

**Análisis de ciclo de vida comparativo entre los diferentes métodos de producción de hidrógeno: Implicaciones para la sostenibilidad energética.**

Nicolas Niño Florez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Jimena Lizeth Gómez Delgado

Ingeniera de Petróleos

Ph.D. Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de petróleo

Bucaramanga

2025

**Dedicatoria**

*Dedico este logro a mi querida madre, Marlene, por darme la vida, por sus enseñanzas, los principios que me han guiado, por brindarme el estudio y por sacarme adelante con todos sus esfuerzos.*

*Con todo mi amor a mi hijo, que se ha convertido en mi mayor motor, la luz de mis ojos y la razón de mis esfuerzos.*

*Y a mí hermosa esposa Laura, cuyo amor y apoyo incondicional me han sostenido en cada momento de este camino.*

**Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa.

Extiendo mi sincera gratitud a mis profesores, quienes me guiaron con sus conocimientos y enseñanzas a lo largo de mi formación. De manera especial, a la Ph.D. Olga Patricia Ortiz Cancino, por su cariño, orientación y apoyo constante, así como a mi directora de tesis, Ph.D. Jimena Lizeth Gomez Delgado, cuya guía fue fundamental para el desarrollo y culminación de este proyecto.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco teórico .....	17
2.1 Clasificación del hidrógeno .....	18
2.1.1 Hidrógeno no renovable.....	18
2.1.2 Hidrógeno sin emisiones.....	18
2.1.3 Hidrógeno experimental.....	18
2.1.4 Hidrógeno negro .....	19
2.1.5 Hidrógeno marrón .....	19
2.1.6 Hidrógeno amarillo .....	19
2.1.7 Hidrógeno gris .....	19
2.1.8 Hidrógeno azul.....	20
2.1.9 Hidrógeno turquesa.....	21
2.1.10 Hidrógeno rosa.....	21
2.1.11 Hidrógeno verde.....	21
2.1.12 Hidrógeno blanco.....	22
3. Métodos de producción.....	23
3.1 Hidrógeno a partir de fuentes renovables .....	24
3.1.1 Biomasa.....	24

3.1.1.1 Biofotólisis.....	24
3.1.1.2 Fermentación.....	24
3.1.1.3 Celdas de electrolisis microbiana.....	24
3.1.1.4 Ruta de W.L. ....	24
3.1.2 División del agua .....	25
3.1.2.1 Electrólisis.....	25
3.1.2.2 Termólisis .....	25
3.1.2.3 Foto-electrólisis.....	25
3.2 Hidrógeno a partir de fuentes no renovables .....	26
3.2.1 Combustibles fósiles .....	26
3.2.1.1 Pirolysis de metano.....	26
3.2.1.2 Reformado de metano con vapor (SMR).....	26
3.2.1.3 Oxidación parcial (POX) .....	26
3.2.1.4 Reformado auto térmico de metano (ATR) .....	27
3.2.1.5 Gasificación .....	27
3.2.1.6 Reformado de metano con vapor de agua con sorbente (SES MR).....	27
3.2.1.7 Reformado de metano seco (DRM) .....	27
3.2.1.8 Reformado de metano con vapor oxidativo (OSR).....	27
3.2.1.9 Reformado de metano con vapor mediante ciclo químico (CLSMR) .....	28
3.2.1.10 Reformado fotocatalítico de metano con vapor (PSMR).....	28
4. Metodología .....	28
4.1 Diseño de la investigación .....	29
4.1.1 Revisión bibliográfica.....	29

4.1.2 Explicación de los métodos de producción.....	29
4.1.3 Análisis comparativo .....	29
4.1.4 Síntesis de resultados .....	29
4.2 Fuentes de información.....	29
5. Análisis ambiental y económico .....	30
5.1 Fuentes renovables.....	30
5.2 Fuentes no renovables.....	33
5.3 Tipos de hidrógeno por color .....	37
5.4 Sostenibilidad energética de la generación de hidrógeno .....	40
6. Discusión.....	41
6.1 Panorama global.....	41
6.2 Panorama en Colombia.....	48
6.2.1 Potencial de energías e incentivos políticos.....	49
6.2.1.1 Eólica. ....	49
6.2.1.2 Solar. ....	49
6.2.1.3 Hidroeléctrica.....	49
6.2.1.4 Hidrocarburos. ....	49
6.2.2 Competitividad de Colombia mediante el hidrógeno .....	50
6.2.2.1 Infraestructura y tecnología. ....	51
6.2.2.2 Regulación técnica y seguridad. ....	51
6.2.2.3 Costos iniciales. ....	51
6.2.3 Impacto de las rutas de hidrógeno en la descarbonización de hidrocarburos.....	51
6.2.3.1 Hidrógeno gris. ....	52

6.2.3.2 Hidrógeno azul.....	52
6.2.3.3 Hidrógeno verde.....	52
7. Conclusiones.....	54
8. Recomendaciones .....	56
Referencias Bibliográficas .....	57

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Costos aproximados e impactos ambientales de los diferentes métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables.</i> .....	31
Tabla 2 <i>Costos aproximados e impactos ambientales de los diferentes métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovables.</i> .....	34
Tabla 3 <i>Costos aproximados e impactos ambientales de los diferentes tipos de hidrógeno según su color.</i> .....	38
Tabla 4 <i>Capacidad de producción de hidrógeno por región</i> .....	43

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Clasificación del hidrógeno según su color</i> .....	22
Figura 2 <i>Relación entre costo promedio e impacto ambiental de los métodos de producción de hidrógeno renovable</i> .....	32
Figura 3 <i>Relación entre costo promedio e impacto ambiental de los métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovable</i> .....	36
Figura 4 <i>Emisiones según el color del hidrógeno</i> .....	39
Figura 5 <i>Costos según el color del hidrógeno</i> .....	40
Figura 6 <i>Distribución geográfica de la demanda de hidrógeno por porcentaje.</i> .....	42
Figura 7 <i>Distribución geográfica de la capacidad de producción de hidrógeno por región.</i> .....	44

## Glosario

**Análisis de Ciclo de Vida:** metodología sistemática utilizada para evaluar las diferentes rutas de producción de hidrógeno, tanto a partir de energías renovables como convencionales. Permite comprender y analizar las ventajas, limitaciones y el potencial de implementación de cada tecnología, integrando las dimensiones ambiental y económica.

**Descarbonización:** proceso global que busca reducir o eliminar las emisiones de dióxido de carbono de los sistemas energéticos e industriales, con el objetivo de mitigar el cambio climático.

**Vector Energético:** sustancia o medio que permite almacenar y transportar energía de un lugar a otro, para luego liberarla en el momento y lugar deseados para su uso.

**Sostenibilidad Energética:** principio que busca garantizar un suministro de energía seguro y accesible, al tiempo que se minimiza el impacto ambiental y se promueve la eficiencia y el uso de fuentes limpias. Es un objetivo central en la transición hacia una economía baja en carbono.

**Know-How:** conjunto de conocimientos especializados, habilidades prácticas, y experiencia técnica acumulada que una persona, un equipo o una organización posee para llevar a cabo un proceso o implementar una tecnología de manera eficiente y efectiva

**CONPES:** Consejo Nacional de Política Económica y Social.

**SAF:** combustible alternativo para aviones, producido a partir de fuentes renovables y residuos, que reduce las emisiones de carbono en comparación con los combustibles fósiles.

**e-SAF:** tipo de SAF sintético producido combinando hidrógeno verde (obtenido de electricidad renovable) con CO<sub>2</sub> capturado de la atmósfera o de procesos industriales, permitiendo una reducción drástica de la huella de carbono.

**CCS:** captura y almacenamiento de carbono.

**FID:** decisión final de inversión.

**GEI:** gases de efecto invernadero.

**IEA:** agencia internacional de la energía.

**Mt:** millones de toneladas.

**Mtce:** millones de toneladas de equivalente de carbón.

**CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub>:** dióxido de carbono equivalente por kilogramo de hidrógeno.

**USD/kg H<sub>2</sub>:** dólares estadounidenses por kilogramo de hidrógeno.

## Resumen

**Título:** Análisis de ciclo de vida comparativo entre los diferentes métodos de producción de hidrógeno: Implicaciones para la sostenibilidad energética.\*

**Autor:** Nicolas Niño Florez\*\*

**Palabras Clave:** Hidrógeno, sostenibilidad, producción

### Descripción:

Este trabajo de grado aborda el reto global del aumento en la demanda de energía y la necesidad de eliminar el carbono de los sistemas para combatir contra el cambio climático, considerando al hidrógeno como un elemento energético fundamental para una economía con bajo contenido de carbono. El propósito fundamental es llevar a cabo un análisis comparativo del ciclo de vida de los diversos procesos de producción de hidrógeno (proveniente de fuentes renovables y no renovables) y sus repercusiones para la sostenibilidad energética, considerando tanto las dimensiones económicas como las ambientales. La metodología utilizada fue una investigación cualitativa, descriptiva y comparativa, fundamentada en un análisis sistemático de la bibliografía científica, utilizando bases de datos como ScienceDirect y Google Scholar.

La tesis categoriza al hidrógeno según su color (verde, rosa, blanco, azul, turquesa, amarillo, gris, marrón y negro), lo que indica su origen y el grado de emisiones de  $CO_2$ . Los resultados más importantes muestran que, aunque la demanda mundial de hidrógeno está en aumento, la producción actual se basa mayormente en combustibles fósiles (hidrógeno gris y negro), los cuales son muy contaminantes pero competitivos desde el punto de vista económico. Por otro lado, los métodos de producción de hidrógeno limpio (verde, rosa o turquesa), a pesar de tener emisiones mucho más bajas, tienen costos más altos y una menor madurez tecnológica. Aunque la implementación efectiva aún es lenta, se destaca el aumento de las inversiones en proyectos de hidrógeno limpio. El estudio hace énfasis en la necesidad de superar las barreras económicas y tecnológicas para que el hidrógeno llegue a ser un elemento esencial en un futuro energético sustentable.

---

\* Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero de Petróleos

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Jimena Lizeth Gómez Delgado. Ph.D. Química.

### Abstract

**Title:** Comparative life cycle analysis of different hydrogen production methods: Implications for energy sustainability. \*

**Author(s):** Nicolas Niño Florez \*\*

**Key Words:** Hydrogen, sustainability, production

### Description:

This thesis addresses the global challenge of increasing energy demand and the need to eliminate carbon from systems to combat climate change, considering hydrogen as a fundamental energy element for a low-carbon economy. The fundamental purpose is to carry out a comparative analysis of the life cycle of the various hydrogen production processes (from renewable and non-renewable sources) and their repercussions for energy sustainability, considering both economic and environmental dimensions. The methodology used was qualitative, descriptive, and comparative research, based on a systematic analysis of the scientific literature, using databases such as ScienceDirect and Google Scholar.

The thesis categorizes hydrogen according to its color (green, pink, white, blue, turquoise, yellow, gray, brown, and black), which indicates its origin and the degree of CO<sub>2</sub> emissions. The most important results show that, although global demand for hydrogen is increasing, current production is mostly based on fossil fuels (gray and black hydrogen), which are highly polluting but economically competitive. On the other hand, clean hydrogen production methods (green, pink, or turquoise), despite having much lower emissions, have higher costs and less technological maturity. Although effective implementation is still slow, there has been a notable increase in investment in clean hydrogen projects. The study emphasizes the need to overcome economic and technological barriers so that hydrogen can become an essential element in a sustainable energy future.

---

\*Degree work to qualify for the title of Petroleum Engineer

\*\*Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Petroleum Engineering. Director: Jimena Lizeth Gómez Delgado. Ph.D. Chemistry.

## Introducción

Con una demanda energética mundial en crecimiento continuo, impulsada por el crecimiento demográfico, la urbanización y la industrialización, la comunidad internacional se enfrenta al reto de descarbonizar sus sistemas energéticos para combatir el cambio climático.

El presente trabajo realiza un análisis comparativo de los métodos de producción de hidrógeno, en este se analizó el ciclo de vida para la evaluación de las diferentes rutas productivas, incluyendo procesos de energías renovables y convencionales como combustibles fósiles, en la búsqueda de comprender y evaluar las diferentes tecnologías para la producción de hidrógeno, identificando sus ventajas, limitaciones y potencial de implementación. De esta manera, se contribuye a la comprensión de los retos y oportunidades asociados a este vector energético, clave para alcanzar los objetivos para una mejora climática y garantizar un futuro energético sostenible.

