

La Frontera del Hidrógeno Geológico: Hacia un Nuevo Paradigma de Soberanía Energética en México

José Gregorio Martínez-Osorio ^{1,2,*}, M.M.M. Contreras-Turrubiarres ²

¹ Gerencia de Especialidad en Exploración, Dirección de Exploración y Producción, Instituto Mexicano del Petróleo, Ciudad de México, México.

² Programa de Doctorado en Energías Renovables, Universidad del Centro Panamericano de Estudios Superiores (UNICEPES), Zitácuaro, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: jmosorio@imp.mx, josegregorio2006@gmail.com; Tel.: (+52) 5518410457

Artículo de divulgación científica

Recibido: 13 de abril de 2026

Aceptado: 27 de junio de 2026

Publicado: 24 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.704>

Resumen: Este artículo analiza el potencial del Hidrógeno Geológico como una alternativa para fortalecer la soberanía energética en México. A través de una revisión analítica y documental, se examinan los mecanismos de generación abiótica (serpentinización y radiólisis) que caracterizan al subsuelo como un sistema dinámico de producción de gas. Se introduce el concepto de "miopía epistemológica" para explicar cómo los sesgos históricos y metodológicos de la industria energética tradicional han limitado la detección de este recurso. El análisis geológico identifica regiones como Sonora y la Península de Vizcaíno con condiciones favorables para albergar sistemas de hidrógeno, con costos de producción proyectados (LCOH) que sugieren una lata competitividad económica frente a las fuentes convencionales. Finalmente, se propone la necesidad de integrar técnicas de geofísica minera en la exploración y desarrollar una "ontología jurídica del gas primario" para regular el recurso de manera efectiva. Se concluye que el aprovechamiento del Hidrógeno Geológico permitiría a México capitalizar su patrimonio geológico en favor de una transición energética sustentable y con mayor independencia tecnológica.

Palabras clave: hidrógeno geológico, soberanía energética, miopía epistemológica, sistemas multigenéticos, transición energética

Introducción

Durante el último siglo, la humanidad ha cimentado su progreso sobre la base de los combustibles fósiles. Sin embargo, la urgencia climática actual obliga a buscar alternativas técnica y económicamente viables. En este escenario, el hidrógeno se posiciona como una de las alternativas más relevantes dentro de la transición energética. Es fundamental distinguir que, mientras la industria se ha centrado en "fabricar" hidrógeno mediante procesos industriales (como el hidrógeno verde, producido por electricidad renovable, o el azul, derivado del gas con captura de carbono), el Hidrógeno Geológico, también conocido como blanco, nativo, abiótico o natural, es aquel que la naturaleza produce de forma espontánea en el subsuelo mediante reacciones químicas naturales, sin intervención humana para su fabricación. (Zgonnik, 2020).

A nivel global, el descubrimiento de sistemas de hidrógeno de alta pureza en lugares como Malí ha disparado una carrera tecnológica comparable a la intensa actividad exploratoria del siglo XIX (Hand, 2023). Para México, país con una herencia geológica privilegiada y una infraestructura energética consolidada, entender este fenómeno es una necesidad estratégica para alcanzar una soberanía energética genuina y responsable. No obstante, este aprovechamiento no depende únicamente de la identificación de sus mecanismos geoquímicos, sino de una reconfiguración técnica de la exploración y de la creación de leyes y normas que reconozcan la singularidad de este gas.

Desarrollo

Del dogma fósil al hallazgo fortuito

Históricamente, los avances energéticos se basan en el paradigma biogénico, el cual sostiene que los recursos del subsuelo son el resultado exclusivo de la degradación de materia orgánica bajo condiciones de presión y temperatura. Esta visión consolidó la idea de que el hidrógeno, debido a su alta reactividad y volatilidad, no podía existir en estado libre y puro en yacimientos naturales. Sin embargo, investigaciones recientes y la relectura de datos geofísicos han rescatado las teorías de la génesis abiótica, sugiriendo que el interior de la Tierra opera como un laboratorio incesante donde el agua y los minerales reaccionan de manera independiente a la vida biológica. Este cambio de perspectiva

permite reclasificar al hidrógeno no como un subproducto industrial, sino como un fluido natural que ha estado presente en la dinámica del planeta desde su formación, permaneciendo oculto bajo una estructura que solo estaba diseñada para detectar hidrocarburos convencionales.

