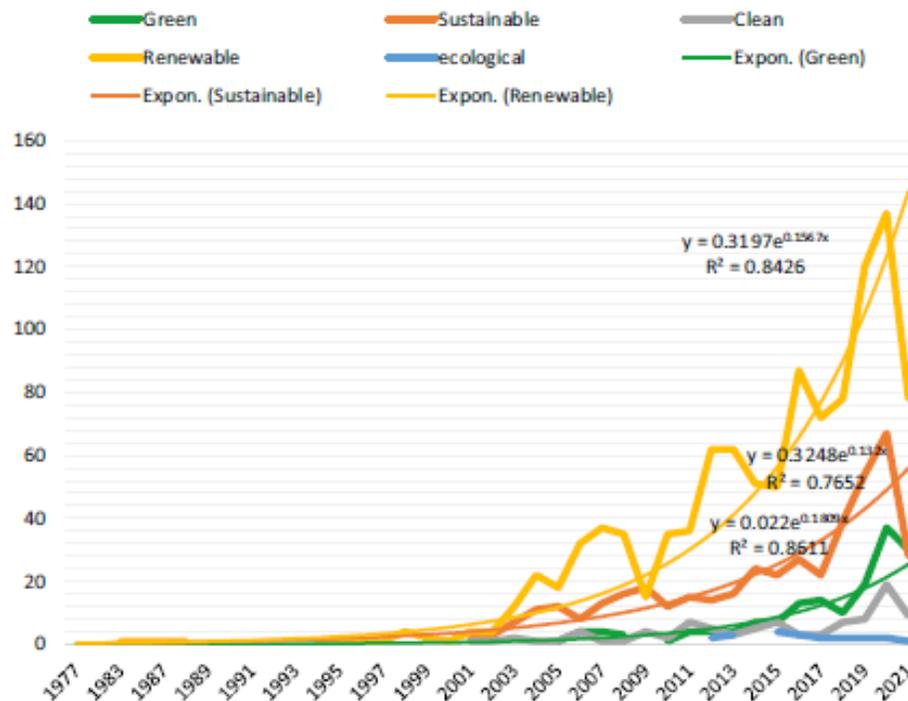


Fig. 2 Evolution of publications related to the "H₂ concept", indexed in WOS and SCOPUS, (1977–April 2021). *Source:* Own elaboration based on SCOPUS and Web of Science (WOS), 2022

that have published these strategy documents. Since 2019, Japan and Korea have published their national H₂ strategies, joined in 2020 by France, Australia, Canada, Chile, Germany, Netherlands, Russia, Norway, Portugal, Spain, together with the European Commission. During 2021 Hungary, Czech Republic and UK did likewise (IRENA 2020a; International Energy Agency 2021). In the review, we have identified which RES and technologies are being declared by the countries in their national roadmaps for H₂ production. These strategies have subsequently been analyzed using the websites of the ministry in charge of energy development in each country (in the case of Portugal, the nation's official gazette in the form of a resolution and in the case of the EU, the page for the European Commission has been consulted).

In general, three types of strategies have been identified. The first one promotes hydrogen production using the traditional resources available to the countries, including fossil fuels using carbon capture, use and storage (CCUS) methods and RES. The second is promoted by a group of countries with little potential to produce hydrogen, therefore, they focus on promoting the consumption and creation of technologies for the production and consumption of this energy carrier. The third group promotes the production of GH₂

only from the use of RES. Our analysis focuses on this last group of countries.

Results

Results of the bibliometric study

Descriptive analysis of the evolution of the H₂ concept

Publications related to the H₂ concepts addressed have been recorded since 1977, with discrete values until 2000, after which growth has been exponential up to the present (Fig. 2). Of a total of 1,751 records, 60.4% are associated with RH₂, this term being the first to be used in 1977. A year later, the concept of ecological H₂ appeared, which has been used very little (1.6%). In 1989, sustainable H₂ was the second most used concept with 24.8%. In 1998, with only 5.4%, clean H₂ appeared, which has shown a very discreet evolution. The term GH₂ proves to be a more modern concept that has been used in scientific research mainly in the twenty-first century (2006) and represents 9.2%, and although it shows exponential growth, its growth rate is lower than that of the terms renewable and sustainable. In 1995 a document made

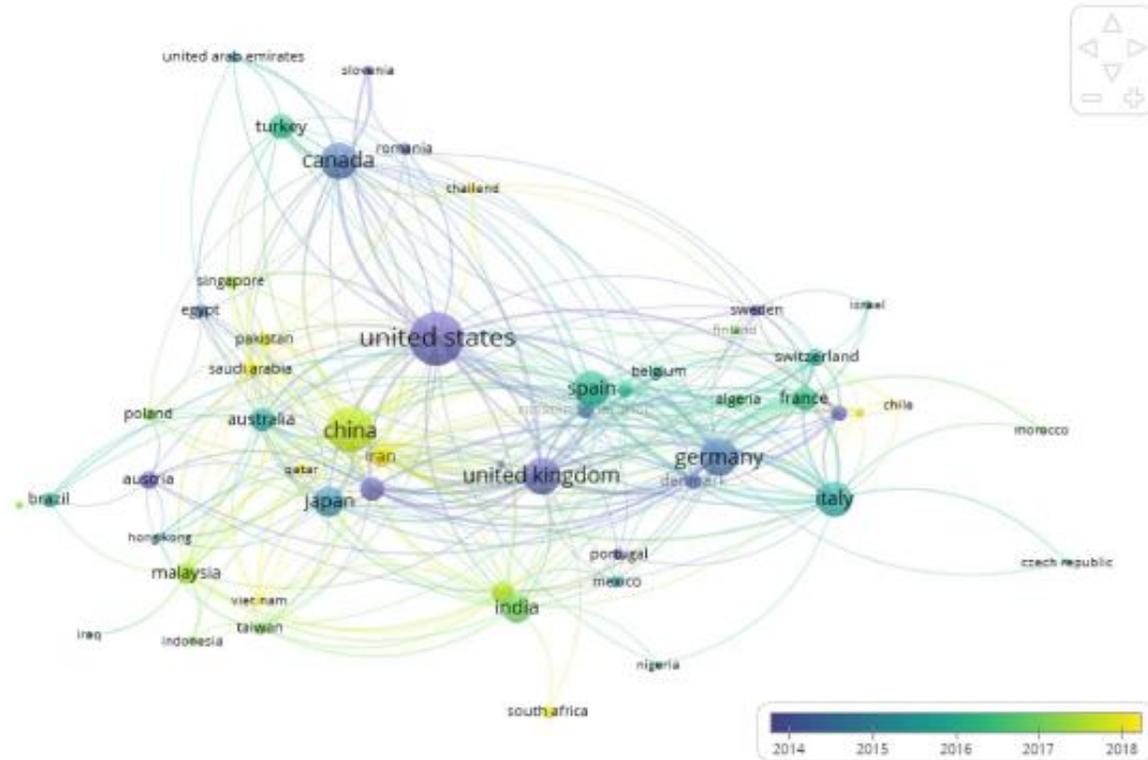


Fig. 7 Co-authorship map of countries on "H₂ concept" related research, (1977–April 2021). *Source:* Own elaboration based on SCOPUS, 2022

area. Overall, 64% of the publications have received funding, suggesting that the institutions are very interested in this subject.

Analysis by organization

In general, there is little collaboration between organizations. Collaboration is mainly national in scope, e.g., Ontario Tech University (Canada), which leads in this aspect, collaborating mainly with the University of Waterloo (Canada), University of Western Ontario (Canada), American University of Sharjah (United Arab Emirates), Gaziantep University (Turkey) and Argonne National Laboratory (USA). In second place is the cluster formed by the Chinese Academy of Sciences and its subordinate, the University of Chinese Academy of Sciences, which collaborates mainly with other Chinese universities. The National Renewable Energy Laboratory, which leads a cluster in the USA, also stands out. A significant number of organizations that appear on the right edge (Fig. 9), despite showing results on the subject, do not do so in a collaborative manner.

