

HIDRÓGENO Y SU ARCOÍRIS TECNOLÓGICO: ANÁLISIS DE LAS RUTAS DE PRODUCCIÓN BASADAS EN SU HUELLA AMBIENTAL Y VIABILIDAD SOSTENIBLE.

Esdras J. Calvo Ramírez^a, Josué Chanona Soto^b, P.J. Sebastian^c

^a Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables, Universidad Politécnica de Chiapas, C.P. 29150 Suchiapa, Chiapas, México.

^b Universidad Politécnica de Chiapas, C.P. 29150 Suchiapa, Chiapas, México.

^c Instituto de Energías Renovables-UNAM, Bioenergía, C.P. 62580, Temixco, Morelos, México.

Autor de correspondencia: esdrascalvo775@gmail.com

RESUMEN

El hidrógeno se consolida como un vector energético clave en la transición hacia sistemas sostenibles, con una demanda global que alcanzó 97 millones de toneladas de producción en 2023 y se proyecta en 100 millones de toneladas para 2024, impulsada por aplicaciones industriales como la refinación de petróleo y la producción de amoníaco (Energy Agency, 2024). Sin embargo, la problemática principal radica en su dependencia del hidrógeno gris, derivado de combustibles fósiles, que genera aproximadamente 900-920 millones de toneladas de CO₂ anuales, equivalentes al 2.5% de las emisiones globales (Roy et al., 2025). El objetivo de este análisis es comparar críticamente las rutas de producción clasificadas por colores, evaluando sus procesos, huella ambiental, madurez tecnológica y desafíos. Los hallazgos clave revelan que rutas fósiles como el gris y negro/marrón dominan con altas emisiones (9.3-26 kg CO₂-eq/kg H₂), mientras que el verde ofrece emisiones mínimas (0.09-7.19 kg CO₂-eq/kg H₂) pero

enfrenta trade-offs en consumo de agua y minerales. Tecnologías puente como el azul reducen emisiones a 3.46-8.12 kg CO₂-eq/kg H₂. En conclusión, la transición acelerada hacia el verde es esencial para descarbonizar, aunque requiere innovación para mitigar impactos secundarios y escalar producción a 530 millones de toneladas para 2050 (Hermesmann & Müller, 2022)

Palabras claves: Hidrógeno, vector energético, colores del hidrógeno, producción de hidrógeno.

INTRODUCCIÓN

El hidrógeno emerge como un vector energético versátil y de alta densidad, capaz de descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada y el transporte de larga distancia, alineándose con los objetivos del Acuerdo de París para limitar el calentamiento global (Roy et al., 2025; Squadrito et al., 2023). Su potencial radica en su capacidad para almacenar y transportar energía renovable, contribuyendo potencialmente

al 6% de las reducciones globales de emisiones para 2050 (Roy et al., 2025). No obstante, la paradoja actual del hidrógeno reside en su doble rol: como solución climática prometedor y como contribuyente significativo a las emisiones de gases de efecto invernadero. La producción global, que alcanzó 97 millones de toneladas en 2023 con proyecciones de 100 millones para 2024, se basa predominantemente en combustibles fósiles, generando 900-920 millones de toneladas de CO₂ anuales, equivalentes al 2.5% de las emisiones mundiales (Energy Agency, 2024). Esta dependencia del reformado de metano (76%) y la gasificación de carbón (23%) subraya la urgencia de transitar hacia rutas sostenibles, con demandas proyectadas en 530 millones de toneladas para 2050 (Hermesmann & Müller, 2022)

La clasificación por colores del hidrógeno, una convención que refleja su origen, materia prima y huella ambiental, facilita la evaluación crítica de su sostenibilidad (Incer-Valverde et al., 2023). Colores como gris y negro denotan variantes fósiles altamente emisoras, mientras que verde y azul representan opciones de bajas emisiones, integrando análisis de ciclo de vida para considerar impactos más allá de las emisiones directas, como el consumo de agua y minerales (Maniscalco et al., 2024). Esta justificación analítica por colores es esencial para desmitificar las rutas de producción, identificando trade-offs entre costo, madurez tecnológica y viabilidad ambiental. El presente análisis compara críticamente estas variantes, basándose en literatura reciente, para destacar rutas prometedoras y barreras, promoviendo una transición informada

hacia una economía del hidrógeno descarbonizada.