La dependencia histórica, desde la revolución industrial, de los combustibles fósiles ha permitido sostener la industrialización, la urbanización y el crecimiento demográfico, pero también ha provocado un aumento preocupante de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de un 1%, en 2024 teniendo un nivel récord de 40,8 Gigatoneladas de  $CO_2e$ , con un impacto directo en el deterioro del medio ambiente, donde la mayor cantidad de emisiones se generan en los países no pertenecientes a la organización para la cooperación y el desarrollo económicos. Desde la pandemia de COVID-19 las emisiones globales han aumentado un promedio de 2,3% anual (Energy Institute, 2025). En este punto, se ha identificado la búsqueda de alternativas energéticas que permitan conciliar la relación energía y ambiente, entre estas alternativas el hidrógeno se posiciona como vector energético limpio y versátil, con potencial para convertirse en uno de los pilares de la economía baja en carbono. Su alta densidad energética y su capacidad de generar

energía baja o sin emisiones de carbono lo convierten en una pieza fundamental para mejorar el sistema energético y promover la sostenibilidad, el beneficio neto de este depende de utilizar fuentes energéticas limpias para su producción. Para maximizar la sostenibilidad, es esencial integrar políticas y tecnologías que minimicen las emisiones en las fases del ciclo de vida del hidrógeno.

Este vector energético implica la producción a partir de los compuestos que lo contienen, como los son el agua y/o los hidrocarburos. Debido a esto el impacto ambiental y económico dependen directamente del método utilizado para ser producido y la fuente de energía que se emplea para que dicho proceso se lleve a cabo.

En resumen, la transición hacia sistemas energéticos sostenibles implica diversificar las fuentes y disminuir las emisiones. El hidrógeno es una alternativa en este proceso, siempre y cuando su producción se realice con energías limpias y se logre superar la actual diferencia de costes con respecto a las tecnologías convencionales.

El propósito fundamental de este trabajo de grado es realizar un análisis de ciclo de vida comparativo de los procesos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables y no renovables, integrando las dimensiones económica y ambiental. El estudio categoriza el hidrógeno por colores (verde, azul, gris, etc.) para indicar su origen y huella de carbono, con el objetivo de evaluar la sostenibilidad, las ventajas, limitaciones y el potencial de implementación de cada tecnología. Se identifican las rutas productivas con mayor potencial y su nivel de madurez, subrayando la necesidad de innovación para superar las barreras actuales. El análisis resalta el rol estratégico del hidrógeno como vector energético clave para la descarbonización global, destacando que su beneficio depende del uso de fuentes limpias en su producción para consolidar un futuro energético sostenible.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar un análisis sobre la sostenibilidad energética de la generación de hidrógeno, por medio de sus diferentes métodos de producción y ciclos de vida.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Identificar los diferentes métodos de producción de hidrógeno, su proceso y su producto obtenido, mediante una revisión sistemática de la literatura.

Detallar el impacto ambiental e implicación económica de cada uno de los métodos de producción de hidrógeno.

Discutir la viabilidad de continuar usando los diferentes métodos de generación de hidrogeno con base en su sostenibilidad energética.

## 2. Marco teórico

El hidrogeno es el elemento químico más abundante del mundo, constituye aproximadamente el 75% del mismo. Fue descubierto por *Henry Cavendish* en 1766, un científico británico, quien al realizar experimentos con metales y ácidos, observó que se liberaba gas inflamable, lo llamó “aire inflamable”. El nombre de “hidrógeno” fue propuesto por *Antoine Lavoisier* en 1783, al darse cuenta que al quemarse, producía agua. (Brijaldo, 2020).

Aunque su estado natural es gaseoso, no es común encontrarlo en forma libre sino combinado con otros elementos como por ejemplo el oxígeno o el carbono. Por esta razón, el hidrógeno no puede ser tomado directamente y se hace necesario emplear mecanismos de producción para ser obtenido y que este pueda ser usado como combustible. (CNH, 2022)

El hidrógeno se distingue por presentarse, en condiciones normales, como un gas sin olor, sin color, sin sabor y altamente inflamable, que se enciende con facilidad generando una llama de tono azul claro y sus vapores son más livianos que el aire. Sin embargo, este elemento puede cambiar de estado a temperaturas extremadamente bajas o bajo presiones muy altas, convirtiéndose en líquido o sólido. (Brijaldo, María H., 2020).

El hidrógeno ( $H_2$ ) tiene una gran variedad de usos actuales y potenciales en sectores energéticos, industriales, de transporte y medioambientales. Su versatilidad y su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero lo hacen clave en la transición energética hacia una economía más sostenible. Tiene su mayor impacto práctico en la industria petroquímica, donde desde hace bastante tiempo se emplea como materia prima en la elaboración de diversos productos derivados del petróleo, con el objetivo principal de disminuir la presencia de partículas, compuestos aromáticos y, especialmente, azufre en la gasolina y el diésel. (CNH, 2022).

## **2.1 Clasificación del hidrógeno**

Para separar el hidrógeno de otros elementos, es indispensable utilizar grandes cantidades de energía, y en función a esta utilización de energía y al nivel de contaminación generado, el hidrógeno puede catalogarse en un color u otro, y a su vez, estos colores pueden ser agrupados en hidrogeno no renovable, experimental y sin emisiones.

### ***2.1.1 Hidrógeno no renovable***

Es aquel hidrógeno que se obtiene a partir de fuentes fósiles como el gas natural o el carbón y su producción de  $CO_2$  es elevado, este dióxido de carbono es generado en mayor parte por la reacción química de reformado y en menor proporción de la quema de combustible para llegar a la temperatura necesaria para el proceso. Estas emisiones son liberadas a la atmosfera, generando niveles altos de contaminación. Para generar una idea, la quema de un kilogramo de gasolina produce de tres a cuatro kilogramos de dióxido de carbono. En esta categoría encontramos el negro, el gris y el marrón y son los hidrógenos más contaminantes. (Morante, 2020).

### ***2.1.2 Hidrógeno sin emisiones***

Como su nombre lo dice, es el tipo de hidrógeno que no genera emisiones de  $CO_2$  a la atmosfera. En esta categoría está el hidrógeno verde que es totalmente sostenible y no genera ningún tipo de emisión, el azul que captura las emisiones producidas y el rosado que no genera emisiones de dióxido de carbono, pero si residuos nucleares. (Morante, 2020).

### ***2.1.3 Hidrógeno experimental***

El hidrogeno experimental es el hidrogeno que una vez obtenido, aprovecha las emisiones contaminantes que han sido producidas durante su elaboración. La producción de este hidrógeno no detiene la emisión de dióxido de carbono, sino que la aprovecha. Los hidrógenos experimentales son el amarillo, el turquesa y el blanco. (Morante, 2020).

A continuación, se presenta la clasificación del hidrógeno por colores en una escala de mayor a menor según su nivel de emisiones de  $CO_2$ .

#### ***2.1.4 Hidrógeno negro***

Cuando se habla del hidrógeno negro, se hace referencia al hidrógeno producido a partir del carbón bituminoso. Su proceso consiste en la gasificación del carbón mediante la quema de minerales carbónicos. Esta combustión libera gran cantidad de emisiones contaminantes, es el tipo de hidrógeno más dañino para el medio ambiente. (Arcos & Santos, 2023).

- Gasificación de carbón.

#### ***2.1.5 Hidrógeno marrón***

El hidrogeno marrón se genera a partir de la combustión de hulla y lignito (un tipo de carbón mineral), liberando cantidades exageradas de dióxido de carbono a la atmosfera. No es ecológicamente sostenible. (Arcos & Santos, 2023).

- Gasificación de lignito

#### ***2.1.6 Hidrógeno amarillo***

Obtenido a partir de la electrolisis del agua, en su proceso, mediante el uso de la energía directamente desde la red eléctrica, se separa el hidrógeno y el oxígeno. Este hidrogeno será limpio o no, según la procedencia de la electricidad que tenga el país que lo produzca, dependiendo si esta fuente es renovable o no. Por ejemplo, en Noruega, que su electricidad procede al 100% de fuentes renovables, el hidrogeno amarillo sería nulo en emisiones. (Arcos & Santos, 2023).

- Electrólisis usando red eléctrica.

#### ***2.1.7 Hidrógeno gris***

Actualmente es el hidrogeno más producido, ya que es la ruta más económica y sencilla de todas. Es el hidrógeno producido a partir de gas natural o petróleo, sus procesos de producción son

el reformado de metano con vapor, reformado auto térmico del gas natural y oxidación parcial de crudo. La producción de este hidrogeno libera cantidades considerables de dióxido de carbono y contaminación a la atmosfera. (Ramirez, 2023).

Sin captura y almacenamiento de carbono (CCS):

- Reformado de metano con vapor (SMR)
- Reformado auto térmico (ATR)
- Oxidación parcial (POX)
- Reformado de metano con vapor oxidativo (OSR)
- Reformado de metano seco (DRM)

### ***2.1.8 Hidrógeno azul***

En la producción del hidrogeno azul si se generan emisiones de dióxido de carbono, ya que este, al igual que el hidrogeno gris, se produce bajo el reformado de gas natural, pero estas emisiones producidas son capturadas para evitar su dispersión. Es el segundo tipo de hidrogeno más producido. (Ramirez, 2023).

Con captura y almacenamiento de carbono (CCS):

- Reformado de metano con vapor (SMR)
- Reformado auto térmico (ATR)
- Oxidación parcial (POX)
- Gasificación de carbón
- Reformado de metano seco (DRM)
- Reformado de metano con vapor oxidativo (OSR)
- Reformado de metano con vapor de agua con sorbente (SESMR)
- Reformado de metano con vapor mediante ciclo químico

### ***2.1.9 Hidrógeno turquesa***

Es producido mediante pirolisis, descomposición mediante calor, usa como fuente de energía hidrocarburos como el gas natural y sus emisiones asociadas son bajas debido a que la ausencia de oxígeno en la pirolisis impide la producción de dióxido de carbono, dando como producto únicamente hidrogeno y carbono. (Arcos & Santos, 2023).

- Pirolisis de metano

### ***2.1.10 Hidrógeno rosa***

El hidrogeno rosa se genera por electrolisis a partir de la energía nuclear. Durante su elaboración no genera emisiones contaminantes, aunque si genera residuos radiactivos.

- Electrólisis nuclear
- Termólisis con calor nuclear

### ***2.1.11 Hidrógeno verde***

Es el hidrógeno más sostenible de todos, ya que se genera a partir de energías renovables como lo son la energía solar y la energía eólica. Es un hidrogeno limpio y su producción no genera ningún tipo de residuo ni emisión. Puede ser producido mediante la electrolisis y a partir de residuos orgánicos a través de un proceso conocido como fermentación oscura (biohidrógeno). A nivel global, solo el 4 % del hidrógeno se genera mediante electrólisis y aproximadamente el 70% de su costo está asociado al consumo de electricidad, que proviene principalmente de fuentes de energía renovable. (Ramirez, 2023).

- Electrólisis con energías renovables
- Foelectrólisis solar directa
- Termólisis solar
- Biofotólisis

- Fermentación oscura
- Celdas de electrólisis microbiana (MEC)
- Ruta de Wood-Ljungdahl

### 2.1.12 Hidrógeno blanco

Se le llama hidrogeno blanco a aquel que se encuentra libre, de forma natural, que como ya lo mencionamos, no se encuentra en la Tierra. Actualmente, este hidrogeno no cuenta con un mecanismo de producción que permita su aprovechamiento. (Arcos & Santos, 2023).

- Extracción directa de yacimientos de hidrógeno natural.

**Figura 1**

*Clasificación del hidrógeno según su color*



*Nota. Elaboración propia*

### 3. Métodos de producción

La demanda de energía continúa aumentando a nivel global, el incremento de la población y el progreso tecnológico requieren cada vez más recursos energéticos, fundamentales para sostener y desarrollar las industrias, impulsar el comercio y los servicios, mejorar los sistemas de comunicación y transporte, y desempeñar un papel clave en la economía. (Brijaldo, 2020).