Analysis by authors

Productivity at the author level is led by the Canadian researcher Dr. Ibrahim Dincer from Ontario Tech University, Oshawa, Canada, with 57 papers in collaboration with 14 researchers, mainly from Canada and Turkey (Fig. 10). His research areas cover the topics of heat and mass transfer, fuel cell systems and H₂, among others. Other clusters with a productivity of 10 and 15 papers and grouping between 10 and 15 researchers, mainly Canadian and Chinese, can be observed in the center.

In the context of Fig. 10, Dr. John A. Turner, who belongs to the National Renewable Energy Laboratory, United States, researching direct conversion systems (photoelectrolysis) for H₂ production from sunlight and water, catalysts for H₂ and oxygen reactions, seems of little relevance to this co-authorship network. However, this researcher is notable in this analysis for being the most cited, with only six papers he has achieved 3,308 citations, 3,303 of which belong to the publication "Sustainable hydrogen production" (Turner 2004). This work helps to understand the concept of sustainability, mentioning solar, wind, nuclear and geothermal energy as the main RES for SH₂ production. Methods have

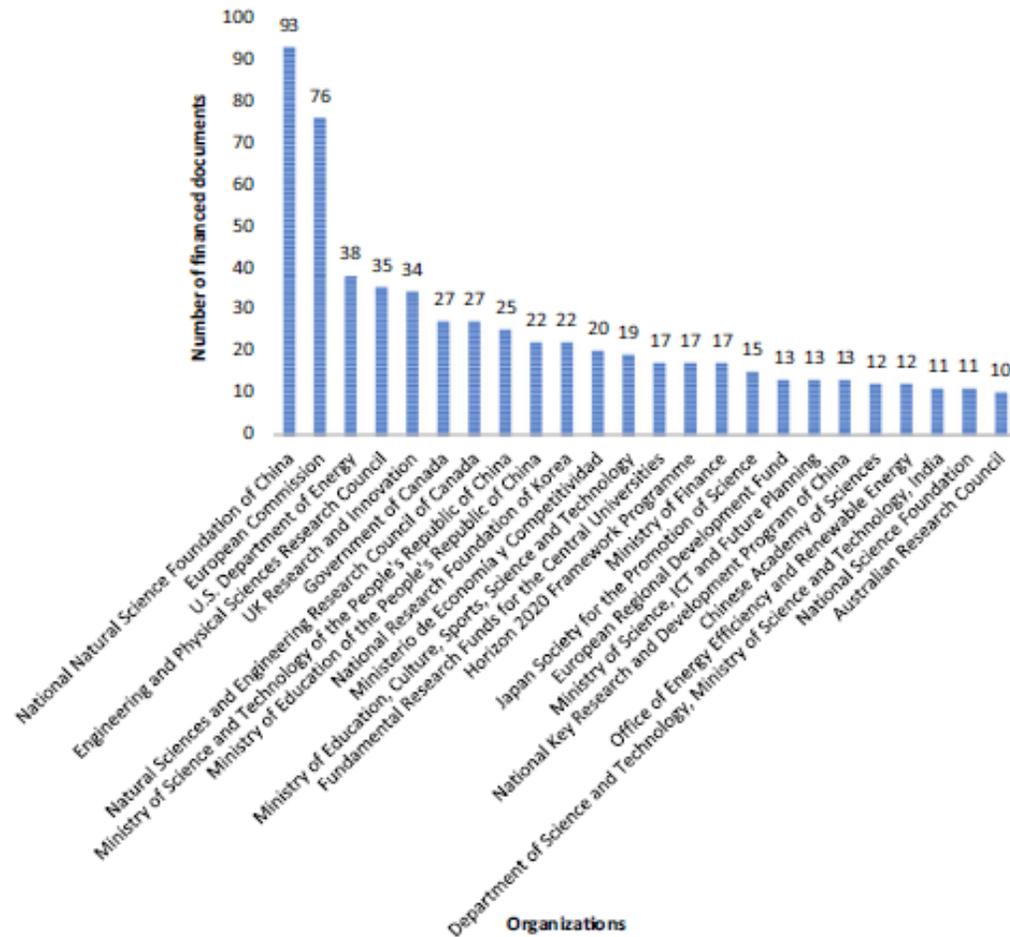


Fig. 8 Major funding organizations for "H₂ concept" related research. Source: Own elaboration based on SCOPUS, 2022

mentioned thermal chemical cycles using heat, water electrolysis and biomass processing using technologies such as reforming and fermentation (Turner 2004). Both the methods and resources cited can be linked to GH₂ production but are not limited to this concept, as they include energies not defined as renewable.

Results around EROI values of candidate energies for GH₂ production

Table 1 shows the EROI values according to meta-analysis studies for RES, including the scope of analysis, categorization, and source used. Main results as regards the revision of these meta-analysis illustrate that:

1. The EROI estimated for wind power by Walmsley et al. (Walmsley et al. 2017) at 19 sites in New Zea-

land, show that these metrics are greatly affected by average wind speed and blade diameter, resulting in variation from project to project, with the average being 34.7, despite showing a high value the authors consider it unreliable due to the intermittency of high generation. Therefore, they propose pairing wind generation with flexible base load generation, such as hydroelectric, for the complementary integration of wind farms into the national power grid, helping to overcome the drawback of wind intermittency. However, in the case of GH₂ production, intermittency would not have the same negative impact as when used for interconnected electricity generation. Another meta-analysis study suggests that hydro-power and wind power show great potential if geographic locations that provide adequate generation potential are chosen, with their performance match-

Fig. 10 Map of co-authorship of researchers on "H₂ concept" related research, (1977- April 2021). *Source:* Own elaboration based on SCOPUS, 2022

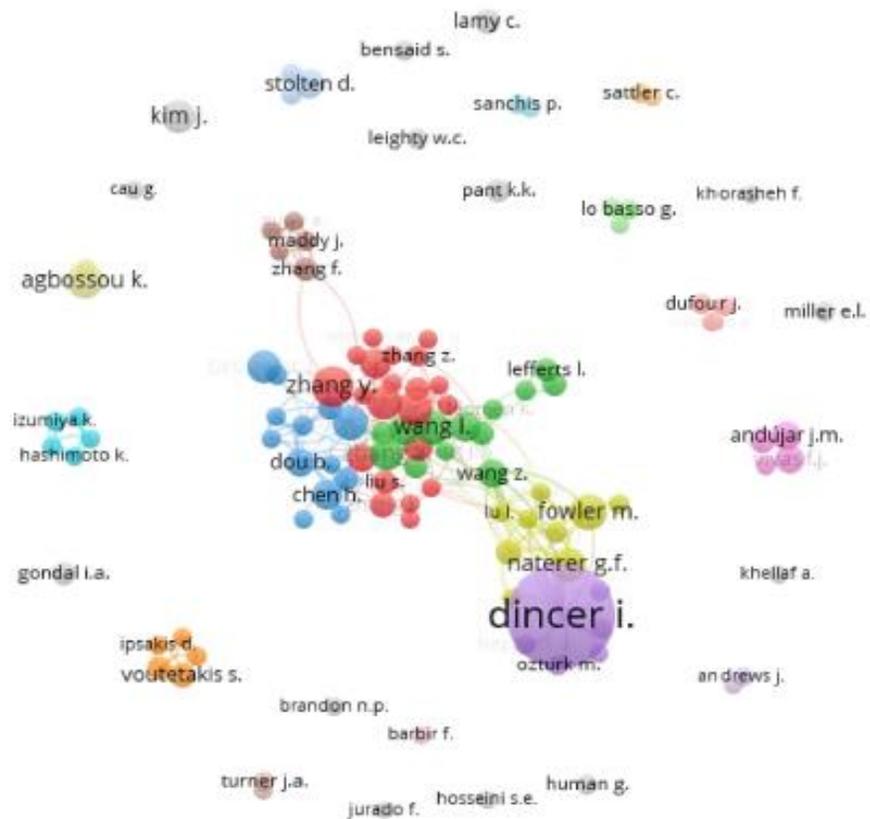


Table 1 EROI values according to meta-analysis study for RES. *Source* Own elaboration, 2022