Análisis por Colores del Hidrógeno

El hidrógeno gris constituye la base actual del mercado. Se produce mediante el Reformado de Metano con Vapor (SMR), un proceso que utiliza gas natural y libera CO₂ directamente a la atmósfera. Su costo es bajo (0.7–2.3 USD/kg) y su madurez tecnológica es alta (TRL 9) (Hermesmann & Müller, 2022) pero su huella de carbono oscila entre 9.3 y 13.4 kgCO₂-eq/kgH₂ (Maniscalco et al., 2024). Una variante aún más contaminante es el hidrógeno negro o marrón, obtenido por gasificación de carbón (bituminoso o lignito), con emisiones de hasta 26 kgCO₂-eq/kgH₂, concentradas principalmente en China (Energy Agency, 2024)

En el grupo de tecnologías de transición se encuentra el hidrógeno azul, que mantiene la base del proceso SMR, pero integra sistemas de Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS). Dependiendo de la tasa de captura (56–90 %), su huella se reduce a entre 3.46 y 8.12 kgCO₂-eq/kgH₂ (Roy et al., 2025). No obstante, enfrenta limitaciones por costos elevados y la falta de infraestructura para el almacenamiento seguro de CO₂ (Incer-Valverde et al., 2023). El hidrógeno turquesa representa una innovación prometedor: a través de la pirólisis de metano, descompone el CH₄ en hidrógeno y carbono sólido, evitando la emisión directa de CO₂ (Hermesmann & Müller, 2022). Su viabilidad económica depende de la valorización del carbono sólido, aunque su madurez tecnológica aún es baja (TRL 4–6)

El hidrógeno verde, producido por electrólisis del agua con energía

renovable, representa la opción más sostenible. Su huella de carbono varía entre 0.1 y 7 kgCO₂-eq/kgH₂ según la fuente eléctrica, y su costo ronda 1.9–8.2 USD/kgH₂ (Energy Agency, 2024). No obstante, enfrenta barreras de costos, consumo hídrico (≈30 kgH₂O/kgH₂) y limitaciones derivadas de la intermitencia renovable. El hidrógeno rosa o rojo, generado mediante energía nuclear, comparte la baja huella del verde (0.1–0.8 kgCO₂-eq/kgH₂), pero su aceptación pública y costos iniciales son problemáticos (Fernández-Arias et al., 2024).

El hidrógeno naranja implica estimulación in situ mediante inyección de agua o CO₂ en rocas reactivas, generando hidrógeno y secuestrando carbono (Osselin et al., 2022).

Su GWP es bajo (≈0 kg CO₂-eq/kg H₂ con secuestro), pero su TRL 1-3 refleja etapa conceptual, con desafíos en control de reacciones subterráneas (Osselin et al., 2022).

Finalmente, el hidrógeno amarillo destaca como una subcategoría del verde, impulsado exclusivamente por energía solar, mientras que el blanco o dorado —de origen geológico natural— ofrece una promesa futura aún incipiente (Makky et al., 2025; Weißensteiner, 2025). El descubrimiento de yacimientos naturales en Malí y Australia sugiere un nuevo paradigma de ‘hidrógeno natural’ con emisiones casi nulas, aunque su explotación comercial está en fase exploratoria (Stalker et al., 2022).

Análisis Comparativo Integral

La clasificación por colores pone de manifiesto las drásticas diferencias en el impacto ambiental, la viabilidad económica y el grado de desarrollo de cada ruta de producción. Un análisis comparativo de sus métricas clave (resumido en la Tabla 1) revela los patrones y las complejas compensaciones (trade-offs) inherentes a la transición del hidrógeno.

Tabla. 1. Análisis comparativo de rutas de producción de hidrógeno.