El hidrógeno es una alternativa energética prometedora, sobre todo si se produce de manera sostenible. Aunque todavía enfrenta barreras tecnológicas y económicas, su papel en un futuro energético es clave, especialmente como complemento a las energías renovables y como solución en sectores industriales y de transporte difíciles de electrificar.

En los últimos años, se han venido desarrollando diferentes mecanismos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, siendo la mejor alternativa a los combustibles fósiles por su eficiencia energética y su baja o nula generación de dióxido de carbono, pero la realidad es que actualmente la generación de hidrógeno más implementada sigue siendo de fuentes no renovables. (Quinteros, 2022).

En muchos países, el hidrógeno es la segunda fuente de energía más importante después de la electricidad, y ya que no puede ser tomado directamente del entorno como la energía eléctrica debe ser producido a través de técnicas o rutas que se diferencian por la fuente de energía utilizada: combustibles fósiles, agua y biomasa. Estas rutas pueden ser termoquímicas (calor), electroquímicas (electricidad), fotoquímicas (luz solar) y bioquímicas (organismos vivos). (Brijaldo, 2020).

### 3.1 Hidrógeno a partir de fuentes renovables

Actualmente los combustibles fósiles son la fuente más utilizada para la generación de hidrógeno. Pero dada su escasez y el daño que generan al medio ambiente han surgido nuevas técnicas a base de recursos renovables como lo son la biomasa y el agua.

#### 3.1.1 Biomasa

La biomasa representa una materia prima importante, ya que, a diferencia de los combustibles fósiles y el agua, son una fuente prácticamente inagotable. Por ejemplo, los residuos agrícolas se generan de forma continua, las ciudades producen desechos a diario y las aguas residuales requieren tratamiento constante. Sin embargo, este proceso depende principalmente de microorganismos y las enzimas que aún requieren investigación más profunda para optimizar los rendimientos, descubrir nuevas cepas bacterianas o identificar condiciones de reacción más eficientes.

**3.1.1.1 Biofotólisis.** Proceso de división molecular del agua en hidrógeno y oxígeno mediante la energía solar usando microalgas y/o cianobacterias.

**3.1.1.2 Fermentación.** Emplea bacterias fotosintéticas por medio de luz solar, o en ausencia de la misma, para convertir ácidos en hidrógeno.

**3.1.1.3 Celdas de electrolisis microbiana.** Biotecnología que utiliza bacterias con componente electroactivo para oxidar materia orgánica y reducir protones a hidrógeno mediante la generación de electrones. (Valencia-botero, 2013).

**3.1.1.4 Ruta de Wood-Ljungdahl (WL).** Vía alternativa que se realiza en laboratorio debido a las bacterias especializadas acetogénicas y sus condiciones controladas en ausencia de oxígeno para la producción de hidrógeno gaseoso mediante enzimas hidrogenasas. (Alves, Y. Soares, A, 2019)

### ***3.1.2 División del agua***

Los métodos que emplean el agua como materia prima inicial tienen un gran potencial, ya que el agua es un recurso sin contenido de carbono. Sin embargo, separar sus moléculas en hidrógeno y oxígeno demanda una cantidad considerable de energía, lo cual representa el principal obstáculo. Este desafío energético conlleva implicaciones tanto económicas como ambientales ya que, si se recurre a combustibles fósiles para generar tal energía, se mantiene la dependencia de la fuente que se busca sustituir; en cambio, si se opta por fuentes renovables como la solar, eólica o marina, los niveles de eficiencia y rentabilidad no serán competitivos en comparación con las tecnologías convencionales. (Valencia-botero, 2013).

**3.1.2.1 Electrólisis.** El sistema funciona con un recipiente lleno de agua pura, que tiene dos placas metálicas conectadas a una fuente de electricidad. Cuando se aplica suficiente voltaje, estas placas producen burbujas de hidrógeno y oxígeno, y mientras más corriente eléctrica pase, más gas se genera. Este proceso se sustenta en el equilibrio iónico natural del agua, donde moléculas de  $H_2O$  se disocian en iones  $H^+$  y  $OH^-$ . (Zoulias, 2004).

**3.1.2.2 Termólisis.** La termólisis es un método para separar el agua en hidrógeno y oxígeno usando solo calor. Básicamente, al calentar el agua a temperaturas muy altas, esta se rompe directamente en sus respectivas moléculas. Proceso el cual consiste en utilizar una fuente de calor para separar el agua en sus respectivos componentes. (Baykara, 2004).

**3.1.2.3 Foto-electrólisis.** Se basa en generar hidrógeno utilizando únicamente la energía solar, sin necesidad de fuentes externas. El proceso consiste en emplear materiales semiconductores especiales que, al absorber la luz del sol, sean capaces de romper directamente las moléculas de agua. (Fernández-Valverde, 2010).

### 3.2 Hidrógeno a partir de fuentes no renovables

Los métodos tradicionales de producción de hidrógeno utilizan como materia prima los combustibles fósiles son los más utilizados. No obstante, es importante reconocer que estos recursos son limitados y que su uso conlleva emisiones contaminantes significativas.

#### 3.2.1 Combustibles fósiles

Se obtienen a partir de recursos como el gas natural, carbón y petróleo, fuente la cual predomina la producción mundial de hidrógeno en la actualidad. (Nikolaidis, P. Poullikkas, A, 2016).

**3.2.1.1 Pirolisis de metano.** Método para generar hidrógeno de manera económica, al descomponer el metano en hidrógeno y carbono, en ausencia de oxígeno, método que evita directamente la liberación de  $CO_2$ . Esto se debe a que todo el carbono presente en el metano se convierte en carbón sólido, eliminando la necesidad de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. (Patlolla et al., 2023).

**3.2.1.2 Reformado de metano con vapor (SMR).** El reformado con vapor de agua es un proceso endotérmico que consiste en la reacción de hidrocarburos ligeros, como el gas natural, con vapor sobrecalentado en condiciones de alta temperatura (aproximadamente 850 °C) y presión (2.5-5 MPa), utilizando catalizadores de níquel para facilitar la descomposición de las moléculas, convierte el gas natural y vapor de agua en hidrógeno y monóxido de carbono. El  $CO$  formado se transforma posteriormente en  $CO_2$  e hidrógeno mediante la reacción de desplazamiento con agua, y el gas resultante se purifica para obtener hidrógeno de alta pureza. (Avargani et al., 2025).

**3.2.1.3 Oxidación parcial (POX).** Proceso en el cual un hidrocarburo se somete a una oxidación incompleta con oxígeno, de modo que solo se oxida el carbono hasta monóxido de carbono y se libera el hidrógeno asociado.

**3.2.1.4 Reformado auto térmico de metano (ATR).** Método que combina el reformado con vapor y la oxidación parcial en una sola etapa. El calor exotérmico liberado en la oxidación parcial alimenta la reacción endotérmica del reformado con vapor, resultando en un balance térmico. El monóxido de carbono producido se desplaza con agua para generar más hidrógeno y dióxido de carbono.

**3.2.1.5 Gasificación.** Proceso termoquímico en el que el carbón reacciona con una cantidad limitada de oxígeno a alta temperatura para producir un gas de síntesis. Este gas contiene principalmente hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano. (Hurtado & Soria, 2007)

**3.2.1.6 Reformado de metano con vapor de agua con sorbente (SESMR).** Tecnología derivada del reformado convencional de metano con vapor, en la que se incorpora la captura directa de dióxido de carbono dentro del propio reactor mediante un sorbente sólido a alta temperatura. Esta captura in situ del dióxido de carbono desplaza el equilibrio químico, favoreciendo la formación de hidrógeno y permitiendo alcanzar mayores conversiones a temperaturas más bajas que en el reformado convencional. (Di Giuliano & Gallucci, 2018).

**3.2.1.7 Reformado de metano seco (DRM).** Es un modo de reacción catalítico endotérmico en el que el metano reacciona con dióxido de carbono, actuando este último como agente oxidante, para producir principalmente hidrógeno y monóxido de carbono en forma de gas de síntesis. Sin embargo, el potencial de formación de depósitos de coque es mayor con respecto al SMR. (AlHumaidan et al., 2023).

**3.2.1.8 Reformado de metano con vapor oxidativo (OSR).** Sistema de reacción que integra el reformado de metano con vapor y la oxidación parcial. Esta combinación aprovecha el calor liberado en la POX para suministrar la energía necesaria al SMR, reduciendo así la necesidad

de aporte externo de calor. La adición de vapor a la mezcla de oxidación parcial contribuye a disminuir la formación de depósitos de carbono. Este enfoque permite generar gas de síntesis con una alta relación  $H_2/CO$  y optimizar el consumo energético. (Mosinska et al., 2020).

**3.2.1.9 Reformado de metano con vapor mediante ciclo químico (CLSMR).** Proceso novedoso que permite la conversión del metano en gas de síntesis y la producción de hidrógeno a partir de vapor de agua sin etapas de purificación. El planteamiento divide el reformado de metano con vapor en dos etapas: en la primera, el metano se oxida a gas de síntesis utilizando oxígeno proveniente normalmente de un óxido metálico; en la segunda etapa, dicho óxido metálico, previamente reducido, se reoxida con vapor, regenerando su oxígeno y liberando hidrógeno. (Zheng et al., 2014).

**3.2.1.10 Reformado fotocatalítico de metano con vapor (PSMR).** Modalidad de reacción en la que el metano se activa mediante un fotocatalizador en presencia de vapor de agua, permitiendo la producción de hidrógeno a temperatura bajo condiciones moderadas. Este enfoque aprovecha la energía solar para impulsar la conversión por medio de la absorción de luz. (Shimura et al., 2010).

## 4. Metodología

El presente proyecto se realizó bajo una investigación con enfoque cualitativo de manera descriptiva y comparativa, mediante una revisión sistemática de literatura. Este tipo de metodología resulta adecuada para recopilar y analizar de forma rigurosa la información existente sobre los diferentes métodos de producción de hidrógeno y su sostenibilidad energética, permitiendo identificar desventajas y repercusiones ambientales en las diferentes tecnologías.

## **4.1 Diseño de la investigación**

La revisión sistémica se llevó a cabo en cuatro fases:

### ***4.1.1 Revisión bibliográfica***

Hacer una búsqueda de información relacionada con la producción de hidrógenos, mecanismos de producción, productos obtenidos, impacto ambiental y su economía.

### ***4.1.2 Explicación de los métodos de producción***

Revisión de la información obtenida sobre los diferentes tipos de hidrógeno, su relación en la producción y la diferenciación entre estos mismos, para un mejor entendimiento y explicación de sus aplicaciones.

### ***4.1.3 Análisis comparativo***

Se organizó la información, registrando variables como el tipo de método de producción, materia y condiciones de operación, productos, impactos ambientales e implicaciones económicas. También, se realizó una descripción comparativa que permitió contrastar los diferentes métodos de producción de hidrógeno en función de su sostenibilidad energética.

### ***4.1.4 Síntesis de resultados***

Se integraron los datos obtenidos para una postura de ventajas y limitaciones de los métodos analizados, generando conclusiones fundamentadas y alineadas con los objetivos de la investigación.

## **4.2 Fuentes de información**

Se consultaron bases de datos científicas de reconocimiento, tales como ScienceDirect y Google Scholar, siendo esta última una biblioteca digital de literatura técnica para la industria del petróleo y gas. Se tuvieron en cuenta artículos científicos publicados entre 2015 y la actualidad,

escritos en inglés o español, con información técnica, ambiental y económica relacionada con la producción de hidrógeno.

## 5. Análisis ambiental y económico

La producción de hidrógeno se muestra como una opción muy buena dentro del cambio hacia un sistema energético que ayude al medio ambiente. En el tema ambiental, el hidrógeno que proviene de fuentes renovables permite la disminución de gases tipo efecto invernadero, pero desde lo económico, los gastos actuales para producirlo son más altos que los del hidrógeno que viene de fuentes fósiles.

### 5.1 Fuentes renovables

La producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables es una alternativa en bien de sistemas energéticos sostenibles gracias a su positiva relación ambiental y económica. Su principal objetivo es reducir significativamente las emisiones de gases tipo efecto invernadero. Sin embargo, este tipo de producción enfrenta un significativo costo de producción. (Rasheed et al., 2025)

En la tabla 1 encontramos los métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, la cual incluye estimaciones de costos de generación y el impacto ambiental, que se mide en emisiones equivalentes de  $CO_2$  por cada kilogramo de  $H_2$  que se produce.