Type	SCOPE	EROI			Category	Source
		Min*	Median	Max		
Wind power	New Zealand	6.6	34.7	58.8	No Risk	(Walmsley et al. 2017)
Hydropower	World	2.4	20.3	38.2	No Risk	(Walmsley et al. 2018)
Solar PV	World	8.7	21.5	34.2	No Risk	(Bhandari et al. 2015)
Biomass (Physical process)	China	–	12.8 *	–	Low Risk	(Wang et al. 2021)
Biomass (Biological process)	China	–	4.4*	–	Very Risk	(Wang et al. 2021)
Biomass (Physical Chemical)	China	1.26	4.3*	7.41	Very Risky	(Wang et al. 2021)
Biomass (Biofuel)	World	0.64	3.9*	6.7	Very Risky	(Prananta and Kubiszewski 2021)
Biodiesel (Microalgae)	World	0.01	1.6	3.35	Not feasible	(Ketzer et al. 2018)
Geothermal	Iceland	9.5	20.9	32.4	No Risk	(Atlason and Unnthorsson 2013)

*Mean calculated by the authors

VI. As regards geothermal energy, meta-analysis studies on EROI are sparse, resorting to the values determined for the case of the Nesjavellir geothermal power plant, the second largest geothermal power plant in Iceland, in the study by Atlason and Unnthorsson (2013), showing that this type of project

is feasible when natural conditions favor it, in this case with an EROI value of 32.4, however, excluding hot water, this was reduced to 9.5.

Table 2 Technologies described in global GH₂ strategies. Source: Own elaboration, 2022

Country	Electrolyzer capacity (GW)	Technologies	Energy	Project date	Source	Year
France	6.5	Electrolysis	Renewable	2030	(Pompil and Le Maire 2020)	2020
Spain	4	Electrolysis	Renewable	2030	(Spain 2020)	2020
Portugal	2.5	Electrolysis	Renewable	2030	(PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS 2020)	2020
Australia	23	Electrolysis	Solar-Wind-Hydro	2030	(Energy Council Hydrogen Working Group 2019)	2019
Netherlands	4	Electrolysis	Solar-Offshore Wind	2030	(Government of Netherlands 2020)	2020
Germany	10	Electrolysis	Wind- photovoltaics	2040	(German Federal Government 2020)	2020
Chile	25	Electrolysis	Solar-Wind	2030	(Chile 2020)	2020
European Union	40	Electrolysis	Renewable	2030	(EUROPEAN and COMMISSION 2020)	2020

In summary, Table 1 shows the meta-analysis studies on RES-based EROI, showing hydroelectric, wind and solar as the most efficient, with no risk. On the other hand, biomasses are considered very risky and biofuels unfeasible. The EROI values show great variability in the ranges established in the meta-analysis studies reviewed. Therefore, the risk categorization associated with the median value indicates the global potential of these energies, however, the specific conditions have to be analyzed within the context of each country, given that the EROI calculation depends on geographic conditions and other specific factors. (Walmsley et al. 2017).

Scope of GH₂ according to global strategies

Table 2 shows the main countries that have defined strategies focused on GH₂ production until 2020. Results show a convergence in terms of electrolysis as the technology that characterizes the conversion to H₂. In terms of energies, there is a consensus on solar and wind energy among those with the most ambitious plans in terms of capacity building, such as Chile, Australia, and Germany. However, within the European bloc, RES are generally referred to. The Norwegian government's strategic vision is that for H₂ to be a low- or zero-emission energy carrier, it has to be produced with zero or low emissions. It posits that this can be achieved by electrolysis of water using renewable electricity, or from steam reforming processes with natural gas or other fossil fuels combined with CCUS. In this strategy, low and zero-emission H₂ does not establish a specific position towards GH₂ production but rather to clean H₂ or simply H₂ (Norwegian Government, 2020).

Other countries such as the USA and Canada have an H₂ production agenda focused on various technologies, but recognize GH₂ as the one obtained by electrolysis and, despite highlighting hydroelectricity, wind and solar energy, they also include biomass and geothermal energy (Connelly et al. 2020; Government of the Russian Federation 2020; Natural Resources Canada 2020; HM Government 2021). One of

the first policies among the countries leading the scientific production on the subject was the one from Japan, however, this focused on the promotion of H₂ use rather than its production, making it the potential first importer of this fuel (Japan 2017).

South Korea is committed to leading an ecosystem that integrates a public-private partnership with ambitious goals in the development and exploitation of H₂-related technologies (Stangarone 2020). Its overall strategy covers all stages of the H₂ value chain (i.e., including technologies related to the manufacture and use of H₂ vehicles, fuel cells for the transport and domestic sectors, H₂ transport and distribution systems, and commercialization). While also promoting efforts in H₂ production, it recognizes its limited production capacity, therefore it anticipates that 70% of consumption will have to be imported by 2040 (South Korean Ministry of Trade 2019). This makes the Japanese and Korean markets key international markets in the future configuration of the global H₂ trade.

Discussion

The concept of GH₂ appears to be a relatively fresh concept, as evidenced by its first appearance 25 years ago (US Department of Energy, 1995). The US Department of Energy report (1995) claims that H₂ produced by RES or nuclear energy would contribute to eliminating atmospheric pollution by carbon monoxide and ozone, and thus reduce global warming (US Department of Energy 1995). However, there is evidence from even earlier studies that address H₂ production from RES. For example, the use of wind in 1978 (Bilgen 1978) and solar in 1989 (Knoch 1989). In other words, it emerged much earlier as a method but without being identified with the term GH₂.

The current relevance of this energy vector responds to five aspects: Firstly, improvements in terms of efficiency of RES production processes (including production costs);

secondly, improvement in the efficiency and cost of electrolyzers (Laguna-Bercero 2012); thirdly, the need to capitalize on the surplus of RES production due to intermittencies (Clark and Rifkin 2006; Jensen et al. 2007; Hall et al. 2014; Brey 2021); fourthly, the great growth possibilities of these energies (ESMAP 2020); and fifthly, the strong impact on reducing CO₂ emissions that it may provide in the future (Yu et al. 2021).

As regards GHG, it should be noted that CO₂ emissions are not the only cause of concern from an environmental point of view. There are other polluting gases that directly affect the population and cause environmental emergencies in many cities, e.g. particulate matter (PM₁₀) and polluting gases such as ozone (O₃), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), and sulfur dioxide (SO₂) (World Health Organization 2005), being of special concern for certain types of RES, and especially in the case of some types of biomass.

According to Hosseini and Wahid (2016), environmentally friendly biomass is considered the best alternative fuel, potentially the major and most sustainable RES on the planet, with approximately 4,500 EJ of annual primary production (Hosseini and Wahid 2016). Nonetheless, biomass exploitation processes have significant shortcomings in terms of efficiency and emissions. For example, biomass has the lowest efficiency among RES for electricity production (30–35%), compared to solar and wind energy (achieving 40–60% efficiency) (Mohideen et al. 2021). It also presents other problems, such as ash, including silicate melt-induced slagging, alkali-induced slagging, corrosion and agglomeration (Niu et al. 2016). The adverse effects of biomass exploitation on ecosystem components rings alarm bells (Mai-Moulin et al. 2021). Another form of biomass exploitation is bio-hydrogen or H₂ produced biologically from biological waste, wastewater, forestry and agricultural residues, among others (Osman et al. 2020a). This method does not have the shortcomings of biomass burning in terms of emissions. However, if we consider the low EROI values for biofuels, it can be established that they have less potential to produce GH₂ than other RES, even compared to other RES of the same biomass family (see Table 1), in this case biomass (Physical process) being the one with the highest potential.