Color	Proceso Principal	Huella de Carbono (kg CO ₂ -eq/kg H ₂)	Madurez Tecnológica (TRL)	Consumo de Agua (kg H ₂ O/kg H ₂)	Estado de Desarrollo
Gris	Reformado de metano con vapor (SMR)	9.3 – 13.4	9	11.7	Comercial dominante
Negro/Marrón	Gasificación de carbón	18 – 26	9	8 – 12	Uso concentrado en China
Azul	SMR + CCUS	3.5 – 8.1	7–8	≈12	Tecnología de transición
Turquesa	Pirólisis de metano	3.9 – 6.4	5–6	≈10	Desarrollo piloto

Verde	Electrólisis renovable	0.1 – 7	8–9	≈30	Expansión acelerada
Rosa/Rojo	Electrólisis nuclear	0.1 – 0.8	7–9	≈30	Producción constante (carga base)
Amarillo	Electrólisis solar	2.9 – 7.2	7	≈30	En fase demostrativa
Blanco/Dorado	Origen geológico natural	~0	1–3	N/A	Exploración temprana

El análisis comparativo revela un patrón claro: las rutas basadas en combustibles fósiles (gris, negro) presentan las mayores emisiones, mientras que las rutas renovables (verde, rosa, amarillo) muestran huellas casi nulas pero a un costo económico y energético superior. El hidrógeno azul y turquesa funcionan como soluciones intermedias, reduciendo significativamente las emisiones sin requerir una transición tecnológica completa. Sin embargo, su dependencia de los combustibles fósiles limita su sostenibilidad a largo plazo. La viabilidad de cada método depende no solo de su huella de carbono, sino también de factores regionales como la disponibilidad de agua, infraestructura energética y políticas de apoyo.

CONCLUSIÓN

El espectro del hidrógeno representa un abanico de soluciones que reflejan la tensión entre viabilidad económica y sostenibilidad ambiental. Actualmente, la producción mundial sigue dominada por el hidrógeno gris, lo que impide que este vector cumpla plenamente su potencial climático. A corto plazo, el hidrógeno azul y turquesa ofrecen un camino realista para reducir las emisiones, mientras se

construyen las bases técnicas y logísticas para una expansión del hidrógeno verde. A largo plazo, la electrólisis renovable, complementada por fuentes nucleares y solares, constituirá la columna vertebral de una economía del hidrógeno neutra en carbono. Para lograrlo, será necesario acelerar la innovación tecnológica, optimizar los costos y promover marcos regulatorios internacionales que garanticen una transición justa y eficiente hacia un futuro energético sostenible.

REFERENCIAS

- Energy Agency, I. (2024). Global Hydrogen Review 2024. www.iea.org
- Fernández-Arias, P., Antón-Sancho, Á., Lampropoulos, G., & Vergara, D. (2024). Emerging Trends and Challenges in Pink Hydrogen Research. *Energies*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/en17102291>
- Hermesmann, M., & Müller, T. E. (2022). Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 90). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996>
- Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 291).

- Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>
- Makky, A. Al, Kanjo, H. A., Salameh, T., Hamid, A. K., & Hussein, M. (2025). Performance analysis of yellow hydrogen production in the UAE. *Energy Conversion and Management: X*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100888>
- Maniscalco, M. P., Longo, S., Cellura, M., Micciché, G., & Ferraro, M. (2024). Critical Review of Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Pathways. In *Environments - MDPI* (Vol. 11, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/environments11060108>
- Osselin, F., Soullaine, C., Fauguerolles, C., Gaucher, E. C., Scaillet, B., & Pichavant, M. (2022). Orange hydrogen is the new green. *Nature Geoscience*, 15(10), 765–769. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01043-9>
- Roy, R., Antonini, G., Hayibo, K. S., Rahman, M. M., Khan, S., Tian, W., Boutilier, M. S. H., Zhang, W., Zheng, Y., Bassi, A., & Pearce, J. M. (2025). Comparative techno-environmental analysis of grey, blue, green/yellow and pale-blue hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 116, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.104>
- Squadrito, G., Maggio, G., & Nicita, A. (2023). The green hydrogen revolution. *Renewable Energy*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119041>
- Stalker, L., Talukder, A., Strand, J., Josh, M., & Faiz, M. (2022). Gold (hydrogen) rush: risks and uncertainties in exploring for naturally occurring hydrogen. *The APPEA Journal*, 62(1), 361–380. <https://doi.org/10.1071/aj21130>
- Weißensteiner, F. (2025). Competitiveness of green and yellow Hydrogen: A project-level analysis. *Journal of Cleaner Production*, 496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144998>