**Tabla 1**

*Costos aproximados e impactos ambientales de los diferentes métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables.*

***HIDRÓGENO A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES***

Método	Costo aproximado (USD/kg H <sub>2</sub> )	Impacto ambiental (CO <sub>2</sub> e/kg H <sub>2</sub> )	Hidrógeno producido
<i>Biofotólisis</i>	\$ 5,00 - 7,3	≤ 1,00	Verde
<i>Fermentación</i>	\$ 7,6 - 15	≤ 0,87	Verde
<i>Celdas de electrolisis microbiana</i>	\$ 4,51 - 30	≤ 0,17	Verde
<i>Ruta de Wood-Ljungdahl</i>	\$ 5,00 - 8,00	≤ 1,10	Verde
<i>Electrólisis energía limpia y nuclear</i>	\$ 4,15 - 10,35	0,32-10	Verde, Rosa
<i>Electrólisis con energía eléctrica</i>	\$ 4,00 - 10,00	≤ 30,76	Amarillo
<i>Termólisis</i>	\$ 6,0 - 12,2	≤ 0,98	Verde, Rosa
<i>Foto-electrólisis</i>	\$ 10,36 - 15,76	≤ 1,00	Verde

*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Biological Hydrogen Production from Biowaste Using Dark Fermentation, Storage and Transportation (Talapko et al., 2023); Techno-Economic analysis of CO<sub>2</sub>-Based gas fermentation for acetic acid production (Xu et al., 2025); Exploring the spectrum: an environmental examination of hydrogen's diverse colors (Mehmood et al., 2024); A comparative review on clean hydrogen production from wastewaters (Aydin et al., 2020).*

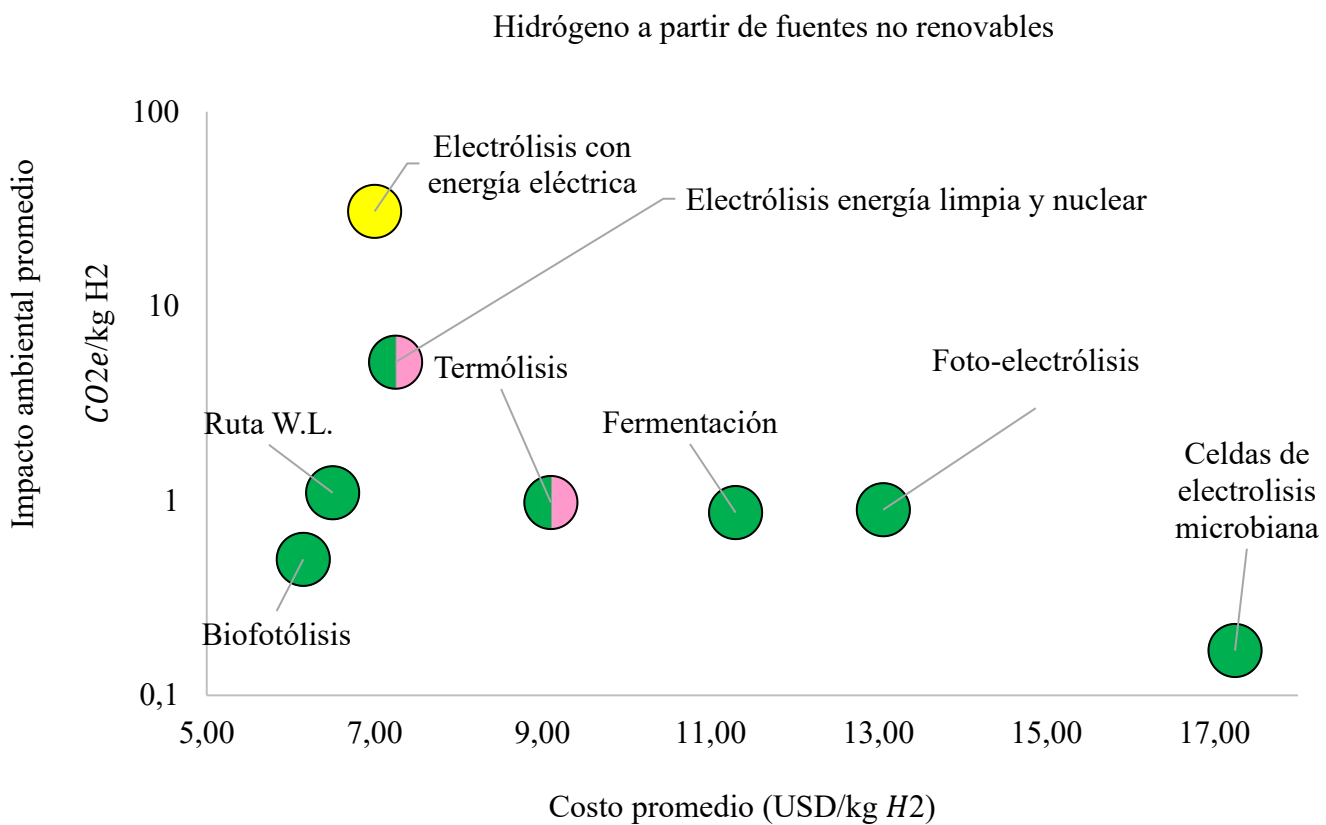
En la figura 2 se muestra cómo se relacionan el costo de producción y el impacto ambiental de diferentes métodos para obtener hidrógeno renovable. Las tecnologías que están en la parte

inferior izquierda son las que tienen un costo y un impacto ambiental más bajos, mientras que las que se sitúan en la parte superior o derecha tienen costos o emisiones más altos.

El color que aparece en la figura corresponde al tipo de hidrógeno.

**Figura 2**

*Relación entre costo promedio e impacto ambiental de los métodos de producción de hidrógeno renovable*



Donde:

- Biofotólisis
- Termólisis
- Fermentación

- Ruta W.L.
- Electrólisis con energía eléctrica
- Electrólisis energía limpia y nuclear
- Celdas electrólisis microbiana
- Foto-electrólisis

*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados Tabla 1.*

## **5.2 Fuentes no renovables**

La producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovables, como el reformado de vapor de metano (SMR), el reformado en seco, la oxidación parcial y la gasificación, han sido históricamente predominante en la industria debido a la amplia disponibilidad de recursos fósiles y sus costos de producción comparativamente bajos. Sin embargo, este enfoque se ve significativamente comprometido por su considerable contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). (Avargani et al., 2025).

La tabla 2 muestra los datos obtenidos mediante la literatura la cual indica los métodos de producción de hidrógeno a partir de los recursos no renovables, el cual nos indica sus costos aproximados de generación, el impacto ambiental dado en emisiones de dióxido de carbono equivalente por kilogramo de hidrógeno.

**Tabla 2**

*Costos aproximados e impactos ambientales de los diferentes métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovables.*

***HIDRÓGENO APARTIR DE FUENTES NO RENOVABLES***

Método	Costo aproximado (USD/kg H <sub>2</sub> )	Impacto ambiental (CO <sub>2</sub> e/kg H <sub>2</sub> )	Hidrógeno producido
<i>Pirolisis de metano</i>	\$ 2,3 - 4,3	2,1 - 4,1	Turquesa
<i>Reformado de metano con vapor (SMR)</i>	\$ 3,0 - 5,0	10,0 - 13,0	Gris, Azul
<i>Oxidación parcial (POX)</i>	\$ 2,0 - 2,5	8,0 - 10,0	Gris, Azul
<i>Reformado autotérmico de metano (ATR)</i>	\$ 1,5 - 3,0	9,0 - 11,0	Gris, Azul
<i>Gasificación</i>	\$ 2,5 - 3,60	22,0 - 26,0	Negro, Marrón, Azul
<i>Reformado de metano con vapor de agua con sorbente (SESMR)</i>	\$ 2,5 - 3,0	1,0 - 2,0	Azul
<i>Reformado de metano seco (DRM)</i>	\$ 3,0 - 5,0	10,0 - 12,0	Gris, Azul
<i>Reformado de metano con vapor oxidativo (OSR)</i>	\$ 2,5 - 3,0	9,0 - 11,0	Gris, Azul
<i>Reformado de metano con vapor mediante ciclo químico (CLSMR)</i>	\$ 2,0 - 4,0	1,0 - 2,0	Azul
<i>Reformado fotocatalítico de metano con vapor (PSMR)</i>		Experimental	

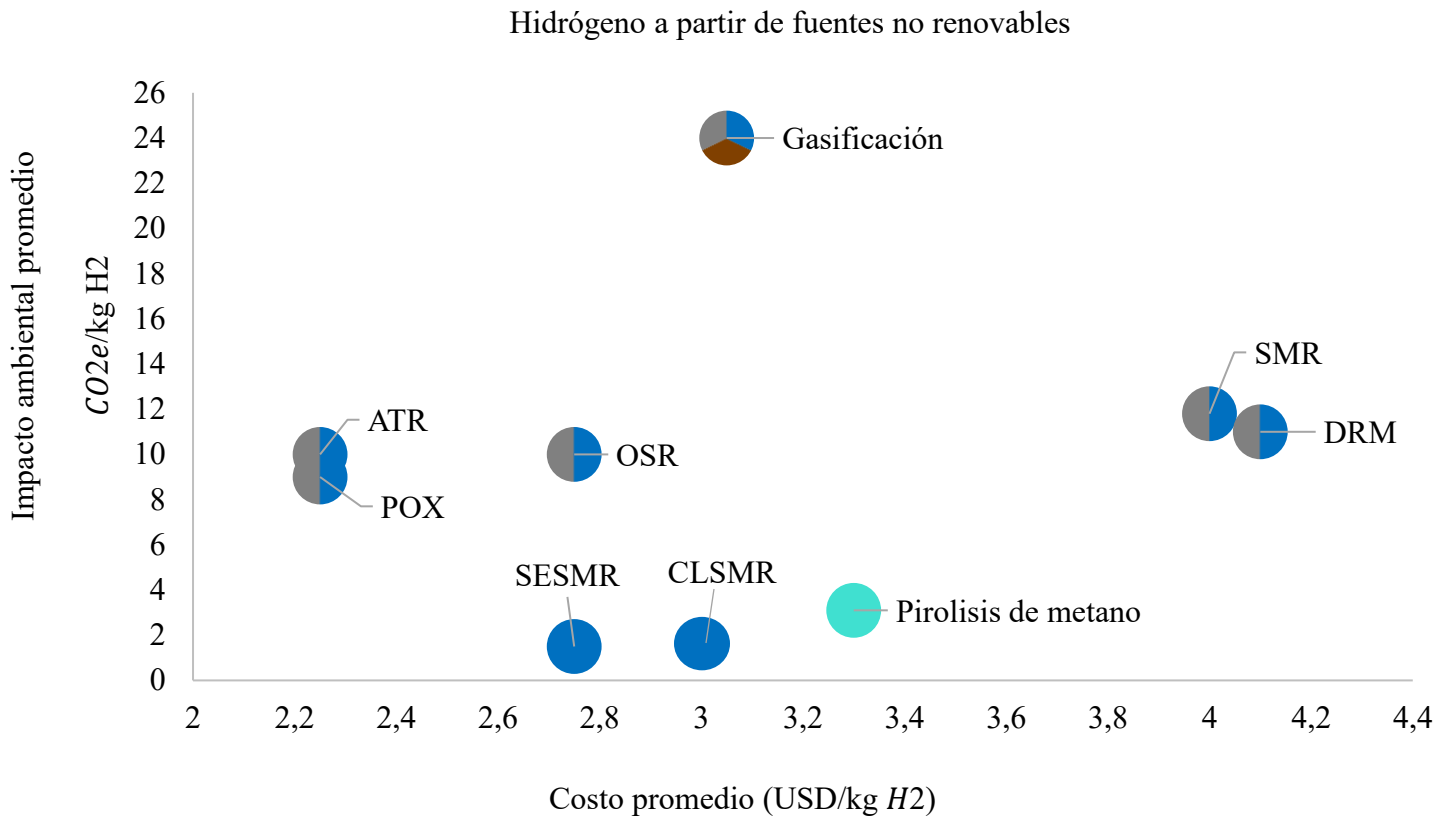
*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability (Dincer & Acar, 2015); A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes (Siddiqui & Dincer, 2019); An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods (Kumar et al., 2020); Comparative impact assessment study of various hydrogen production methods in terms of emissions (Suleman et al., 2016); Life-cycle assessment of hydrogen systems: a systematic review and meta-regression analysis (Puig-Samper et al., 2024); Sustainable hydrogen production: Technological advancements and economic analysis (Ahmed et al., 2021); Economic assessment of clean hydrogen production from fossil fuels in the intermountain-west region, USA (Chen et al., 2024).*

La figura 3 muestra la relación del costo aproximado de producción y el impacto ambiental de diferentes métodos para la obtención de hidrógeno por medio de fuentes no renovables. Gráfico en el cual compara las tecnologías de menor costo y menor huella de carbono con respecto a otras de mayores emisiones e incremento de gastos para su producción.