El punto de inflexión que transformó esta teoría en una realidad económica ocurrió en 1987 en Bourakébougou, Malí. Durante la perforación de un pozo en busca de agua, se interceptó un flujo de gas que, tras una explosión fortuita, reveló ser hidrógeno natural (geológico) con una pureza superior al 98%. Este evento no solo desafió las leyes de la geología económica tradicional, sino que demostró que el hidrógeno puede acumularse en entornos imprevistos. En México, los datos actuales muestran que las zonas sin producción de hidrocarburos tradicionales poseen un potencial de generación de hidrógeno que podría superar las reservas energéticas conocidas hasta hoy, ya que los datos existentes sugieren un potencial de generación significativo que amerita una evaluación profunda.

El reactor terrestre y la limitación instrumental previa

Para comprender la magnitud de la energía disponible debemos adentrarnos en dos procesos principales que generan hidrógeno en el subsuelo de manera continua: la serpentinización y la radiólisis (Arvizu-Gutiérrez e Iriondo, 2009).

A diferencia de otros procesos geoquímicos, la radiólisis funciona como un proceso de generación continua impulsado por la desintegración de elementos radiactivos: la disgregación natural de elementos como el Uranio, el Torio y el Potasio en la corteza terrestre, emiten energía capaz de romper las moléculas de agua para liberar hidrógeno. Este fenómeno es estratégico para México, ya que el hidrógeno no depende de procesos geológicos que conlleven millones de años, sino que corresponde a procesos que ocurren a escala humana, en este caso a la radiación natural de las rocas.

Por otro lado, la serpentinización ocurre cuando el agua entra en contacto con fragmentos de rocas ultramáficas (rocas muy antiguas y profundas, ricas en hierro, que son el ingrediente principal para la fabricación natural de hidrógeno) que fueron incorporadas a nuestra corteza continental por el movimiento de las placas tectónicas, y que liberan moléculas de hidrógeno en una suerte de "fábrica" de flujo continuo. La presencia de fracturas profundas permite que estos gases viajen desde las profundidades hacia la superficie de forma silenciosa e independiente de la actividad térmica superficial. La Figura 1 ilustra este proceso.