In general, the aim of promoting GH₂ production is to achieve a RES based energy carrier at a competitive cost with respect to traditional fuels, which contributes to solving GHG emissions. In this sense, biomasses also present fewer benefits compared to the rest of RES. According to results of a recently published study by Gemechu & Kumar, they show that the CO₂ values of wind based water electrolysis (0.69 ± 0.04 kg CO₂ eq / kg H₂) on average has values three times lower than the best result for H₂ produced from a biomass (the case of bio-oil reforming varying between 1.57

and 3.46 kg CO₂ eq / kg H₂), and in the case of supercritical water gasification (SCWG) of algal biomass, this could increase between 10.14 to 12.72 kg CO₂ eq / kg H₂ (Gemechu and Kumar 2021). Although the above elements lead us to question whether this RES can be classified as green, the keyword map indicates that biomasses and biogas have been classified as GH₂, with several recent examples (Di Marcobertardino et al. 2018; Preuster and Albert 2018; Cholewa et al. 2018; Akroum-Amrouche et al. 2019; Minutillo et al. 2020; Gonzalez Diaz et al. 2021; Zhao et al. 2021), and especially bio-hydrogen, a trend which has been gaining ground (Abuşoğlu et al. 2017).

As regards to nuclear energy, although the US department of energy (US Department of Energy, 1995) raised this energy source in the conceptualization of GH₂, in our results it only appears in the keyword maps for SH₂ (Fig. 6) and RH₂ (Fig. 4). In any case, the appearances on the RH₂ map refer to the context where RES and nuclear energy are integrated to produce H₂. (Orhan et al. 2012; Orhan and Babu 2015; Agyekum et al. 2021; Temiz and Dincer 2021). Although nuclear energy cannot be included in the RES and green energy framework, it is called "clean energy"⁵ because no GHGs are emitted during the process of generating electricity from this source (Velasquez et al. 2021; Elshenawy et al. 2021; Brown 2022; Hassan et al. 2022). This, together with its efficiency levels, has led several authors to consider it as a sustainable option for the production of H₂ (Dincer and Balta 2011; Dincer and Zamfirescu 2012; Zhiznin et al. 2020; Velasquez et al. 2021). There are a wide range of scientific papers on H₂ production using nuclear energy, and it seems that plans for H₂ production stimulate the development of the symbiosis of nuclear energy and RES (Zhiznin et al. 2020). In any case it should not be forgotten that this energy source is enormously controversial due to its drawbacks in terms of perceived safety (Prati and Zani 2012; Perko et al. 2018; Deng et al. 2018), waste treatment (Ewing et al. 2016; Yano et al. 2018), and geopolitics (international political conflicts and lack of massification towards underdeveloped countries⁶) (International Energy Agency (2021); Hickey et al. 2021). These elements may somewhat contradict certain sustainability criteria under the Sustainable Development Goals (SDGs) and the Paris Agreement (UNFCCC 2015; United Nations 2015). It is important to note that among the strategies reviewed, no nation was identified as considering nuclear energy for GH₂ production.

⁵ Without considering the mining processes.

⁶ There are currently more than 400 reactors of this type in 30 nations, generating approximately 11% of the world's electricity (International Atomic Energy Agency).

Table 3 Proposed criteria for the use of the terms GH₂, SH₂ and RH₂. *Source:* Own elaboration, 2022

Concept	Energy Type	NEA	CO ₂ emissions*	Other emissions*	Community relations
GH ₂	RES	e.g. EROI pou: no risk;< 10–15: 1 or low risk < 5–10: 1	Low emissions	Emissions-free	Well valued by the community
SH ₂	RES alone or combined with other fuels	e.g. EROI pou: no risk;< 10–15: 1 or low risk < 5–10: 1	Reduction of emissions compared to state of the art	Reduction of emissions compared to other sources	Improved community acceptance
RH ₂	RES	Any value	Any value	May emit, e.g. particles, ashes, odors, etc	Sometimes they can generate conflicts within the community (e.g. big scale projects; biomass from wast...)

*Those emissions produced in the manufacturing process of renewable energy systems and equipment have not been considered

According to the cited SDGs, sustainable development can be summarized as development that meets current needs without compromising future capabilities (United Nations 2015). The SDG 7 goal include access to energy, the incorporation of RES and improvement of energy efficiency, among others. This has given rise to three narrative imperatives that sustainable development must meet: satisfying human needs, guaranteeing social justice, and adhering to permissible environmental values (Holden et al. 2021). Among the indicators for defining sustainability, despite no single acceptance of such, in general they point to economic, technical, environmental, social and political factors (Maimoulin et al. 2021; Gunnarsdottir et al. 2021; Saraswat and Digalwar 2021). Therefore, we believe that the use of the term "SH₂" is correct when referring to improvements in economic, technical, environmental, social, and political factors that occur in H₂ related processes, as long as the improvement in one factor is not to the detriment of other factors.

National global strategies show clear signals on the use of energy sources and the technology to be employed in global GH₂ strategies (see Table 2). Electrolysis is the main conversion technology, as evidenced by the fact that future capacities are projected in electrolyzer capacity (in GW). On the RES side, countries with a clear focus on GH₂ production have clear targets for the use of solar and wind energy. Accordingly, the GH₂ concept could be defined as H₂ obtained from RES, using electrolysis, free of polluting emissions that guarantee an energy return that does not jeopardize its sustainability. In some cases (e.g. in Portugal and Spain), it is stated that H₂ could also be produced from biomass (i.e., through gasification processes, biochemical conversion, or biogas reforming), as long as sustainability requirements are met. Both countries also express their H₂ production targets in electrolyzer capacity (in GW) (Spain 2020; Presidência Do Conselho De Ministros 2020).

There are also other factors in the H₂ production chain that may jeopardize its sustainability. On one hand, there are

the losses in the electrolyzers. In this sense, review investigations that consider the performance of electrolyzers and the specific phenomena that occur in their components are very useful for present and future research (Falcão and Pinto 2020). On the other hand, it is essential to consider the scale of the envisaged projects, which directly conditions aspects such as H₂ storage and transport, also including local community acceptance. The following projects, which are reproducing traditional centralized energy models (i.e., large-scale projects), could be used as example: i) The "green crane" project, under public–private partnership. This project, headed by the Spanish Enagas and the Italian ESNAM gas transmission companies, under which umbrella the "green spider" project seeks to launch a €2,250 million investment plan to turn Spain into an H₂ exporting country to north Europe (Enagás 2022); or ii) The case of Chile, for example, where the areas of greatest wind and solar energy potential are located in the south (Magallanes Region) and north (Antofagasta Region) respectively (Chile 2020), while the largest population and business activity are located in the center of the country (Santiago de Chile), i.e., at a distance of more than 500 km.

In general, we consider the timely monitoring of research indexed under the terms electrolyzers, H₂ storage, H₂ distribution and transport, and especially the EROI_{pou} for H₂, to be essential. As stated by Zamani et al. 2022, surveillance of emerging issues is fundamental to the work of researchers, practitioners, and policy makers. At the same time, the need to provide more organized information in order to facilitate the transfer of knowledge to decision-makers in technological fields is indispensable (Garechana et al. 2022). It is also important to bear in mind that this knowledge is a key input for tracing technological trajectories, determining when a technology has matured, identifying existing knowledge gaps in these areas, and learning about new emerging knowledge (Alvarez-Meaza et al. 2020; Zamani et al. 2022).