El color que aparece en la figura corresponde al tipo de hidrógeno.

**Figura 3**

*Relación entre costo promedio e impacto ambiental de los métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovable*



Donde:

- Reformado de metano con vapor mediante ciclo químico (CLSMR)
- Pirolisis de metano
- Reformado de metano seco (DRM)
- Reformado autotérmico de metano (ATR)
- Reformado de metano con vapor oxidativo (OSR)
- Oxidación parcial (POX)

- Reformado de metano con vapor (SMR)
- Reformado de metano con vapor de agua con sorbente (SESMR)
- Gasificación

*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados Tabla 2.*

### **5.3 Tipos de hidrógeno por color**

El hidrógeno, usualmente se clasifica por colores según su fuente de energía y su método de producción, lo que indica su nivel de carbono (Incer-Valverde et al., 2023). Esta clasificación viene de la necesidad de separar el hidrógeno "limpio" (bajas emisiones) del producido con combustibles fósiles. Un ejemplo es el hidrógeno gris, que sale del gas natural por metano reformado (SMR) sin atrapar  $CO_2$ , mientras que el hidrógeno azul proviene también del gas natural, pero con captura  $CO_2$  (CCS) durante el proceso. Los hidrógenos marrón y negro se hacen con gasificación de lignito o carbón oscuro, respectivamente. Pero, el hidrógeno verde sale de electrólisis con agua usando energías renovables (solar, eólica, etc.), producción en la cual sus emisiones son inferiores a 1 (Dumančić et al., 2024).

Esta clasificación por colores tiene importancia energética y ambiental, la producción global de hidrógeno según Global Hydrogen Review (2024) generó aproximadamente 920 Mt de  $CO_2$ , cerca del 2,43% de las emisiones globales. Entender cada tipo de hidrógeno, su fuente energía, emisiones y costo de producción es clave para apreciar su papel en el cambio energético.

**Tabla 3**

*Costos aproximados e impactos ambientales de los diferentes tipos de hidrógeno según su color*

***HIDRÓGENO POR COLOR***

<i>Color</i>	Costo aproximado (USD/kg H <sub>2</sub> )	Impacto ambiental (CO <sub>2</sub> e/kg H <sub>2</sub> )
<i>Negro</i>	\$ 2,5 - 3,6	26 - 35
<i>Marrón</i>	\$ 3,0 - 3,5	26 - 35
<i>Amarillo</i>	\$ 5,5 - 14,2	20 - 24
<i>Gris</i>	\$ 1,5 - 3,8	9 - 13
<i>Azul</i>	\$ 3,0 - 5,0	3 - 9
<i>Turquesa</i>	\$ 1,5 - 3,0	0 - 9
<i>Rosa</i>	\$ 4,39 - 12,2	0,47 - 0,96
<i>Verde</i>	\$ 4,5 - 15,0	0 - 0,2
<i>Blanco</i>	\$ 0,5 - 1,0	0

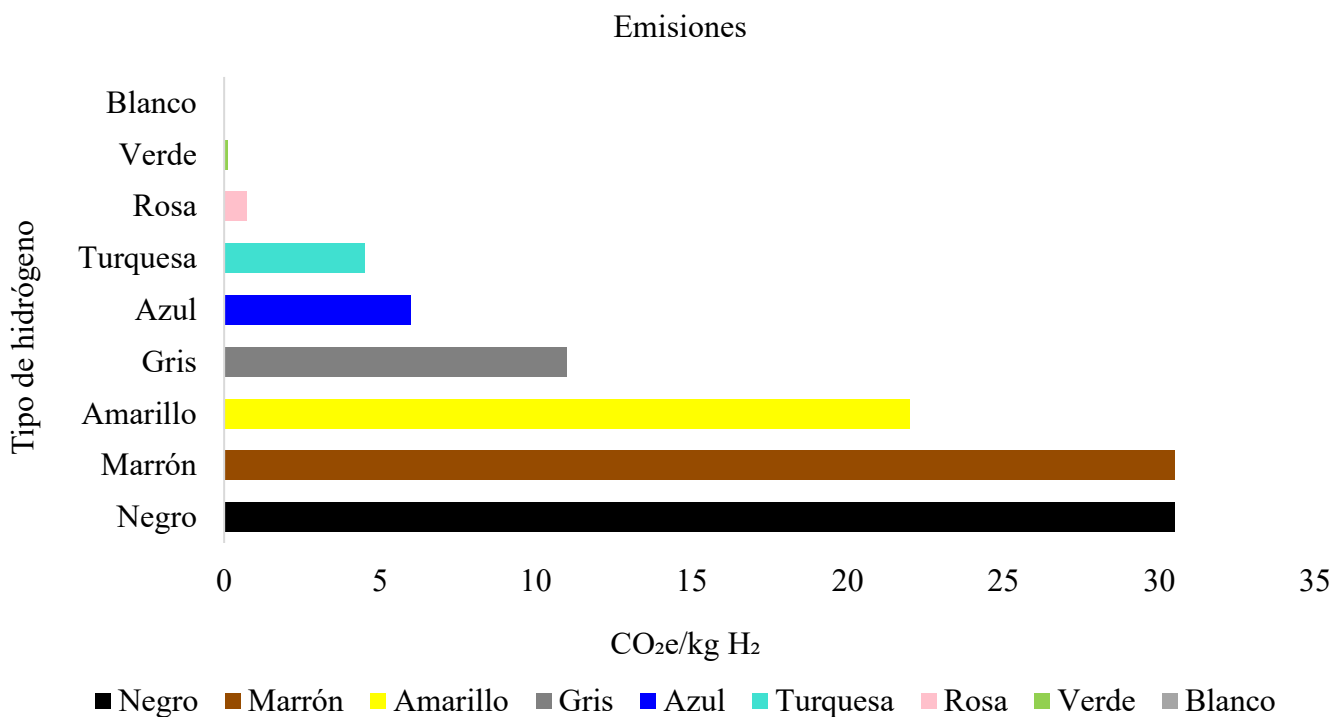
*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity (Incer-Valverde et al., 2023); Replacing Gray Hydrogen with Renewable*

*Hydrogen at the Consumption Location Using the Example of the Existing Fertilizer Plant (Dumančić et al., 2024); Decarbonized hydrogen in the US power and industrial sectors: Identifying and incentivizing opportunities to lower emissions (Bartlett & Krupnick, 2020); Hydrogen Insights 2024.*

La clasificación del hidrógeno por su respectivo color permite identificar las diferencias en términos de costo por producción y la cantidad de emisiones que genera debido proceso de una forma más conjunta.

**Figura 4**

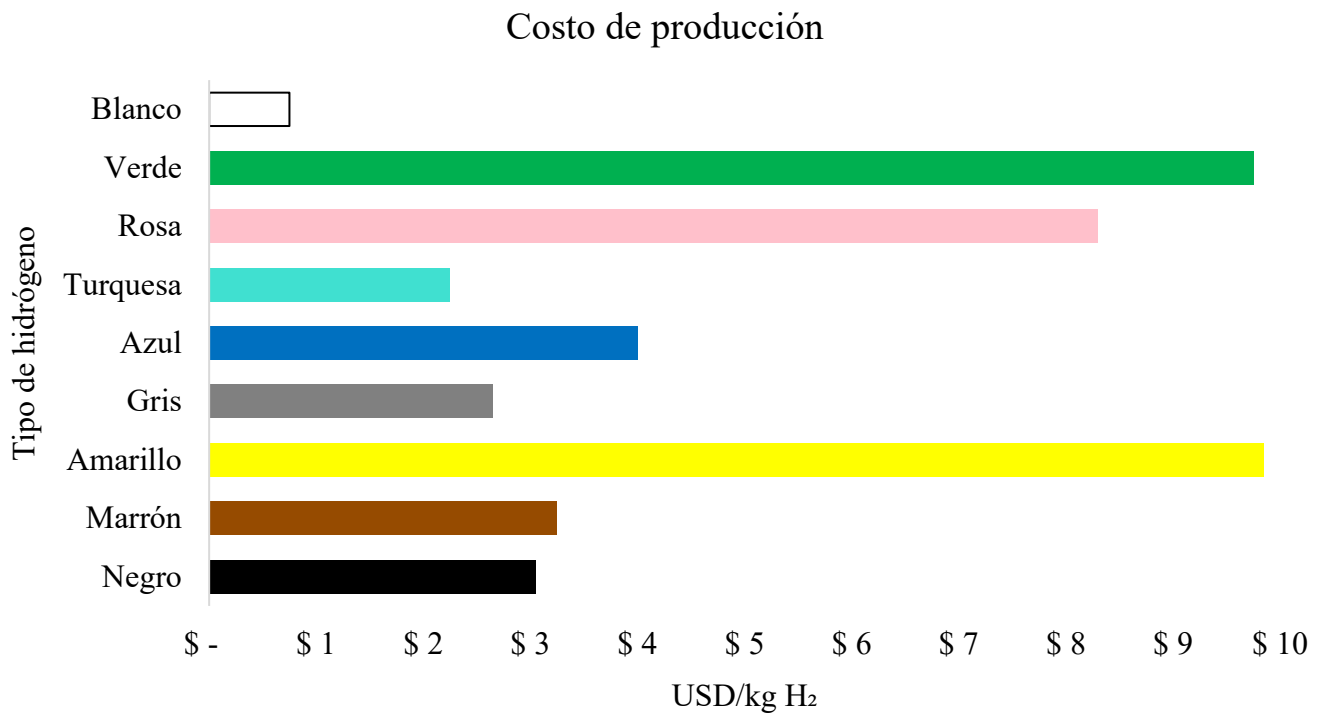
*Emisiones según el color del hidrógeno*



*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados Tabla 3.*

**Figura 5**

*Costos según el color del hidrógeno*



*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados Tabla 3.*

La figura 4 y 5 muestran de manera clara los rangos aproximados de los costos para producir hidrógeno (USD/kg H<sub>2</sub>) y las emisiones que producen (CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub>) para cada tipo de hidrógeno, dando un punto clave para ver la competitividad de estos tipos de hidrógeno y su representación para una transición energética.

#### 5.4 Sostenibilidad energética de la generación de hidrógeno

El hidrógeno se perfila como un vector energético esencial para la transición hacia sistemas bajos en carbono. Sin embargo, su sostenibilidad depende directamente del método de producción. La generación entre 10 y 26 kg CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub> provenientes del SMR y la gasificación, según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024). Las rutas renovables, aunque mucho menos contaminantes, aún representan menos del 1 % de la oferta global.

Las diferencias de impacto ambiental son marcadas, el hidrógeno gris mediante SMR sin captura tiene mayor huella de carbono (10–12 kg  $CO_2e/kg H_2$ ), el hidrógeno azul obtenido del SMR con CCS reduce emisiones en 60–90 %, pero depende de la tasa real de captura y de fugas de metano, por lo que no garantiza neutralidad, el hidrógeno verde que proviene de la electrólisis con renovables puede acercarse a 0 kg  $CO_2e/kg H_2$  si la electricidad es 100 % limpia, el hidrógeno turquesa es una alternativa emergente con potencial de baja emisión si la energía es renovable y el carbono sólido se gestiona adecuadamente.