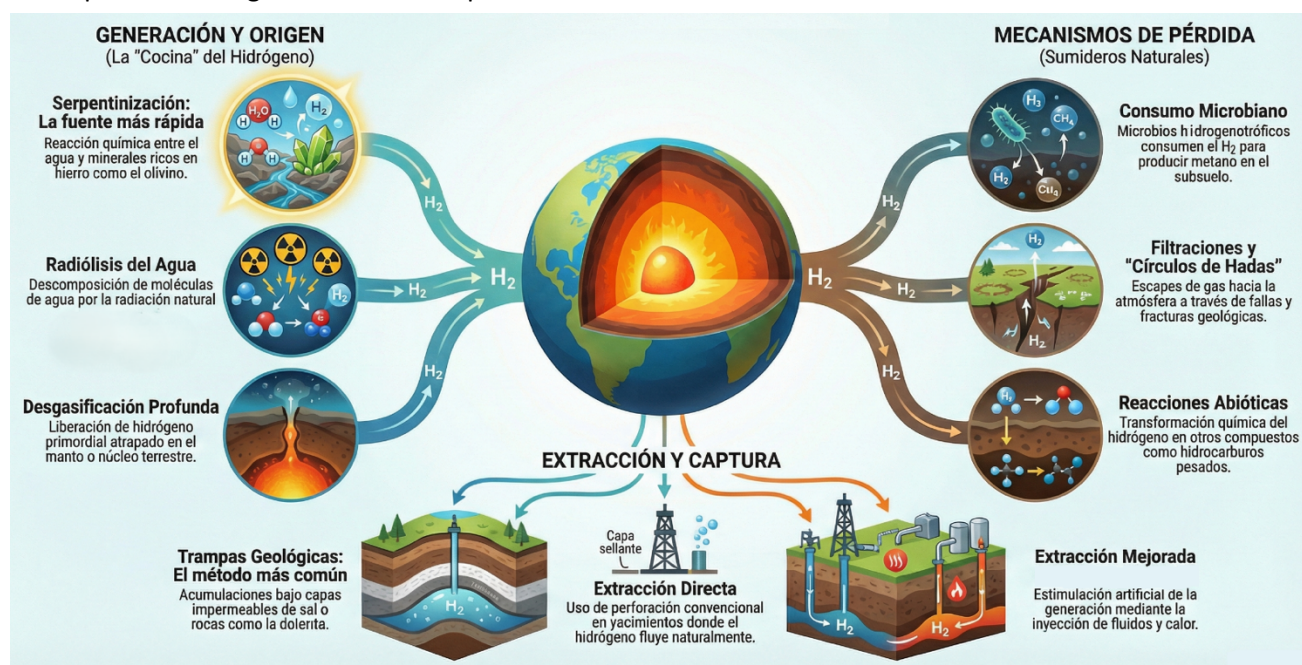


Figura 1. Anatomía de un sistema de Hidrógeno Geológico: mecanismos de generación en el subsuelo, migración estructural profunda y manifestaciones superficiales. Elaboración propia con base en Hand (2023).

Bajo esta lógica, la viabilidad del recurso en territorio nacional no depende de un evento aislado, sino del balance entre fuentes de generación y mecanismos de pérdida. Mientras la radiólisis y la serpentinización aportan un flujo constante,

el éxito del sistema está condicionado por la capacidad de retención del subsuelo. Debido a la volatilidad extrema del hidrógeno, este puede disiparse a través de fallas o ser consumido por actividad microbiana (proceso conocido como consumo biótico, donde microorganismos del subsuelo “alimentan” sus funciones vitales con el hidrógeno antes de que podamos extraerlo) antes de alcanzar la superficie.

Por lo tanto, la exploración estratégica debe identificar no solo dónde se genera el gas, sino dónde el ritmo de carga del reactor terrestre supera las tasas de filtración natural, asegurando además la existencia de sellos geológicos (capas de roca impermeables, como evaporitas o cuerpos salinos, que actúan como una “tapa” para evitar que el hidrógeno escape hacia la atmósfera), capaces de mitigar su fuga. La dinámica y complejidad de este recurso se sistematiza en la Tabla 1.

Tabla 1. Dinámica Sistémica del Hidrógeno Geológico

Fase / Componente	Mecánica / Proceso	Mecanismos de operación y factores clave
Generación (Carga)	Serpentinización	Reacción de óxido-reducción (intercambio de energía química) en rocas ultramáficas. El Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} (formando el mineral llamado magnetita) y, al mismo tiempo rompiendo químicamente el agua para liberar H_2 . La temperatura exacta que se necesita para que esto ocurra está en el intervalo de 200°C – 320°C
	Radiólisis	La radiación natural y constante que emiten elementos atrapados en la tierra (como el Uranio, el Torio y el Potasio) actúa como un choque de energía invisible sobre el agua subterránea. Este impacto rompe las moléculas de agua y libera hidrógeno de forma separada. Es un proceso sumamente lento, pero que ocurre sin detenerse dentro de las grandes masas de rocas.
	Origen Profundo	Gases y minerales cargados de hidrógeno viajan desde el manto y el núcleo de la Tierra hacia la superficie. Para lograrlo, aprovechan las grietas más profundas de nuestro planeta como si fueran carreteras directas hacia la superficie
Migración (Tránsito)	Enlace Advectivo (Conexión por corrientes)	El hidrógeno no se limita a flotar o filtrarse lentamente a través de la tierra. En su lugar, aprovecha las grietas y fallas activas del subsuelo como si fueran verdaderas autopistas, lo que le permite viajar hacia la superficie a gran velocidad en forma de corrientes rápidas
	Difusividad	Debido a que el hidrógeno es un gas diminuto y muy ligero, tiene una velocidad de escape enorme. Esto exige que la fábrica de gas bajo tierra y el lugar donde se almacena estén muy cerca; de lo contrario, el gas simplemente se perdería. Cuando este gas logra subir en grandes cantidades, se filtra hasta el suelo y genera anomalías visibles en la superficie conocidas como “Círculos de Hadas” (Fairy Circles), que son zonas circulares donde la vegetación cambia o se seca
Retención (Sello)	Integridad Capilar	Requiere sellos de alta presión capilar como domos salinos o intrusiones ígneas (doleritas) con baja densidad de fracturas
Acumulación	Recarga Dinámica	El yacimiento opera como un sistema de flujo continuo donde la tasa de generación equilibra la extracción (validado por presión constante en el yacimiento de Malí)
Pérdida (Sumideros)	Consumo Biótico	Los microbios consumen el hidrógeno cerca de la superficie y lo transforman de forma natural en gas metano (CH_4)
	Interacción Abiótica	Una parte del hidrógeno no logra salir a la superficie porque sufre transformaciones químicas en el camino. Al hacer contacto con otros elementos subterráneos, el gas cambia de forma y se convierte en minerales o incluso en combustibles artificiales, mediante un proceso químico muy conocido llamado reacción de Fischer-Tropsch