From a technical–economic, environmental, and social perspective, we believe it is important to make a proposal

that facilitates the appropriate use of the terms GH₂, SH₂ and RH₂. To this end, we propose five criteria: the type of energy, estimated EROI values, CO₂ emissions, other types of emissions, and the community's perception of the type of project. These were categorized in correspondence with the insights gained during this research (see Table 3). Failure to meet at least one of the criteria is sufficient not to reach the green category, therefore, it would fall between the sustainable or renewable category. Note that the renewable category is the least restrictive; its only condition is to use RES. Sustainable, on the other hand, necessarily implies that improvements will occur, at least in relative terms.

As the ultimate expression of technological progress, GH₂ should represent the cleanest form in terms of emissions. Therefore, it is not enough to use RES to classify a production method as green; it is also essential to evaluate the type of energy, the GHG emissions of the production process, the production technologies used (Dawood et al. 2020; Velazquez and Dodds 2020) and the carbon footprint of the supply chain, as well as including a NEA based on indicators such as EROI or EPBT.

Conclusions

The great expectations created around H₂ use as an energy vector focus the attention of the scientific community. This is demonstrated by the exponential growth in the number of publications on the subject. Researchers play an essential role in providing the community with knowledge of high scientific value, becoming fundamental referents in the most complex challenges facing humanity. The literature produced becomes the basis for projects of the greatest technological complexity, as well as for the formulation of new policies. For this reason, it is of utmost importance to be careful about the indexing and use of terms that can be transferred to society. In the case of the use of the indexing terms "GH₂, RH₂ and SH₂" as synonyms, this could lead to the acceptance of technologies that do not meet the standards to be classified within each term.

The most relevant authors as regards the H₂-related production, distribution and technologies belong to developed countries, which are also the ones that provide the majority of funding for this type of research. Connecting with these researchers may help foster innovation in solutions that address local priority challenges and accelerate the implementation and transfer of these technologies, responding to the commitment made by Paris Agreement signatory countries and also in line with SDG 7 (United Nations 2015), which propose increasing international collaboration to enable access to clean energy research and technology. In this sense, more developed countries should favor the financing of those research projects on GH₂ production that include

the participation of organizations and researchers based in these less developed countries that have a high potential for RES generation due to their natural conditions.

The term "ecological H₂" has been used very rarely and, according to its trend, it is not expected to gain relevance in the coming years. The term clean H₂ shows a discrete record, however its relevance may be favored by the development of blue hydrogen and H₂ produced from nuclear energy. As regards the term RH₂, it has a broader scope than GH₂ and may include studies on biomass or other RES for H₂ production methods that are not totally clean or efficient, with low EROI values. Unlike in the RH₂ map, in the GH₂ map there is little use of the terms linked to certain RES such as solar and wind, while the terms "biomass" and "biofuels" are much more prominent. Research on GH₂ is growing exponentially, however, its growth rate is lower than for SH₂ and RH₂. This is partly because there has been no standardization in the use of these terms. Since there is no delimitation or understanding of the terms sustainable, renewable and green, articles can be framed in any of them, under the assumption that they are synonyms.

Production, distribution, and consumption of GH₂ is a highly complex, diverse subject given the great variety of technologies and the specific characteristics of each RES according to the conditions of each country. In this sense, it is important to promote studies that analyze H₂ efficiency levels, as well as to disseminate studies of implemented cases associated with different international experiences that help to generate maturity and investor confidence in order to accelerate massification in the production of this energy carrier, also achieving the incorporation of medium and small actors in the implementation of national policies. Therefore, it is fundamental to promote the correct identification of keyword indexing terms among scientific editors and authors.

As the ultimate expression of technological progress, GH₂ should be a reference for technologies that meet the acceptance criteria by the scientific community, the highest standards in terms of emissions and efficiency. In addition to the use of RES to classify it as GH₂, it is essential to evaluate the type of RES, the production technologies as well as the carbon footprint of the supply chain, also including a NEA based on EROI, EBPT, or other related indicators. In turn, it is important to influence the vision of policy makers to confer a special status to GH₂. Therefore, the new policies formulated would aim for H₂ production models to apply for the "green" distinction, to be favored by the incorporation of incentives, possibly fiscal or commercial (tariff reduction), among others. Nonetheless, one should not be absolute when defining the type of technologies used due to the rapid development and production of new techniques. At present electrolysis and/or photoelectrolysis are the ones being used in national H₂ strategies, to the point that they project their

objectives referring to the installed capacity of electrolyzers (in GW). Although several authors describe certain types of biomass as very promising, we consider that any strategy for GH₂ production based on these RES should pay special attention to the efficiency levels achieved in the different processes and how to control or mitigate the resulting waste and pollutant emissions.

Main national policy strategies have included the H₂ as the most promising energy carrier towards the energy transition path. In any case, the relevance of big scale projects should also be underlined. In this regard, indicators such as EROI_{pou} may become fundamental to classify projects as RH₂ or GH₂, as well as to guide different national strategies towards a low carbon transition. Despite the fundamental progress made in estimating the EROI of different technologies (e.g., as regards the use of Integrated Assessment Models (IAMs) that allow the EROI to be estimated endogenously and dynamically), the fact that the different meta-analyses do not differentiate between different EROI metrics (e.g. EROI_{pou}; EROI_{ext}...) is a clear sign of the necessity to establish clear boundaries and improve the methodological aspects as regards this indicator. Moreover, the present study also reveals that despite EROI being now well-established within the scientific community for evaluating different energy projects, it is at very incipient stage when it comes to evaluate projects related to H₂, especially GH₂. In any case, as Carbajales-Dale states, we consider that the moment has come for policy makers to make greater use of this fundamental tool in determining their overall long-term energy strategies towards energy transition (Carbajales-Dale et al. 2014). In this sense, EROI is a complex metric that, together with other indicators (e.g., LCA), may be fundamental in order to distinguish boundaries between GH₂, RH₂ and SH₂.

This work shows the main challenges from the point of view of indexation in relation to the types of energy used for the production of GH₂. However, other aspects such as the energy loss in electrolyzers, storage, scale of the projects, transport, different technologies and RES used for its production, also including different forms of H₂ consumption and the aspects related to community acceptance, should be studied further. Furthermore, future research should focus on the analysis of EROI boundaries and its different modalities (i.e., EROI_{pou}, EROI_{ext}...), which are useful tools to evaluate the efficiency of each of the stages of the H₂ chain. We should also address the use of biomasses as an energy source for the production of RH₂, remarkable for the wide variety of existing materials and technologies for its exploitation. Accordingly, the application of bibliometric tools combined with sustainability indicators can be very useful for providing synthesized information to environmental policy makers and stakeholders in general.

Acknowledgements I would like to thank the University of the Basque Country (UPV/EHU) for providing funding for open access to this project. Also, for the help received during the stay that allowed me to develop this project.

Author contribution All authors contributed to the conception and design of the study. Material preparation, data collection and analysis, and manuscript writing were performed by Willmer Guevara, Itziar Martínez, and Rosa María Río-Belver. All authors read and approved the final manuscript.

Funding Open Access funding provided thanks to the CRUE-CSIC agreement with Springer Nature. Willmer Guevara received a grant to facilitate the stay at the UPV/EHU of trainee researchers from Latin American countries enrolled in doctoral studies at the UPV/EHU (2021), to develop this project.

Availability of data and materials The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author.

Declarations

Ethics approval and consent to participate Not applicable.

Consent for publication Not applicable.