Los costos del hidrógeno verde están descendiendo gracias a la reducción del precio de la electricidad renovable y al abaratamiento de electrolizadores.

## 6. Discusión

### 6.1 Panorama global

Según la publicación anual de Global Hydrogen Review, en los últimos años, el hidrógeno ha tenido un papel cada vez más importante dentro del panorama energético a nivel global. En 2024, la demanda mundial alcanzó casi los 100 millones de toneladas (Mt), lo que representa un crecimiento del 2% respecto a 2023. Sin embargo, resulta preocupante que casi la totalidad de esta producción continúe dependiendo de combustibles fósiles sin abatimiento de emisiones, lo que limita los beneficios ambientales que podrían derivarse de una transición hacia un hidrógeno verdaderamente limpio.

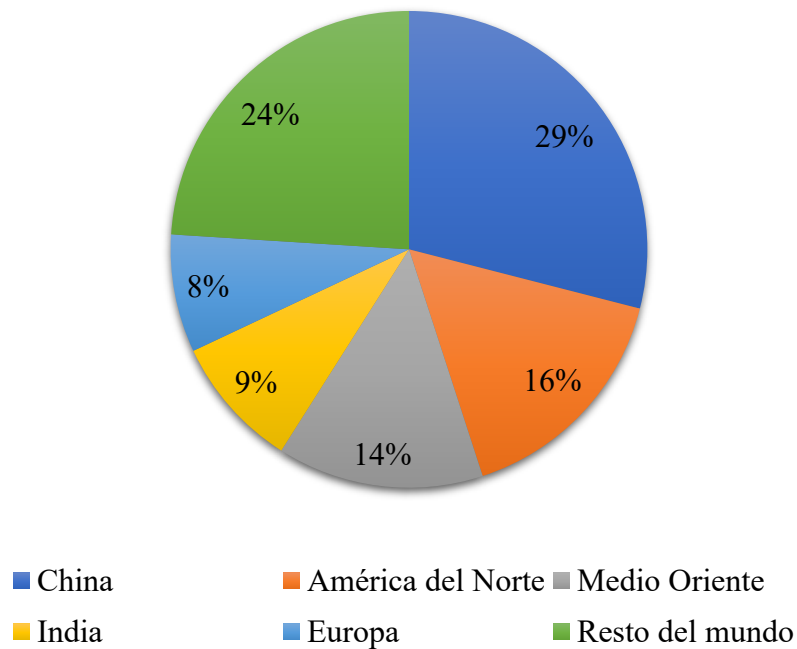
En cuanto a la distribución geográfica del consumo, China se consolidó como el principal consumidor en 2024, con más de 29 Mt, es decir, casi un tercio de la demanda global. Esta cifra

duplica con creces el consumo registrado en Estados Unidos (16 Mt), lo que refleja tanto el tamaño de la economía china como su creciente protagonismo en las cadenas de valor del hidrógeno.

En la figura 5 se representan los porcentajes de la demanda de hidrógeno por región.

**Figura 6**

*Distribución geográfica de la demanda de hidrógeno por porcentaje.*



*Nota. Adaptado de Global Hydrogen Review 2024 (p. 21), por IEA, 2025.*

Statistical Review of World Energy 2025 reporta que la capacidad mundial total de producción de hidrógeno alcanzó las 4276,6 mil toneladas al año en 2024. Esta cifra representa un crecimiento anual del 6,8% entre 2014 y 2024.

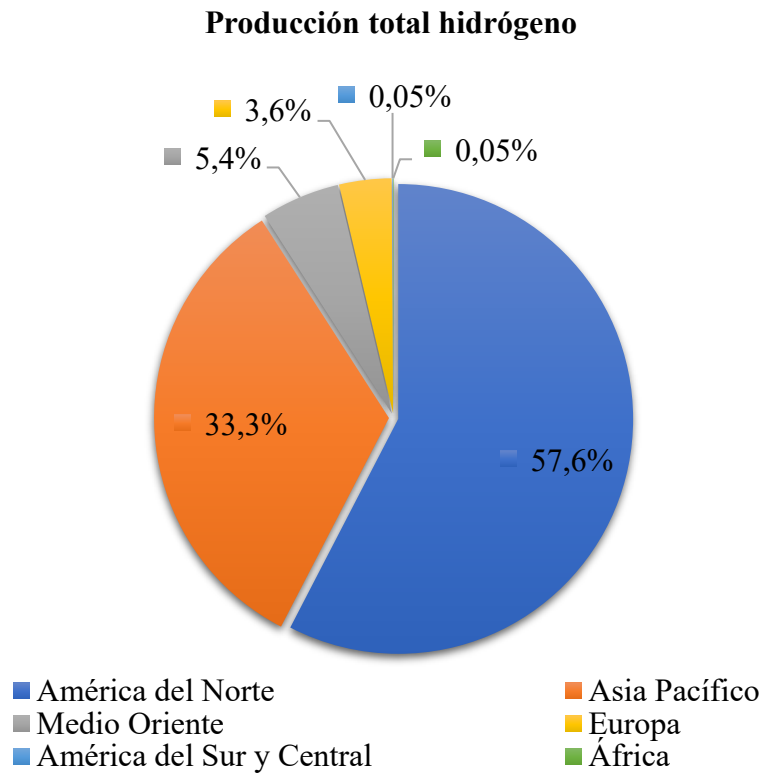
**Tabla 4***Capacidad de producción de hidrógeno por región*

Región	Tipo de hidrógeno y cantidad producida (mil toneladas/año)		Producción total hidrógeno (mil toneladas/año)
<i>América del Norte</i>	Azul 2329,8	Verde 132,8	2462,7
<i>Asia Pacífico</i>	Azul 1224,2	Verde 201	1425,2
<i>Medio Oriente</i>	Azul 230	Verde 0,5	230,5
<i>Europa</i>	Azul 93,2	Verde 60,6	153,8
<i>América del Sur y Central</i>		Verde 2,1	2,1
<i>África</i>	Azul 2,3	Verde	2,3

*Nota. Adaptado de Statistical Review of World Energy (74.ªed.), Energy Institute (2025).*

**Figura 7**

*Distribución geográfica de la capacidad de producción de hidrógeno por región.*



*Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados Tabla 4.*

A pesar de este incremento se evidenció que en la actualidad el mayor porcentaje de hidrogeno se produce mediante los combustibles fósiles como lo son el carbón y el gas natural el cual representa alrededor de dos tercios de la producción y el carbón el 20% aproximadamente. (IEA, 2024.) Estos reportes coinciden con los estudios recientes reportados por Fan et al. (2025) en el cual confirma a China como mayor consumidor de hidrógeno y junto con Ji and Wang (2021), ambos resaltan un mayor porcentaje de producción de hidrógeno mediante combustibles fósiles, junto con el último reporte de Global Hydrogen Review (2025) el cual reafirma la oferta de

hidrógeno dominada por los combustibles fósiles, utilizando 290 mil millones de metros cúbicos (bcm) de gas natural y 90 millones de toneladas de equivalente de carbón (Mtce) en 2024. Casi dos tercios de la demanda total se cubren con gas natural, y una parte significativa con carbón, especialmente en China e India.

El informe Global Hydrogen Review de IEA (2025) indica que las tecnologías renovables abarcan menos del 1% de producción global. En la Tabla 1, procesos como la biofotólisis y la fermentación oscura ofrecen un balance en la relación costo-emisiones, con emisiones de  $CO_2$  cercanas a 0 kilogramos de  $CO_2e/kg$ , pero tienen rendimientos energéticos muy bajos (<10%) indican Ji & Wang (2021) ya que aún están en investigación temprana. Dichas rutas pueden ofrecer hidrógeno verde, pero hoy su producción es baja y cara comparada con otros métodos.

Según Azizimehr et al. (2024), los métodos de producción más usados para el grupo de biomasa y división del agua son la gasificación y la electrolisis respectivamente.

La gasificación aplicada a la biomasa es la más usada debido a su mayor eficiencia y su efecto positivo en la huella de carbono (78,1% en comparación al SMR según Al-Ghussain et al. (2022)), además tiene obtención de productos en poco tiempo con calentamiento y su máxima eficiencia exergética 59,58% y energética 49,39%.

La electrolisis de membrana protónica (PEM) es el método de producción más común y más usada en las tecnologías renovables (28%) debido a su mayor eficiencia de voltaje, densidad de corriente y seguridad. La tasa de producción de hidrógeno según su sistema puede variar entre 62,2 kg/día hasta los 432 kg/día con una eficiencia de 51,2-92,6% según Al-Ghussain et al. (2022).

Los datos de la Tabla 2, *Costos aproximados e impactos ambientales de los diferentes métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovables*, muestran que tanto la oxidación parcial (POX) como el reformado de metano con vapor (SMR) tienen costos más bien

bajos, lo cual explica su amplia aplicación industrial. No obstante, los dos procesos producen emisiones notables de  $CO_2$  y, por ende, su sostenibilidad en términos ambientales es negativa. En cambio, el reformado autotérmico (ATR), el reformado con sorbente (SESMR) y el ciclo químico (CLSMR) presentan un mejor rendimiento medioambiental, aunque su consolidación demanda un desarrollo tecnológico más significativo. El reformado fotocatalítico (PSMR), un método novedoso, todavía está en la etapa experimental, mientras que la gasificación se distingue por su alta huella de carbono. Los datos dados para el reformado de metano con vapor dados por Szablowski et al. (2025) viene prevaleciendo desde el estudio de Ji and Wang (2021), los cuales indican el bajo costo del reformado de metano sin captura de carbono y con captura del mismo, apoyándolo como el proceso más usado desde 2021 con 40% a 2025 con un 50% de la demanda, adicionalmente de su bajo costo aporta una eficiencia entre 70-85%, el aplicar CCS a este método se puede reducir hasta un 69% del potencial del calentamiento global aportando de manera significativa a una transición energética más ideal.

Rasheed et al. (2025) indica que el hidrógeno procedente de fuentes renovables (verde) tiene emisiones mucho menores que las fuentes convencionales, lo que justifica el interés en abatir el  $CO_2$  del SMR mediante CCS. En conjunto, los métodos basados en fósiles (SMR, ATR, POX, gasificación) son hoy los más competitivos en términos económicos y de madurez tecnológica, pero requieren estrategias de captura o reemplazo para lograr las metas de descarbonización.

Arcos & Santos (2023) concuerdan en que el hidrógeno de baja huella (verde, rosa, turquesa) es limpio, pero más caro, mientras que el hidrógeno gris es predominante por ser relativamente más económico. Solamente los avances tecnológicos y marcos regulatorios adecuados pueden conciliar la viabilidad económica y la mitigación de emisiones, un problema complementario para la hidrogenización global.

El mercado global de hidrógeno está en rápido cambio. Si bien hasta ahora la producción limpia es muy baja, las inversiones han crecido exponencialmente. Según el Hydrogen Insights (2024), la capacidad anunciada en proyectos limpios pasó de 102 proyectos en decisión final de inversión (FID) en 2020 (\$10 mil millones) a 434 proyectos en 2024 (\$75 mil millones). Este aumento muestra el interés político y empresarial. No obstante, la mayoría aún está en fase de planteamiento o diseño: por ejemplo, de la capacidad de electrólisis anunciada, apenas el 4 % ha alcanzado FID o construcción.

Las proyecciones muestran un mercado híbrido en la transición energética. El hidrógeno renovable y con captura de  $CO_2$  crece, la IEA estima que la capacidad baja en carbono podría llegar aproximadamente a 49 Mt/año en 2030 si se concreta la realización de los proyectos. Igualmente, las rutas tradicionales continúan siendo las más usadas, pero disminuirán porcentaje. Análisis recientes de Fan et al. (2025) sugieren que en el corto plazo se priorizarán fuentes alternativas de bajo costo. A largo plazo, este mismo estudio estima que el  $H_2$  100% producción de hidrógeno abastecida directamente de fuentes renovables (off-grid) podría ser la opción más económica (tasa aproximadamente de \$2,2/kg) para 2045–2050.