Nota: Esta síntesis se basa en estudios científicos recientes que cambian por completo lo que sabíamos sobre la energía del subsuelo. Tradicionalmente se pensaba que el gas se quedaba atrapado en bolsas fijas y se agotaba al sacarlo (como el petróleo). Sin embargo, el Hidrógeno Geológico funciona de otra forma: la Tierra lo produce de manera continua, como una fábrica abierta que nunca se detiene. El gas viaja a gran velocidad a través de las grietas del suelo (fallas) y recarga los pozos constantemente. Esto significa que una buena gestión del recurso podría traducirse en una energía que podría durar por generaciones, tal como ya se ha comprobado con éxito en pozos reales en África (Bourakébougou).

La estructura y los pasos técnicos detallados en la Tabla 1 no son una ocurrencia; están basados firmemente en las investigaciones científicas, quienes respaldan y validan cada fase del sistema:

Generación (Carga): Se apoya en las simulaciones termodinámicas de Arrouvel y Prinzhofer (2021), quienes establecen las temperaturas claves (ventanas térmicas críticas) para la serpentización, y en las revisiones exhaustivas de Zgonnik (2020) y Ellis y Gelman (2024), que integran los mecanismos de radiólisis y desgasificación primordial como fuentes inagotables.

Migración y Tránsito: La idea de que el gas simplemente flota y sube despacio ha quedado atrás. Hoy en día, los científicos prefieren hablar de una “conexión por corrientes” o enlace advectivo. Esto se basa en los descubrimientos de Pasquet *et al.* (2023) y Jackson *et al.* (2024), quienes demostraron que el hidrógeno viaja a toda velocidad aprovechando las grietas y fallas activas de la Tierra, logrando salir a la superficie mucho antes de alcanzar a perderse o evaporarse.

Retención y Sello: Debido a que la molécula de hidrógeno es la más pequeña y ligera del universo, se escapa con una facilidad asombrosa a través de casi cualquier material. Los investigadores Bauer *et al.* (2024) y Maiga *et al.* (2024) estudiaron qué tipo de suelos son capaces de frenar a este gas 'escapista'. Sus análisis demostraron que ciertas rocas volcánicas muy densas (como las doleritas) y las grandes montañas subterráneas de sal (domos salinos) funcionan como escudos perfectos, logrando atraparlo de forma segura bajo tierra.

Acumulación y Recarga: Esta fase es el núcleo de la viabilidad económica del sistema, fundamentada en el trabajo de Maiga *et al.* (2024) y Prinzhofer (2018) sobre el caso de Malí, donde se prueba que los yacimientos pueden recargarse en tiempo real.

Pérdida (Sumideros): Por último, hay que tomar en cuenta que el hidrógeno atrapado bajo tierra sirve como alimento para ciertos microorganismos y bacterias, los cuales consumen el gas poco a poco. Este proceso de desaparición biológica, documentado por Gregory *et al.* (2019) y Zgonnik (2020), es clave porque determina cuánto tiempo puede conservarse realmente el hidrógeno guardado en la naturaleza antes de que se agote.