Conflict of interest Authors confirm that there are no conflicts of interest with this publication.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Abdelhamid HN (2021) A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride. *Int J Hydrogen Energy* 46:726–765. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.186>
- Abuşoğlu A, Özahi E, Kutlar AI, Demir S (2017) Exergy analyses of green hydrogen production methods from biogas-based electricity and sewage sludge. *Int J Hydrogen Energy* 42:10986–10996. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.144>
- Agyekum EB, Kumar NM, Mahmood U et al (2021) Decarbonize Russia: a best-worst method approach for assessing the renewable energy potentials, opportunities and challenges. *Energy Rep* 7:4498–4515. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.039>
- Akroum-Amrouche D, Akroum H, Lounici H (2019) Green hydrogen production by *Rhodospira rubra*. *Energy Sources Part A Recover Util Environ Eff*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1666190>
- Alvarez-Meaza I, Zarrabeitia-Bilbao E, Río-Belver RM, Garechana-Anacabe G (2020) Fuel-cell electric vehicles: Plotting a scientific

- and technological knowledge map. *Sustain* 12:1–25. <https://doi.org/10.3390/su12062334>
- Armijo J, Philibert C (2020) Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *Int J Hydrogen Energy* 45:1541–1558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.028>
- Arvesen A, Hertwich EG (2015) More caution is needed when using life cycle assessment to determine energy return on investment (EROI). *Energy Policy* 76:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.025>
- Atlason RS, Unnthorsson R (2013) Hot water production improves the energy return on investment of geothermal power plants. *Energy* 51:273–280. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.003>
- Bamati N, Raoofi A (2019) Development level and the impact of technological factor on renewable energy production. *Renew Energy* 151:946–955. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.098>
- Bhandari KP, Collier JM, Ellingson RJ, Apul DS (2015) Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: a systematic review and meta-analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 47:133–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.057>
- Bilgen E (1978) Solar hydrogen production at high temperature. *Sol Energy Convers.* <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-024744-1.50047-4>
- Brey JJ (2021) Use of hydrogen as a seasonal energy storage system to manage renewable power deployment in Spain by 2030. *Int J Hydrogen Energy* 46:17447–17457. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.089>
- Brown NR (2022) Engineering demonstration reactors: a stepping stone on the path to deployment of advanced nuclear energy in the United States. *Energy* 238:121750. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121750>
- Capellán-Pérez I, de Castro C, González LJM (2019) Dynamic energy return on energy investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Rev* 26:1–26. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
- Carbajales-Dale M, Barnhart C, Brandt A, Benson S (2014) Commentary: a better currency for investing in a sustainable future. *Nat Clim Chang* 4:524–527. <https://doi.org/10.1038/nclimate2285>
- Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D (2013) A comprehensive review on PEM water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy* 38:4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Çelik D, Yıldız M (2017) Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles. *Int J Hydrogen Energy* 42:23395–23401. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.104>
- Chanchetti LF, Leiva DR, Lopes de Faria LI, Ishikawa TT (2019) A scientometric review of research in hydrogen storage materials. *Int J Hydrogen Energy* 45:5356–5366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.093>
- Chaube A, Chapman A, Shigetomi Y et al (2020) The role of hydrogen in achieving long term Japanese energy system goals. *Energies* 13:1–17. <https://doi.org/10.3390/en13174539>
- Chen YH, Chen CY, Lee SC (2011) Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies. *Int J Hydrogen Energy* 36:6957–6969. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.063>
- Chien FS, Kamran HW, Albashar G, Iqbal W (2021) Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: a sustainable solution for severe energy crises in emerging economies. *Int J Hydrogen Energy* 46:7745–7758. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.004>
- Chile ME (2020) National green hydrogen strategy Chile, a clean energy provider for a carbon neutral planet. Ministry of energy, Government of Chile, Santiago de Chile
- Cholewa M, Dürschnabel R, Boukis N, Pfeifer P (2018) High pressure membrane separator for hydrogen purification of gas from hydrothermal treatment of biomass. *Int J Hydrogen Energy* 43:13294–13304. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.031>
- Clark WW, Rifkin J (2006) A green hydrogen economy. *Energy Policy* 34:2630–2639. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.024>
- Connelly E, Penev M, Milbrandt A et al (2020) Resource assessment for hydrogen production. National Renewable Energy Laboratory NREL, Golden, CO
- D'Amato D, Droste N, Allen B et al (2017) Green, circular, bio economy: a comparative analysis of sustainability avenues. *J Clean Prod* 168:716–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- Dawood F, Anda M, Shaifullah GM (2020) Hydrogen production for energy: an overview. *Int J Hydrogen Energy* 45:3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- De Castro C, Capellán-Pérez I (2020) Standard, point of use, and extended energy return on energy invested (EROI) from comprehensive material requirements of present global wind, solar, and hydro power technologies. *Energies* 13:1–42. <https://doi.org/10.3390/en13123036>
- De Bias I, Miguel LJ, Capellán-Pérez I (2019) Modelling of sectoral energy demand through energy intensities in MEDEAS integrated assessment model. *Energy Strategy Rev* 26:1–22. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100419>
- Deng Y, Zou S, You D (2018) Theoretical guidance on evacuation decisions after a big nuclear accident under the assumption that evacuation is desirable. *Sustain* 10:1–14. <https://doi.org/10.3390/SU10093095>
- Di Marcoberardino G, Vitali D, Spinelli F et al (2018) Green hydrogen production from raw biogas: a techno-economic investigation of conventional processes using pressure swing adsorption unit. *Processes* 6:1–23. <https://doi.org/10.3390/pr6030019>
- Diessendorf M, Wiedmann T (2020) Implications of trends in energy return on energy invested (EROI) for transitioning to renewable electricity. *Ecol Econ* 176:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106726>
- Dincer I, Balta MT (2011) Potential thermochemical and hybrid cycles for nuclear-based hydrogen production. *Int J Energy Res* 35:123–137. <https://doi.org/10.1002/ER.1769>
- Dincer I, Zamfirescu C (2012) Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE. *Int J Hydrogen Energy* 37:16266–16286. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.133>
- Eitshenawy LM, Halawa MA, Mahmoud TA et al (2021) Unsupervised machine learning techniques for fault detection and diagnosis in nuclear power plants. *Prog Nucl Energy* 142:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103990>
- Enagás, SNAM Green Crane (2022) GreenHyStand. <https://greenhystand.eu/h2hub/green-crane/>. Accessed 27 Jun 2022
- Energy Council Hydrogen Working Group C (2019) AUSTRALIA'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY. 1–94
- ESMAP (2020) Global photovoltaic power potential by country. World Bank, Washington, DC
- EUROPEAN COMMISSION (2020) COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Brussels
- Ewing RC, Whittleston RA, Yardley BWD (2016) Geological disposal of nuclear waste: a primer. *Elements* 12:233–237. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.12.4.233>
- Fabre A (2019) Evolution of EROIs of electricity until 2050: Estimation and implications on prices. *Ecol Econ* 164:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.06.006>
- Falcão DS, Pinto AMFR (2020) A review on PEM electrolyzer modeling: guidelines for beginners. *J Clean Prod* 261:121184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121184>