En resumen, el sector está avanzando hacia una mayor sostenibilidad. La demanda global de hidrógeno está en aumento, especialmente en áreas como el transporte, la industria química y la energía. Los actores internacionales están viendo una gran oportunidad en los hidrógenos renovables y de bajas emisiones. Las inversiones recientes reflejan una clara tendencia hacia la transición: estamos viendo un despliegue masivo de electrólisis, un aumento en proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS) y la exploración de nuevas rutas innovadoras. Sin embargo, para lograr una transición completa, es crucial acelerar estos despliegues y contar con políticas sólidas. Según la IEA, necesitamos cuadruplicar las inversiones actuales en hidrógeno

para alcanzar los objetivos climáticos. Mientras tanto, las comparaciones técnicas indican que los caminos limpios deben mejorar su eficiencia y reducir costos para ser realmente competitivos. No obstante, estudios como los de Ji & Wang (2021) y Rasheed et al. (2025) confirman que el futuro del hidrógeno se basa en tecnologías más limpias y económicamente viables que eventualmente reemplazarán a las rutas convencionales.

## 6.2 Panorama en Colombia

En Colombia, según la edición 2025 del Statistical Review of World Energy, la demanda total de energía en fue de 1,88 Exajulios (EJ) en 2024, siendo el 0,3% de la demanda mundial, lo cual representó un crecimiento en la demanda total del 1% con una tasa de crecimiento anual promedio del 1,9% entre 2014 y 2024.

Las emisiones de dióxido de carbono provenientes del consumo de energía en Colombia alcanzaron los 112,4 millones de toneladas en 2024, esto representa un aumento del 2,4% y 139 millones de toneladas por combustión de fósiles, quema de gas y metano, con un crecimiento del 1,6%.

La demanda actual de hidrógeno puro en Colombia se estima en 155 kilotoneladas de  $H_2$  al año, este hidrógeno, en su mayoría, proviene de combustibles fósiles y es tipo gris. La demanda se distribuye principalmente en el sector de refinerías (84%) y en la producción de fertilizantes (12%), otras industrias, consumen el 4% restante (Patiño et al., 2023). Ecopetrol es el principal consumidor, utilizando el 99% de la demanda existente de hidrógeno en Colombia. El 76,5% se usa en la refinería de Cartagena (Reficar) y aproximadamente el 24% en la refinería de Barrancabermeja (ANDI Colombia, 2021).

El Ministerio de Minas y Energía indica que la demanda local equivalente de  $H_2$  de bajas emisiones (incluyendo derivados) se proyecta en 24,92 y 2202,36 kilotoneladas para el 2030 y

2050 respectivamente. El combustible sostenible de aviación (SAF) se proyecta como el principal demandante para 2050, con un consumo estimado entre 2 y 4,8 Mt. El principal objetivo para 2030 es instalar entre 1 y 3 GW de capacidad de electrólisis, suficiente para 1–3 Mt de  $H_2$  al año, además, se ha delineado un objetivo secundario de 50 kilotoneladas de hidrógeno azul. Colombia cuenta con un potencial teórico para producir suficiente hidrógeno de bajas emisiones (principalmente verde) para cubrir el 100% de la demanda identificada. Este potencial se basa en abundantes recursos renovables y reservas fósiles.

### ***6.2.1 Potencial de energías e incentivos políticos***

**6.2.1.1 Eólica.** Tiene un potencial muy alto en la costa caribe, mayormente en la Guajira, con velocidades de viento que superan los 9 m/s, por encima del promedio mundial. El potencial teórico se estima en 68 GW (ANDI Colombia, 2021).

**6.2.1.2 Solar.** La radiación solar promedio es aproximadamente 60% mayor que la mundial. El potencial teórico se estima en 8172 GW (Patiño et al., 2023).

**6.2.1.3 Hidroeléctrica.** La matriz eléctrica es 66% hidráulica (12.5 GW), y se espera que las regiones con acceso a hidroelectricidad dominen la generación de hidrógeno verde a corto plazo. El potencial teórico se estima en 56 GW (Patiño et al., 2023).

**6.2.1.4 Hidrocarburos.** Colombia tiene reservas de gas natural y carbón (180 años). El potencial de producción de hidrógeno azul a partir de carbón podría oscilar entre 700 y 8000 kt  $H_2$  al año para 2050 (Domínguez et al., 2022).

El gobierno colombiano ha vinculado el hidrógeno en la política de transición, creando en 2021 la Hoja de Ruta del Hidrógeno, la Ley 2099 de 2021 formalizó el reconocimiento del hidrógeno, definiendo al hidrógeno verde como Fuente No Convencional de Energía Renovable y

al hidrógeno azul con CCS como fuente de bajas emisiones. También, se incluyó un CONPES de hidrógeno los cuales establecen metas para la producción y exportación.

Según la Hoja de Ruta del Hidrógeno, la ley 2099 extiende los incentivos tributarios (deducción en renta, exclusión de IVA, exención de aranceles, depreciación acelerada) a las inversiones en el sector productivo de hidrógeno verde y azul, lo cual significa que los proyectos de electrólisis, plantas de reformado con CCS, equipos e investigación asociada recibirán grandes beneficios fiscales.

### ***6.2.2 Competitividad de Colombia mediante el hidrógeno***

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), Colombia se encuentra posicionada en el cuarto lugar a nivel mundial en costos globales de hidrógeno verde, impulsada por sus energías renovables con bajo costo. El objetivo es alcanzar un costo nivelado de hidrógeno aproximadamente de 1,7 – 3,1 USD/H<sub>2</sub> para las potenciales energías, ya que el valor actual de producción se encuentra entre 4 – 6 USD/H<sub>2</sub>.

El Min. Energías indica que un HUB de hidrógeno se entiende como un centro estratégico en el que convergen actividades de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, facilitando el suministro hacia diversos mercados y aplicaciones. Estos hubs permiten analizar de manera comparativa la viabilidad técnica y económica de diferentes tecnologías y localizaciones en el país. En este marco, los estudios de costo nivelado de hidrógeno (LCOH) muestran variaciones importantes según el lugar y la tecnología utilizada. Actualmente, el LCOH varía significativamente por ubicación y tecnología: desde 3,24 USD/H<sub>2</sub> (Hub Barranquilla) hasta 8,06 USD/H<sub>2</sub> (Hub Manizales). Un estudio realizado por Velasquez-Jaramillo et al. (2024) encontró que el caso de energía eólica onshore con electrolizador de agua alcalina tuvo el LCOH más bajo a 7 USD/H<sub>2</sub>.

También, existen desafíos que limitan la capacidad de crecimiento inmediata, como lo son los siguientes aspectos.

**6.2.2.1 Infraestructura y tecnología.** Colombia carece de plantas industriales para la producción de SAF y e-SAF (Patiño et al., 2023). Los equipos utilizados para la electrólisis todavía son muy elevados. Esto contribuye a que los proyectos de hidrógeno requieran un capital de inversión (CAPEX) considerablemente alto (ANDI Colombia, 2021). PROCOLOMBIA del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, indica que Colombia cuenta con más de 7.500 km de gasoducto y la Asociación Colombiana de Escuelas de Ingeniería (ACOFI) resalta que el llevar por estas tuberías o redes mixtas el hidrógeno puede dañar algunos metales por fragilización.

**6.2.2.2 Regulación técnica y seguridad.** El Ministerio de Minas y Energía debe establecer los lineamientos generales para el almacenamiento de  $CO_2$  en el subsuelo para todos los sectores de la economía, con el fin de almacenarlo de manera segura y permanente en el subsuelo o usarlo como insumo en diferentes procesos productivos. No existe una legislación específica que contemple las propiedades únicas y los riesgos asociados al hidrógeno, lo que genera vacíos significativos en la gestión de riesgos. Si bien la normativa sobre sustancias peligrosas aplica, no es directa ni específica para el hidrógeno (Min. Energía, 2025).

**6.2.2.3 Costos iniciales.** El New Climate Institutud en su estudio *The landscape of green hydrogen in Colombia* junto con PROCOLOMBIA, proyectan una importante inversión pública y privada entre 2,5 y 5,5 billones de USD, primordialmente para electrolizadores e infraestructura de captura y almacenamiento del dióxido de carbono.

### ***6.2.3 Impacto de las rutas de hidrógeno en la descarbonización de hidrocarburos.***

El sector de hidrocarburos, específicamente el sector de refinación utiliza cerca de 150 kt anuales de hidrógeno gris producido a partir de gas natural o carbón sin captura de carbono (Min.

Energía, 2021). La contribución a la descarbonización de este sector varía significativamente según la ruta de producción.

**6.2.3.1 Hidrógeno gris.** Actualmente, su aporte es nulo dado a que el principal método usado generando aproximadamente 9,5 y 20 kg  $CO_2/H_2$  a partir de gas natural y carbón respectivamente, pero es el punto de partida que se busca reemplazar (Min. Energía, 2021).

**6.2.3.2 Hidrógeno azul.** El Ministerio de Minas y Energía presenta una reducción en emisiones entre 1 y 2  $CO_2/H_2$  al aplicar la tecnología de captura, utilización y almacenamiento de carbono, actúa como un combustible de transición y permite una descarbonización temprana de los procesos de refinación, junto con ANDI Colombia resaltan este paso mediante un aprovechamiento de la infraestructura existente, el CAPEX ya invertido y el know-how experto de la industria petrolera y del gas en el país, en este momento es el puente tecnológico al hidrógeno verde.

**6.2.3.3 Hidrógeno verde.** La Hoja de Ruta de Hidrógeno en Colombia define que la producción a partir de fuentes no convencionales de energía renovable mediante electrolizadores será a largo plazo el máximo vector en la demanda de bajas emisiones en el país. Se espera que sea la alternativa más competitiva a partir de 2040 en todo el territorio.

Actualmente, ya se han realizado pilotos para su uso en refinerías para mejorar la calidad de los combustibles (Ecopetrol, 2023).

La estrategia nacional se enfoca, mediante la Hoja de Ruta de Hidrógeno, en reducir drásticamente los costos para alcanzar la competitividad global, obteniendo un costo competitivo con un aumento en los precios de  $CO_2$ , el cual tiene una estimación máxima de 2 USD/kg. La competitividad del hidrógeno de bajas emisiones se desarrollará en las fases de mediano y largo plazo con una transición de hidrógeno azul a verde, El  $H_2$  azul a partir de gasificación de carbón

o reformado de gas natural resultaría más competitivo que el  $H_2$  Gris a partir de 2035, debido al aumento esperado de los precios del  $CO_2$  y el descenso de costos de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. La selección de zonas con factores de planta elevados, como la Guajira, con vientos que superan el 60% de factor de planta, es fundamental, ya que puede reducir los costos de producción hasta en un 25%.

El componente energético representa cerca del 80% del costo total de producción del hidrógeno verde. Por lo tanto, el rápido descenso en los costos de la energía solar fotovoltaica y eólica es un factor clave que impulsa la producción (ANDI Colombia, 2021).

El hidrógeno complementa otras renovables como la solar y eólica, que son intermitentes. En términos de potencial de producción a partir de los recursos actuales de generación eléctrica, se espera que la energía hidroeléctrica tenga la mayor contribución, segundo la energía solar y por último la energía solar (Morimitsu et al., 2025).

## 7. Conclusiones

Los resultados obtenidos, después de la revisión sistemática de la literatura y el análisis cualitativo y cuantitativo de datos de costos e impactos ambientales actuales, muestran una gran diferencia entre la madurez económica y la sostenibilidad ambiental de las vías de producción de hidrógeno. Se puede observar que la mayor parte del hidrógeno mundial se produce a partir de combustibles fósiles ya que es más barato, pero genera mucho  $CO_2$ . Por otra parte, las tecnologías de hidrógeno limpio, como lo son verde, rosa y/o turquesa, tienen muy bajas o nulas emisiones, pero con altos costes de producción, tecnologías inmaduras, en fases iniciales de investigación y desarrollo.

El estudio de viabilidad muestra que la transformación hacia un sistema energético global descarbonizado basado en hidrógeno se enfrenta a barreras importantes por falta de inversiones y la necesidad de mejorar la eficiencia y reducir los costes de las tecnologías limpias. A pesar del crecimiento de las inversiones anunciadas en proyectos de hidrógeno limpio, solo una pequeña parte de la capacidad prevista ha llegado a una decisión final de inversión o se está construyendo.