México con su compleja arquitectura tectónica posee los ingredientes geológicos para albergar estos sistemas multigenéticos (contextos geológicos donde el gas proviene de varias fuentes de origen a la vez), sin embargo, surge una pregunta obligada: si este gas es tan abundante, ¿por qué no lo vimos antes? La respuesta reside en lo que podemos llamar una “miopía epistemológica”, es decir sesgos metodológicos históricos. Durante décadas, la industria energética ignoró el hidrógeno en la exploración petrolera, clasificándolo como un error instrumental o contaminante logístico (Castro-Leyva y Valdés-Pérez, 1992). Esta ceguera no solo fue sensorial, sino metodológica. Perforamos buscando el rastro del carbono, mientras el Hidrógeno Geológico permanecía en el punto ciego de nuestra tecnología. Esta omisión nos impidió reconocer que sus “ventanas de generación” se encuentran a profundidades antes consideradas carentes de valor energético, descartando la presencia de un recurso de alto valor energético por la falta de herramientas de detección adecuadas. Por ello, el futuro de la prospección del hidrógeno natural reside en un modelo híbrido: una integración estratégica que combine la experiencia de la industria petrolera con las técnicas de precisión de la geofísica minera.

Tendencias y la nueva frontera exploratoria

La tendencia actual en energías renovables desplaza el foco desde la manufactura industrial hacia la eficiencia del yacimiento natural. Como se observa en la Figura 2, el Hidrógeno Geológico se diferencia por su baja intensidad de carbono y su origen primario. Esta asimetría económica es contundente: mientras las rutas industriales dependen de la volatilidad del costo eléctrico, este tipo de hidrógeno proyecta un costo promedio de producción (LCOH) de entre 0.48 y 1.20 USD/kg durante la vida útil de un proyecto.

La matriz clasifica las rutas de producción según su materia prima e impacto ambiental. Se distinguen dos grandes categorías:

- *Hidrógeno Geológico (Blanco)*: Obtenido mediante extracción directa (serpentinización/radiólisis). Se caracteriza por emisiones nulas al ser un proceso natural del subsuelo.
- *Rutas Industriales de Alta Intensidad (Gris/Marrón)*: Derivadas de combustibles fósiles (metano/carbón) mediante reformado o gasificación, con altas emisiones de CO₂.
- *Rutas de Transición y Bajas Emisiones (Azul/Turquesa)*: Basadas en gas natural, pero con tecnologías de mitigación como la captura de carbono (CCUS) o pirólisis de metano.
- *Rutas Electrolíticas (Verde/Rosa/Amarillo)*: Producidas por electrólisis del agua. El hidrógeno Verde (energías renovables) alcanza cero emisiones, mientras que el Rosa (nuclear) se considera de emisiones nulas en términos de gases de efecto invernadero.
- *Ruta Orgánica (Dorado)*: Generado por degradación microbiana en pozos agotados (depletados), con balance de emisiones nulas o neutras.

HIDRÓGENO: EL ELEMENTO Y EL VECTOR ENERGÉTICO

PROPIEDADES GENERALES DEL HIDRÓGENO



Elemento más simple
y ligero (Nº Atómico
1, Masa 1.008)



Sustancia más
abundante del universo
(75% de la materia visible)



Muy reactivo, poderoso
agente reductor (ej.
hidruros NaH, H₂S)



Incoloro, inodoro, no
tóxico y altamente
combustible

LA MATRIZ DE COLORES DEL HIDRÓGENO



MATRIZ ANALÍTICA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y EMISIONES DE GEI

Color	Fuente de Energía / Materia Prima	Método de Producción Principal	Alcance de Emisiones de GEI
Blanco	Natural (Geológico)	Extracción directa (principalmente: Serpentinización / Radiólisis)	Nulas (Proceso natural)
Gris	Gas natural (Metano)	Reformado de metano con vapor (SMR) Oxidación parcial	Altas (Emisiones de de CO ₂)
Marrón	Carbón (Lignito)	Reformado autotérmico Gasificación de carbón Gasificación de biomasa	Muy Altas (Emisiones de CO ₂)
Azul	Gas natural	Reformado autotérmico Oxidación parcial SMR con Captura y Almacenamiento de Carbono (CCUS)	Bajas (Captura parcial de CO ₂ , no es totalmente efectiva)
Turquesa	Gas natural (Metano)	Pirólisis de metano (produce carbono sólido)	Bajas/Nulas (No genera CO ₂ , se obtiene carbón sólido, según la fuente desde la que se impulse la pirólisis)
Rosa	Energía Nuclear	Electrólisis del agua	Nulas (Residuos radiactivos, no genera gases de efecto invernadero, [GEI])
Amarillo	Fuentes mixtas de generación de electricidad	Electrólisis del agua	Variables (Según la mezcla energética usada para generar la electricidad)
Verde	Energías Renovables	Electrólisis del agua	Cero Emisiones
Dorado	Orgánica (Microbios / Depósitos agotados)	Degradación microbiana en pozos de petróleo	Nulas / Neutras

Figura 2. Comparativa de la intensidad de carbono y métodos de obtención. Elaboración propia con base en la categorización técnica de la International Energy Agency (IEA, 2025).