- Fizaine F, Court V (2016) Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy* 95:172–186. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.039>
- Garechana G, Río R, Cilleruelo E, Gavilanes J (2012) Visualizing the scientific landscape using maps of science. *Industrial engineering: innovative networks*. Springer, London, pp 103–112
- Garechana G, Río-Belver R, Zarrabeitia E, Alvarez-Meaza I (2022) TeknoAssistant : a domain specific tech mining approach for technical problem-solving support. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.1007/S11192-022-04280-2/FIGURES/6>
- Garrido S, Santos M, Rodríguez J (2019) Supply chain of renewable energy: a bibliometric review approach. *Biomass Bioenerg* 126:70–83. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.022>
- Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ (2017) The circular economy a new sustainability paradigm?. *J Clean Prod* 143:757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gemechu ED, Kumar A (2021) The environmental performance of hydrogen production pathways based on renewable sources. In: *Renewable-energy-driven future*. Academic Press, pp 375–406
- German Federal Government (2020) *The National Hydrogen Strategy*. Berlin
- Gonzalez-Diaz A, Ladrón S, de Guevara JC, Jiang L et al (2021) Techno-environmental analysis of the use of green hydrogen for cogeneration from the gasification of wood and fuel cell. *Sustain* 13:1–14. <https://doi.org/10.3390/su13063232>
- HM Government (2021) *UK hydrogen strategy*. 1–116
- Government of Netherlands (2020) *Government Strategy on Hydrogen*. <https://www.government.nl/documents/publications/2020/04/06/government-strategy-on-hydrogen>. Accessed 22 Sep 2021
- Government of the Russian Federation (2020) Decree No. 2634-R of October 12, 2020 (in Russian)
- Guan G, Jiang Z, Gong Y et al (2021) A bibliometric review of two decades' research on closed-loop supply chain: 2001–2020. *IEEE Access* 9:3679–3695. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047434>
- Gunnarsdottir I, Davidsdottir B, Worrell E, Sigurgeirsdottir S (2021) Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes. *Renew Sustain Energy Rev* 141:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110770>
- Hall CAS, Lambert JG, Balogh SB (2014) EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy* 64:141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hannan MA, Lipu MSH, Hussain A, Mohamed A (2017) A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: challenges and recommendations. *Renew Sustain Energy Rev* 78:834–854. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001>
- Hassan ST, Khan D, Zhu B, Batool B (2022) Is public service transportation increase environmental contamination in China? The role of nuclear energy consumption and technological change. *Energy* 238:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121890>
- Herez A, El Hage H, Lemmenand T et al (2020) Parabolic trough photovoltaic/thermal hybrid system: thermal modeling and parametric analysis. *Renew Energy* 165:224–236. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.009>
- Hickey SM, Malkawi S, Khalil A (2021) Nuclear power in the Middle East: financing and geopolitics in the state nuclear power programs of Turkey, Egypt, Jordan and the United Arab Emirates. *Energy Res Soc Sci* 74:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ERSS.2021.101961>
- Holden E, Linnerud K, Rygg BJ (2021) A review of dominant sustainable energy narratives. *Renew Sustain Energy Rev* 144:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110955>
- Hosseini SE, Wahid MA (2016) Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renew Sustain Energy Rev* 57:850–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- Hsu CW, Lin CY (2016) Using social network analysis to examine the technological evolution of fermentative hydrogen production from biomass. *Int J Hydrogen Energy* 41:21573–21582. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.157>
- Huang Y-S, Liu S-J (2020) Chinese green hydrogen production potential development: a provincial case study. *IEEE Access* 8:171968–171976. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3024540>
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2021) *Nuclear power reactors, reactor types and technologies*. <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-reactors>. Accessed 21 Nov 2021
- International Energy Agency (IEA) (2021) *Global Hydrogen Review 2021*
- IRENA (2020a) *Green hydrogen: a guide to policy making*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- IRENA (2020b) *Renewable capacity statistics 2020b*. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi
- Jackson A, Jackson T (2021) Modelling energy transition risk: the impact of declining energy return on investment (EROI). *Ecol Econ* 185:107023. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107023>
- Japan MC on RE (2017) *Basic hydrogen strategy*. 1–34
- Jensen SH, Larsen PH, Mogensén M (2007) Hydrogen and synthetic fuel production from renewable energy sources. *Int J Hydrogen Energy* 32:3253–3257. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.042>
- Jiménez-Castro MP, Buller LS, Sganzerla WG, Forster-Carneiro T (2020) Bioenergy production from orange industrial waste: a case study. *Biofuels Bioprod Biorefining* 14:1239–1253. <https://doi.org/10.1002/bbb.2128>
- Kakoulaki G, Kougias I, Taylor N et al (2021) Green hydrogen in Europe: a regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Convers Manag* 228:1–19. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>
- Kazi MK, Eljack F, El-Halwagi MM, Haouari M (2021) Green hydrogen for industrial sector decarbonization: Costs and impacts on hydrogen economy in qatar. *Comput Chem Eng* 145:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107144>
- Ketzer F, Skarka J, Rösch C (2018) Critical review of microalgae LCA Studies for bioenergy production. *BioEnergy Res* 11:95–105. <https://doi.org/10.1007/S12155-017-9880-1>
- Kim SE, Jeong SK, Park KT et al (2021) Effect of oxygen-containing functional groups in metal-free carbon catalysts on the decomposition of methane. *Catal Commun* 148:1–5. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2020.106167>
- Knoch PH (1989) Energy without pollution: Solar-wind-hydrogen systems: some consequences on urban and regional structure and planning. *Int J Hydrogen Energy* 14:903–906. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(89\)90078-5](https://doi.org/10.1016/0360-3199(89)90078-5)
- Kodama T, Moriyama T, Shimoyama T et al (2006) Ru/Ni-Mg-O-Catalyzed S_C-Foam absorber for solar reforming receiver-reactor. *J Sol Energy Eng* 128:318–325. <https://doi.org/10.1115/1.2210497>
- Laguna-Bercero MA (2012) Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: a review. *J Power Sources* 203:4–16. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.019>
- Leu HJ, Wu CC, Lin CY (2012) Technology exploration and forecasting of biofuels and biohydrogen energy from patent analysis. *Int J Hydrogen Energy* 37:15719–15725. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.143>
- Liu W, Sun L, Li Z et al (2020) Trends and future challenges in hydrogen production and storage research. *Environ Sci Pollut Res* 27:31092–31104. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09470-0>
- Mai-Moulin T, Hoefnagels R, Grundmann P, Junginger M (2021) Effective sustainability criteria for bioenergy: towards the