El hidrógeno azul (SMR/ATR con CCS) podría ser una opción intermedia para disminuir las emisiones sin renunciar a la competitividad económica. Por lo tanto, las rutas tradicionales seguirán siendo dominantes en el corto plazo, pero tendrán que incluir CCS para un equilibrio entre la producción y la sostenibilidad energética.

Colombia ve el hidrógeno como un vector estratégico clave para su transición energética, aprovechando su gran potencial de recursos renovables (eólica en La Guajira, solar y grandes cuencas hidroeléctricas) y reservas fósiles que permiten rutas de transición mediante hidrógeno azul mientras se escala el verde. En el corto plazo el hidrógeno producido desde fósiles con CCS

actuará como puente, mientras que el hidrógeno verde mediante la electrólisis con renovables ganará competitividad conforme bajen los costos de energía y equipos, que se espera sea la alternativa más competitiva y el máximo vector de bajas emisiones para el país a partir de 2040.

## 8. Recomendaciones

Implementar tecnologías para capturar carbono en procesos convencionales (SMR con CCS), porque investigaciones señalan que la captura de  $CO_2$  en el reformado de metano puede disminuir las emisiones del proceso hasta un 69%.

Con el fin de lograr que la viabilidad económica y la reducción de emisiones, es necesario desarrollar e implementar regulaciones para la producción para fortalecer la sostenibilidad energética en el sector.

Para que el hidrógeno sea un pilar en un futuro sustentable, se debe trabajar en varios frentes. Primero, la implementación de tecnologías de CCS en procesos convencionales es fundamental, ya que se puede reducir hasta un 69% de las emisiones. Segundo, es crucial establecer regulaciones claras y específicas que cubran la producción, el manejo seguro y el almacenamiento de  $CO_2$  en el subsuelo, ya que hoy existen vacíos normativos en cuanto a las propiedades únicas del hidrógeno. También es vital estudiar a fondo la infraestructura, especialmente en lo que concierne a la seguridad de la red de gasoductos existentes para el transporte de hidrógeno en redes mixtas ya que puede causar fragilización en algunos metales para mitigar ese riesgo.

**Referencias Bibliográficas**

- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Rafa, N., Musharrat, A., Lam, S. S., & Boretti, A. (2021). Sustainable hydrogen production: Technological advancements and economic analysis. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 47(88), 37227-37255. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.029>
- Al-Ghussain, L., Ahmad, A. D., Abubaker, A. M., Hovi, K., Hassan, M. A., & Annuk, A. (2022). Techno-economic feasibility of hybrid PV/wind/battery/thermal storage trigeneration system: Toward 100% energy independency and green hydrogen production. *Energy Reports*, 9, 752-772. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.034>
- AlHumaidan, F. S., Halabi, M. A., Rana, M. S., & Vinoba, M. (2023). Blue hydrogen: Current status and future technologies. *Energy Conversion and Management*, 283, 116840. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116840>
- ANDI Colombia. (2021, 4 marzo). El futuro del hidrógeno en Colombia [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=s47QbBnGmFY>
- Arcos, J. M. M., & Santos, D. M. F. (2023). The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases*, 3(1), 25-46. <https://doi.org/10.3390/gases3010002>
- Asociación Hidrógeno Colombia. (2025). Panorama del hidrógeno verde en Colombia. <https://hidrogenocolombia.com/wp-content/uploads/2025/05/Reporte-de-Proyectos-2025-Resumen-Ejeutivo.pdf>

- Avargani, V. M., Zendejboudi, S., Duan, X., & Maarof, H. A. (2025). Advancements in non-renewable and hybrid hydrogen production: Technological innovations for efficiency and carbon reduction. *Fuel*, 395, 135065. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135065>
- Aydin, M. I., Karaca, A. E., Qureshy, A. M., & Dincer, I. (2020). A comparative review on clean hydrogen production from wastewaters. *Journal Of Environmental Management*, 279, 111793. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111793>
- Azizimehr, B., Armaghani, T., Ghasemiasl, R., Nejadian, A. K., & Javadi, M. A. (2024b). A comprehensive review of recent developments in hydrogen production methods using a new parameter. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 72, 716-729. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.219>
- Bartlett, J., & Krupnick, A. (2020). Decarbonized hydrogen in the US power and industrial sectors: Identifying and incentivizing opportunities to lower emissions. En *Resources For The Future*. [https://media.rff.org/documents/RFF\\_Report\\_2025\\_Decarbonized\\_Hydrogen.pdf](https://media.rff.org/documents/RFF_Report_2025_Decarbonized_Hydrogen.pdf)
- Baykara, S. Z., (2004). Experimental solar water thermolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(14), 1459–1469. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2004.02.011>
- Brijaldo, María H., Castillo, Cristian, & Pérez, Gerónimo. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *Ingeniería y competitividad*, 23(2), e30211155. Epub May 18, 2021. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.11155>
- Carlos Quinteros, M. A. (2022). Análisis del grado de sostenibilidad entre procesos de producción de hidrógeno.
- Contreras, M. (2024). Cost and environmental impact of photoelectrochemical hydrogen production from waste brine [University of Iowa]. <https://doi.org/10.25820/etd.007692>

- Di Giuliano, A., & Gallucci, K. (2018). Sorption enhanced steam methane reforming based on nickel and calcium looping: a review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 130, 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.06.021>
- Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094-11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Domínguez, S., Cifuentes, B., Bustamante, F., Cantillo, N. M., Barraza-Botet, C. L., & Cobo, M. (2022). On the Potential of Blue Hydrogen Production in Colombia: A Fossil Resource-Based Assessment for Low-Emission Hydrogen. *Sustainability*, 14(18), 11436. <https://doi.org/10.3390/su141811436>
- Dumančić, A., Vlahinić, N., & Skok, M. (2024). Replacing Gray Hydrogen with Renewable Hydrogen at the Consumption Location Using the Example of the Existing Fertilizer Plant. *Sustainability*, 16(15), 6437. <https://doi.org/10.3390/su16156437>
- Ecopetrol. (2023). Innovación, Desarrollo e Investigación  
El hidrógeno. Prolongación Fernando el Santo. Obtenido de centro nacional de hidrogeno <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- Energy Institute (EI). (2025). Statistical Review of World Energy (74.<sup>a</sup> ed.). Recuperado de <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Fan, G., Zhang, H., Sun, B., & Pan, F. (2025). Economic and environmental competitiveness of multiple hydrogen production pathways in China. *Nature Communications*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59412-y>

- Fernández, J. A. M., Mendoza, W. A. B., & Consuegra, H. D. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. Fuentes: El reventón energético, 20(1), 57-72.
- Fernández-Valverde, S., (2010). Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México; Capítulo 28. Hidrógeno como energético y materiales para celdas de combustible., México.
- IEA (2024), Global Hydrogen Review 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, Licence: CC BY 4.0
- Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. Energy Conversion And Management, 291, 117294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>
- Ji, M., & Wang, J. (2021). Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 46(78), 38612-38635. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142>
- Jorquera, O., Hernández, J., & Herrera, L. (2003). Producción biofotolítica de hidrógeno.
- Jose, Y. P. J., & Yeferson, T. R. (2023, November 16). *Estudio de prefactibilidad técnica y financiera para la producción de hidrógeno gris mediante el proceso reformado de metano con vapor en el campo San Francisco*. <https://repositoriousco.co/handle/123456789/5515?mode=full>
- Kumar, R., Kumar, A., & Pal, A. (2020). An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods. *Materials Today Proceedings*, 46, 5353-5359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.793>

- Linares Hurtado, J. I., & Moratilla Soria, B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía: Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI y Universidad Pontificia Comillas. ISBN 978-84-932772-9-1.
- Mehmood, H., Akbar, H., Nilsalab, P., & Gheewala, S. H. (2024). Exploring the spectrum: an environmental examination of hydrogen's diverse colors. *Energy Advances*.  
<https://doi.org/10.1039/d4ya00570h>
- Min. Energía. (2025). Análisis de las cadenas de valor de derivados del hidrógeno y la regulación habilitante en Colombia. Ministerio de Minas y Energía, Ecosistema H2 Colombia.  
[https://www.minenergia.gov.co/documents/14249/60.Consultoria\\_IDOM\\_Cadena\\_valor\\_H2\\_derivados.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/14249/60.Consultoria_IDOM_Cadena_valor_H2_derivados.pdf)
- Minglin Xu, Størker T. Moe, Inga Marie Aasen, Magne Hillestad. (2025) Techno-economic analysis of CO<sub>2</sub>-based gas fermentation for acetic acid production. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. Volume 101 <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103210>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia.
- Morante, J. R., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada—Fundación Naturgy.
- Morimitsu, D. T., López López, J. F., & Tibaquirá, J. E. (2025). Factibilidad de producción y uso de hidrógeno verde en Colombia. ACOFI.
- Mosinska, M., Szyrkowska, M. I., & Mierczynski, P. (2020). Oxy-Steam Reforming of Natural Gas on Ni Catalysts—A minireview. *Catalysts*, 10(8), 896.  
<https://doi.org/10.3390/catal10080896>
- Patiño, J. J., Velásquez, C., Ramirez, E., Betancur, R., Montoya, J. F., Chica, E., Romero-Gómez, P., Kannan, A. M., Ramírez, D., Eusse, P., & Jaramillo, F. (2023). Renewable

- Energy Sources for Green Hydrogen Generation in Colombia and Applicable Case of Studies. *Energies*, 16(23), 7809. <https://doi.org/10.3390/en16237809>
- Patlolla, S. R., Katsu, K., Sharafian, A., Wei, K., Herrera, O. E., & Mérida, W. (2023). A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113323>
- Patlolla, S. R., Katsu, K., Sharafian, A., Wei, K., Herrera, O. E., & Mérida, W. (2023). A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113323>
- Puig-Samper, G., Bargiacchi, E., Iribarren, D., & Dufour, J. (2024). Life-cycle assessment of hydrogen systems: a systematic review and meta-regression analysis. *Journal Of Cleaner Production*, 470, 143330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143330>
- Ramirez Sossa, M. (2023). Evaluación de factibilidad para la producción de hidrógeno a partir de energía eólica en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Rasheed, T., Shafi, S., Anwar, M. T., Khurshid, H., Naveed, A., Alshoaibi, A., Alnaim, N., Liu, Y., & Sherazi, T. A. (2025). Greener hydrogen production and storage revolution towards a low-carbon future: an overview of current scenarios and future prospects. *Fuel*, 405, 136519. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136519>
- Sampson, J. (2024). *Hydrogen Insights 2024*. Hydrogen Council. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2024/>
- Shimura, K., Kato, S., Yoshida, T., Itoh, H., Hattori, T., & Yoshida, H. (2010). Photocatalytic Steam Reforming of Methane over Sodium Tantalate. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(8), 3493–3503. <https://doi.org/10.1021/jp902761x>

- Siddiqui, O., & Dincer, I. (2019). A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 44(12), 5773-5786. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.118>
- Suleman, F., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2016). Comparative impact assessment study of various hydrogen production methods in terms of emissions. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 41(19), 8364-8375. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.225>
- Szablowski, L., Wojcik, M., & Dybinski, O. (2025). Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy*, 134540. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540>
- Talapko, D., Talapko, J., Erić, I., & Škrlec, I. (2023). Biological Hydrogen Production from Biowaste Using Dark Fermentation, Storage and Transportation. *Energies*, 16(8), 3321. <https://doi.org/10.3390/en16083321>
- Valencia-Botero, M. J., & Cardona-Alzate, C. A. (2013). Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno como combustible del futuro. *Revista Cubana de Química*, XXV(2),165-179.[fecha de Consulta 29 de Mayo de 2025]. ISSN: 0258-5995. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543735007>
- Velasquez-Jaramillo, M., García, J., & Vasco-Echeverri, O. (2024). Techno economic model to analyze the prospects of hydrogen production in Colombia. *International Journal Of Thermofluids*, 22, 100597. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100597>
- Zheng, Y., Wei, Y., Li, K., Zhu, X., Wang, H., & Wang, Y. (2014). Chemical-looping steam methane reforming over macroporous CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> solid solution: Effect of calcination temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(25), 13361-13368. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.116>

Zoulias, E., Varkaraki, E., Lymberopoulos, N., Christodoulou, C. N., & Karagiorgis, G. N. (2004).

A review on water electrolysis. *Tcjst*, 4(2), 41-71.