La competitividad mostrada en la Figura 2, permite que esta variante sea la única capaz de alcanzar la “paridad de red”; es decir, el punto donde el costo de generar Hidrógeno Geológico es igual o menor al costo de la electricidad o los combustibles convencionales que ya usamos, posicionándose como un recurso estratégico que no requiere de los subsidios gubernamentales que hoy sostienen a la industria del hidrógeno verde o azul. La Figura 3 muestra una comparativa del costo nivelado del hidrógeno (LCOH) por ruta de obtención.

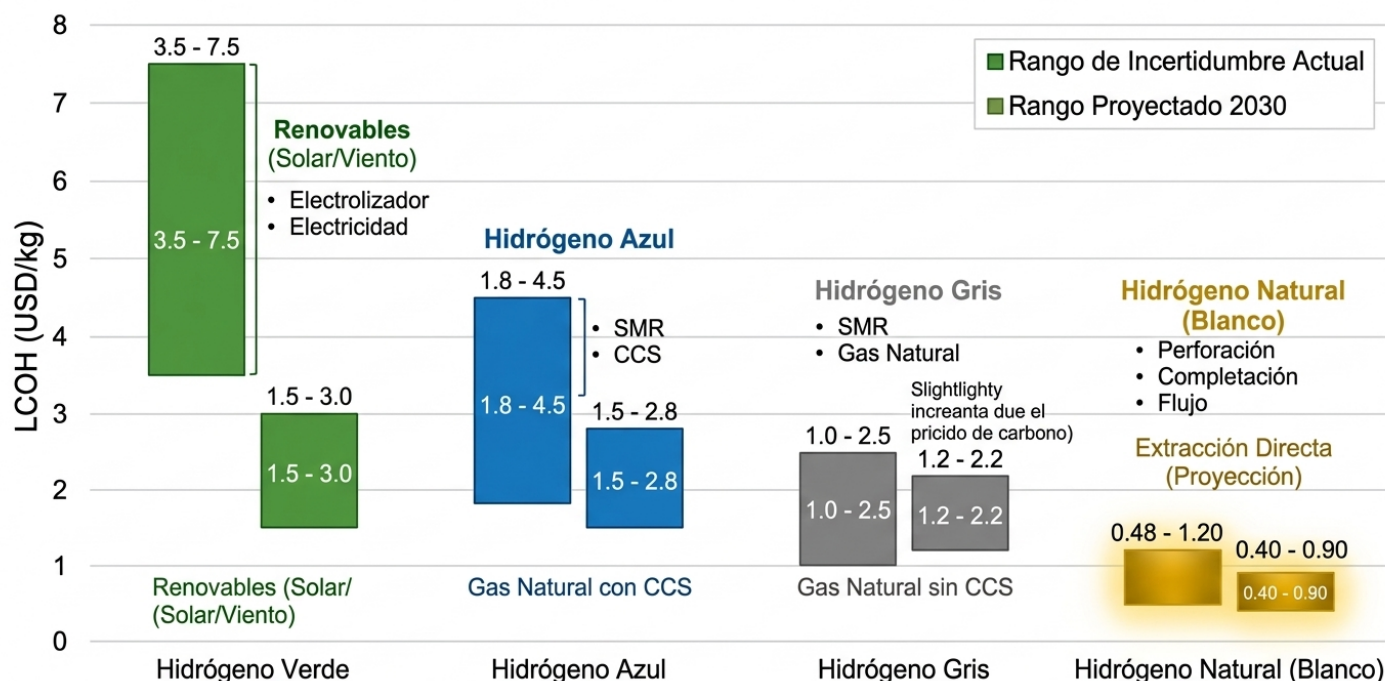


Figura 3. Comparativa del Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH) por ruta de obtención, destacando la asimetría económica del Hidrógeno Geológico (natural). Elaboración propia con datos adaptados de Moretti (2024) y proyecciones de la IEA (2025).