- implementation of the european renewable directive II. *Renew Sustain Energy Rev* 138:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110645>
- MEDEAS (2017) MEDEAS. Modelling the renewable energy transition in Europe. D4.1 (D13) Global Model: MEDEAS-World Model and IOA implementation at global geographical level. Version 3.0.0. Barcelona
- Ming-Yueh T (2008) A bibliometric analysis of hydrogen energy literature, 1965–2005. *Scientometrics* 75:421–438. <https://doi.org/10.1007/s11192-007-1785-x>
- Minutillo M, Perna A, Sorce A (2020) Green hydrogen production plants via biogas steam and autothermal reforming processes: energy and exergy analyses. *Appl Energy* 277:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115452>
- Mohideen MM, Ramakrishna S, Prabu S, Liu Y (2021) Advancing green energy solution with the impetus of COVID-19 pandemic. *J Energy Chem* 59:688–705. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.12.005>
- Möller S, Kaucic D, Sattler C (2006) Hydrogen production by solar reforming of natural gas: a comparison study of two possible process configurations. *J Sol Energy Eng* 128:16–23. <https://doi.org/10.1115/1.2164447>
- Moogi S, Nakka L, Potharaju SSP et al (2021) Copper promoted Co/MgO: a stable and efficient catalyst for glycerol steam reforming. *Int J Hydrogen Energy* 46:18073–18084. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.190>
- Nabgan W, Tuan Abdullah TA, Mat R et al (2017) Renewable hydrogen production from bio-oil derivative via catalytic steam reforming: an overview. *Renew Sustain Energy Rev* 79:347–357. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.069>
- Natural Resources Canada (2020) Hydrogen strategy for Canada: seizing the opportunities for hydrogen : a call to action. 1–115
- Newborough M, Cooley G (2020) Developments in the global hydrogen market: the spectrum of hydrogen colours. *Fuel Cells Bull* 2020:16–22. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0)
- Ni M, Leung MKH, Leung DYC, Sumathy K (2007) A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using TiO₂ for hydrogen production. *Renew Sustain Energy Rev* 11:401–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.009>
- Nikolaïdis P, Poullikkas A (2017) A comparative overview of hydrogen production processes. *Renew Sustain Energy Rev* 67:597–611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- Niu Y, Tan H, Hui S (2016) Ash-related issues during biomass combustion: alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. *Prog Energy Combust Sci* 52:1–61
- Norwegian Government's (2020) The Norwegian Government's hydrogen strategy
- Noussan M, Raimondi PP, Scita R, Hafner M (2021) The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective. *Sustain* 13:1–26. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
- Orhan MF, Babu BS (2015) Investigation of an integrated hydrogen production system based on nuclear and renewable energy sources: comparative evaluation of hydrogen production options with a regenerative fuel cell system. *Energy* 88:801–820. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.009>
- Orhan MF, Dincer I, Rosen MA, Kanoglu M (2012) Integrated hydrogen production options based on renewable and nuclear energy sources. *Renew Sustain Energy Rev* 16:6059–6082. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.008>
- Osman AI, Deka TJ, Baruah DC, Rooney DW (2020a) Critical challenges in biohydrogen production processes from the organic feedstocks. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00965-x>
- Osman AI, Hefny M, Abdel Maksoud MIA et al (2020b) Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. *Environ Chem Lett* 19:797–849. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01133-3>
- Perko T, Prezelj I, Cantone MC et al (2018) Fukushima through the prism of Chernobyl: how newspapers in Europe and Russia used past nuclear accidents. *Environ Commun* 13:527–545. <https://doi.org/10.1080/17524032.2018.1444661>
- Pompil B, Le Maire B (2020) National strategy for the development of low carbon hydrogen in France (In France). 1–17
- Prananta W, Kubiszewski I (2021) Assessment of indonesia's future renewable energy plan: a meta-analysis of biofuel energy return on investment (EROI). *Energies* 14:1–15. <https://doi.org/10.3390/EN14102803>
- Prati G, Zani B (2012) The effect of the Fukushima nuclear accident on risk perception, antinuclear behavioral intentions, attitude, trust, environmental beliefs, and values. *Environ Behav* 45:782–798. <https://doi.org/10.1177/0013916512444286>
- PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS (2020) Council of Ministers Resolution no. 63/2020 National Hydrogen Plan (In Portuguese), Diário da República, 1.ª série
- Preuster P, Albert J (2018) Biogenic formic acid as a green hydrogen carrier. *Energy Technol* 6:501–509. <https://doi.org/10.1002/ente.201700572>
- Rabiee A, Keane A, Soroudi A (2021) Technical barriers for harnessing the green hydrogen: a power system perspective. *Renew Energy* 163:1580–1587. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.051>
- Raugei M (2019) Net energy analysis must not compare apples and oranges. *Nat Energy* 4:86–88. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0327-0>
- REN21 (2021) Renewables 2021 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). Paris
- Samsó R, de Blas I, Perissi I et al (2020) Scenario analysis and sensitivity exploration of the MEDEAS Europe energy-economy-environment model. *Energy Strategy Rev* 32:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100582>
- Saraswat SK, Digalwar AK (2021) Empirical investigation and validation of sustainability indicators for the assessment of energy sources in India. *Renew Sustain Energy Rev* 145:1–24. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111156>
- Sharifi A (2021) Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis. *Ecol Indic* 121:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107102>
- South Korean, Ministry of Trade I and E (2019) Hydrogen economy: Roadmap of Korea. 1–16
- Spain M for ET and the DC (MITERD) (2020) Hydrogen roadmap. In: A commitment to renewable hydrogen (In Spain). Madrid
- Stangarone T (2020) South Korean efforts to transition to a hydrogen economy. *Clean Technol Environ Policy* 23:509–516
- Temiz M, Dincer I (2021) Development of an HTR-Type nuclear and bifacial PV solar based integrated system to meet the needs of energy, food and fuel for sustainable indigenous cities. *Sustain Cities Soc* 74:1–16
- Turner JA (2004) Sustainable hydrogen production. *Science* 305:972–974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
- UNFCCC (2015) ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT : Paris Agreement text English. Paris
- United Nations (2015) Sustainable development goals – 17 goals to transform our world. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. Accessed 28 Mar 2021
- US Department of Energy (1995) The Green Hydrogen Report. 1995 Prog Rep Secr Energy's Hydrog Tech Advis Panel
- Van Eck NJ, Waltman L (2010) Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* 84:523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

- Van Eck NJ, Waltman L (2020) VOSviewer Manual. Univ. Leiden, CWTS Meaningful metrics.
- Velasquez CE, Estanislau FBGL, Costa AL et al (2021) Scenarios of nuclear energy for countries with different options of nuclear fuel cycle: Utilization and perspective. *Prog Nucl Energy* 136:1–14
- Velazquez A, Dodds PE (2020) Green hydrogen characterisation initiatives: definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy* 138:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>
- Walmsley TG, Walmsley MRW, Atkins MJ (2017) Energy Return on energy and carbon investment of wind energy farms: a case study of New Zealand. *J Clean Prod* 167:885–895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.040>
- Walmsley TG, Walmsley MRW, Varbanov PS, Klemeš JJ (2018) Energy ratio analysis and accounting for renewable and non-renewable electricity generation: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 98:328–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.034>
- Wang C, Zhang L, Chang Y, Pang M (2021) Energy return on investment (EROI) of biomass conversion systems in China: Meta-analysis focused on system boundary unification. *Renew Sustain Energy Rev* 137:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110652>
- White E, Kramer GJ (2019) The Changing Meaning of Energy Return on Investment and the Implications for the prospects of Post-fossil Civilization. *One Earth* 1:416–422. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.010>
- World Health Organization (2005) WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Geneva
- Wu Z, He Q, Yang K et al (2021) Investigating the dynamics of china's green building policy development from 1986 to 2019. *Int J Environ Res Public Health* 18:1–19. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010196>
- Yano KH, Mao KS, Wharry JP, Portierfield DM (2018) Investing in a permanent and sustainable nuclear waste disposal solution. *Prog Nucl Energy* 108:474–479. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.07.003>
- Yu M, Wang K, Vredenburg H (2021) Insights into low-carbon hydrogen production methods: green, blue and aqua hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 46:21261–21273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>
- Zamani M, Yalcin H, Naeini AB et al (2022) Developing metrics for emerging technologies: identification and assessment. *Technol Forecast Soc Change* 176:121456. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121456>
- Zhao N, Liang D, Meng S, Li X (2020) Bibliometric and content analysis on emerging technologies of hydrogen production using microbial electrolysis cells. *Int J Hydrogen Energy* 45:33310–33324
- Zhao H, Lu D, Wang J et al (2021) Raw biomass electroreforming coupled to green hydrogen generation. *Nat Commun* 12:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22250-9>
- Zheng B, Sun P, Liu Y et al (2020a) Effects of particle sizes on performances of the horizontally buried-pipe steam generator using waste heat in a bioethanol steam reforming hydrogen production system. *Int J Hydrogen Energy* 45:20216–20222. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.244>
- Zheng B, Sun P, Meng J et al (2020b) Effects of fin structure size on methane-steam reforming for hydrogen production in a reactor heated by waste heat. *Int J Hydrogen Energy* 45:20465–20471. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.143>
- Zheng B, Shen Y, Sun P et al (2021) Effects of particle sizes on performances of the multi-zone steam generator using waste heat in a bio-oil steam reforming hydrogen production system. *Int J Hydrogen Energy* 46:18064–18072. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.269>
- Zhiznin SZ, Timokhov VM, Gusev AL (2020) Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *Int J Hydrogen Energy* 45:31353–31366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.