Los rangos de costo nivelado (LCOH) de 0.48 a 1.20 USD/kg para el Hidrógeno Geológico se basan en la ausencia de gastos de capital (CAPEX) en tecnologías de síntesis, como electrolizadores o sistemas de captura de carbono (CCS), y en la eliminación de la dependencia del precio de la electricidad renovable. Es importante notar que estos valores son estimaciones globales reportadas en la literatura, las cuales varían según la profundidad del yacimiento, la pureza del flujo, la escala de extracción, la madurez tecnológica y la proximidad a la infraestructura de transporte.

Este cambio de enfoque nos lleva a una inflexión conceptual: la búsqueda de hidrógeno blanco se parece más a la prospección minera que a la extracción petrolera tradicional. Mientras que el petróleo es un “stock” (un depósito estático que se agota tras su extracción), el Hidrógeno Geológico se comporta a menudo como un “flujo” renovable a escala humana. Esta distinción es fundamental, ya que las reacciones de serpentización y radiólisis en el subsuelo son procesos activos que ocurren en el presente; no se detuvieron hace millones de años. Por lo tanto, bajo las condiciones geológicas adecuadas, los sitios de extracción podrían experimentar una recarga continua, permitiendo que el yacimiento se reponga en tiempos comparables a una generación humana y no en eras geológicas.

En este escenario, México no solo estaría explotando un recurso, sino gestionando un reactor natural en constante funcionamiento. Esto transforma la infraestructura nacional; ya no se trata solo de bombear un yacimiento hasta vaciarlo, sino de “cosechar” un flujo continuo que garantiza una longevidad operativa superior. Regiones como Sonora y la Península de Vizcaíno en Baja California, se perfilan como áreas de alto interés exploratorio, representando una hipótesis de trabajo. La presencia documentada de complejos máficos (ricos en hierro y magnesio) y de cratones graníticos con potencial radiactivo, aporta la química necesaria para disparar la serpentización y la radiólisis. Estas formaciones actúan como el “combustible sólido” de un sistema que podría integrarse a la matriz energética nacional mediante técnicas de geofísica minera de alta resolución (Arvizu-Gutiérrez e Iriondo, 2009). Asimismo, estas zonas

cuentan con fallas profundas que sirven como vías de migración para que los gases viajen desde las profundidades hacia la superficie.

Es preciso señalar que, a diferencia de casos documentados como el de Bourakébougou en Malí, el potencial del Hidrógeno Geológico en territorio mexicano es, hasta el momento, inferido a partir de condiciones geológicas favorables. Actualmente, no se dispone de mediciones directas de flujos comerciales en superficie; sin embargo, la presencia de la química necesaria (hierro y radiación natural) y la arquitectura tectónica del país sustentan una sólida hipótesis de trabajo que requiere validación mediante campañas de medición directa en campo.

El obstáculo invisible: El marco legal

A pesar del brillo técnico de esta nueva energía, existe un muro que aún debemos derribar: la barrera del derecho. En México, actualmente la Ley de Hidrocarburos define al “gas” a partir de compuestos de carbono, lo que sitúa al hidrógeno abiótico en un vacío normativo, haciendo que el Hidrógeno Geológico caiga en una zona de ambigüedad jurídica que desincentiva la inversión estratégica.

Esta distinción técnica no solo permitiría establecer reglas claras para su exploración similares a las de otros recursos, sino que habilitaría el tránsito hacia una gestión de flujos energéticos sostenibles, en lugar de un modelo extractivo de agotamiento. Así, al proteger el recurso como un bien inalienable y soberano, México daría el paso definitivo para armonizar el sector energético con los preceptos de propiedad del subsuelo establecidos en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Conclusiones

El Hidrógeno Geológico no representa simplemente una nueva pieza en el rompecabezas de las energías limpias; es el catalizador de un cambio de paradigma que desafía nuestra comprensión histórica de la riqueza nacional. Los modelos geológicos sugieren que México posee condiciones propicias para el recurso, sin embargo, ha carecido de los marcos conceptuales para identificarlo. Al superar la “miopía epistemológica” que nos mantuvo anclados exclusivamente al carbono, abrimos la puerta a una era donde la energía no depende de procesos industriales costosos, sino de la dinámica geoquímica activa de nuestro propio territorio.

La viabilidad de este recurso en regiones como Sonora y Baja California obliga a actuar con celeridad en dos frentes críticos. En el ámbito técnico, resulta imperativo hibridar la prospección geofísica minera con el análisis retrospectivo de datos de pozos existentes, estableciendo una metodología que priorice la identificación de la cinética de generación (radiólisis y serpentización) y la integridad de los sistemas de retención frente al riesgo de consumo biótico. Desde la perspectiva jurídica, dado que la actual Ley de Hidrocarburos limita su alcance a compuestos de carbono, planteamos la adopción de una “Ontología Jurídica del Gas Primario” para reconocer al Hidrógeno Geológico como un recurso extractivo primario. Este ajuste normativo liderado por el Estado es un requisito previo para que el potencial técnico se traduzca en una contribución real a la soberanía, la sustentabilidad y la seguridad energética nacional, evitando afirmaciones categóricas hasta contar con una validación regulatoria plena.

En última instancia, el despertar del Hidrógeno Geológico en México es un llamado a la reconciliación entre la técnica y la naturaleza. La transición energética soberana se alcanzará mediante el aprovechamiento del reactor terrestre que late en nuestro subsuelo. Es momento de que México asuma su papel como líder en la frontera de la energía natural, transformando su herencia geológica en el motor de un futuro descarbonizado y plenamente independiente.

Declaración del uso de IA: Para el refinamiento lingüístico y la coherencia interna de este artículo de divulgación se utilizó el modelo Gemini 1.5 de Google. La autoría intelectual, la interpretación de los datos y la postura científica corresponden íntegramente a los investigadores.

Bibliografía

Arrouvel, C., & Prinzhofer, A. (2021). Genesis of natural hydrogen: New insights from thermodynamic simulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(35), 18780-18794.

- Arvizu-Gutiérrez, J. J., & Iriondo, A. (2009). Evaluación del potencial de generación de hidrógeno natural en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(3), 643–652.
- Bauer, J. F., Amro, M. M., Nassan, T., & Alkan, H. (2024). Reservoir engineering aspects of geologic hydrogen storage. *International Petroleum Technology Conference*. <https://doi.org/10.2523/IPTC-23943-MS>
- Castro-Leyva, M., & Valdés-Pérez, A. (1992). *Caracterización de fluidos abióticos en complejos ultramáficos mexicanos*. Instituto Mexicano del Petróleo.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (2024). *Artículo 27 y 28 relativos a la propiedad de los recursos del subsuelo*. Diario Oficial de la Federación.
- Ellis, G. S., & Gelman, S. E. (2024). Model predictions of global geologic hydrogen resources. *Science Advances*, 10(50), eado0955.
- Gregory, S. P., Barnett, M. J., Field, L. P., & Milodowski, A. E. (2019). Subsurface microbial hydrogen cycling: Natural occurrence and implications for industry. *Microorganisms*, 7(2), 53.
- Hand, E. (2023). Hidden hydrogen: Earth may hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel. *Science*, 379(6633), 630–636. <https://doi.org/10.1126/science.adh1477>
- International Energy Agency. (2025). *World Energy Outlook 2025*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- Jackson, O., Lawrence, S. R., Hutchinson, I. P., Stocks, A. E., Barnicoat, A. C., & Powney, M. (2024). Natural hydrogen: Sources, systems and exploration plays. *Geoenergy*, 2(1), geoenergy2024-002.
- Ley del Sector Hidrocarburos. (2025). *Ley del Sector Hidrocarburos*. Diario Oficial de la Federación.
- Maiga, O., Deville, E., Laval, J., Prinzhofer, A., & Diallo, A. B. (2024). Trapping processes of large volumes of natural hydrogen in the subsurface: The emblematic case of the Bourakebougou H2 field in Mali. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 640-647.
- Moretti, I. (2024). *Natural hydrogen: A new source of energy?* Oxford Institute for Energy Studies.
- Pasquet, G., Idriss, A. M., Ronjon-Magand, L., Ranchou-Peyruse, M., Guignard, M., Duttine, M., Ranchou-Peyruse, A., & Moretti, I. (2023). Natural hydrogen potential and basaltic alteration in the Asal–Ghoubbet rift, Republic of Djibouti. *BSGF - Earth Sciences Bulletin*, 194, 9.
- Prinzhofer, A., Cissé, C. S. T., & Diallo, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(42), 19315-19326.
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geosciences of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>