

# Oro Blanco

La nueva frontera energética del subsuelo

2026



**Ciencias**



PSL  
PROANÁLISIS  
S.A.S BIC.

**HPO Global** 

**Copyright:**

**Cartilla de estudio sobre la exploración de hidrogeno natural**

Publicado por: PSL Proanálisis SAS BIC,  
HPO Global Resources Ventures Inc  
Bogotá D.C., 110931, Colombia

Copyright © 2025 PSL Proanálisis SAS BIC, HPO Global Resources Ventures Inc

Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida en ninguna forma o por ningún medio, sin permiso previo por escrito de los titulares de los derechos de autor.

**Todas las consultas sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deben dirigirse a:**

Publicaciones  
Carrera 68D 25B 86, Torre Central Davivienda, Oficina 625  
Bogotá D.C., 110931  
Colombia

Email: salim.shalom@hpoglobalinc.com  
comercial2@pslproanalisis.com

**Diseñado y producido por:**

PSL Proanálisis SAS BIC, Floridablanca, Santander  
HPO Global Resources Ventures Inc . Bogota D.C.

**Director de Proyecto:**

Dr. Eugenio Jaramillo

**Estructurador:**

Msc. Salim Salon

**Coautores:**

Msc. Cesar Mora

Jose Gordillo

Msc. Juan Pardo

Msc. Fabian Gallego

Andres Ochoa

Msc. Mary Piragauta

Msc. Jhon Salon

Henry Ramirez

Nota: Esta cartilla de estudio se redacta en el marco del contrato 058-2025 para la "identificación, caracterización y modelamiento de filtraciones de hidrógeno natural en el área de influencia de la Falla de Ibagué: Desarrollo y validación de un avance tecnológico integrado en Colombia".

# El Hidrógeno Natural como fuente de energía



**“El hidrógeno ( $H_2$ ) es un recurso energético presente de forma natural en el subsuelo, cuya explotación permite producir energía sin emisiones directas de carbono”.**

## INTRODUCCIÓN

La búsqueda de fuentes de energía sostenibles y de baja emisión de carbono se ha convertido en uno de los desafíos más urgentes de la sociedad moderna ante la amenaza del cambio climático. En este panorama, el hidrógeno natural (también conocido como hidrógeno blanco o geológico) surge como un recurso potencialmente transformador que redefine nuestra posición frente a la transición energética. A diferencia del hidrógeno producido industrialmente mediante métodos que suelen ser costosos o contaminantes, este gas se genera de forma continua en el subsuelo mediante procesos geoquímicos y bióticos, lo que lo posiciona como una fuente de energía primaria.

Durante décadas, la importancia del hidrógeno geológico fue ignorada bajo la creencia de que su alta difusividad y reactividad impedían su acumulación en la corteza terrestre. Sin embargo, el conocimiento científico actual ha dado un giro drástico tras el descubrimiento de acumulaciones naturales y flujos continuos en diversos entornos geológicos, siendo el campo de Bourakébougou en Malí, África el primer ejemplo de explotación industrial exitosa con purezas del 98%.

Estos hallazgos confirman que el subsuelo es capaz de suministrar energía limpia de manera inagotable y a un costo significativamente menor (estimado entre \$0.5 y \$1 por kg) que las tecnologías convencionales como la electrólisis o el reformado de metano.

El estudio de este recurso representa una nueva frontera científica que exige la integración de conocimientos avanzados en geología, geofísica y geoquímica. Adentrarse en la exploración del hidrógeno natural no solo implica dominar las técnicas de detección y medición en superficie, sino también comprender la dinámica de un sistema que conecta las profundidades del manto con la biósfera superficial.

La capacidad de identificar las señales sutiles que el hidrógeno deja en el paisaje y en el suelo es hoy una competencia vital para liderar el desarrollo de una industria energética totalmente libre de carbono. A continuación, descubrirás qué es el hidrógeno natural, cómo se forma, las técnicas de vanguardia para explorarlo y por qué podría convertirse en una de las claves para el futuro energético de países como Colombia.

**“La exploración de hidrógeno natural está en su infancia, de manera similar a la exploración de petróleo y gas a finales del siglo XIX”**

-[1]

**$H_2$  - “ORO BLANCO”**

# ¿Qué es el Hidrógeno natural?

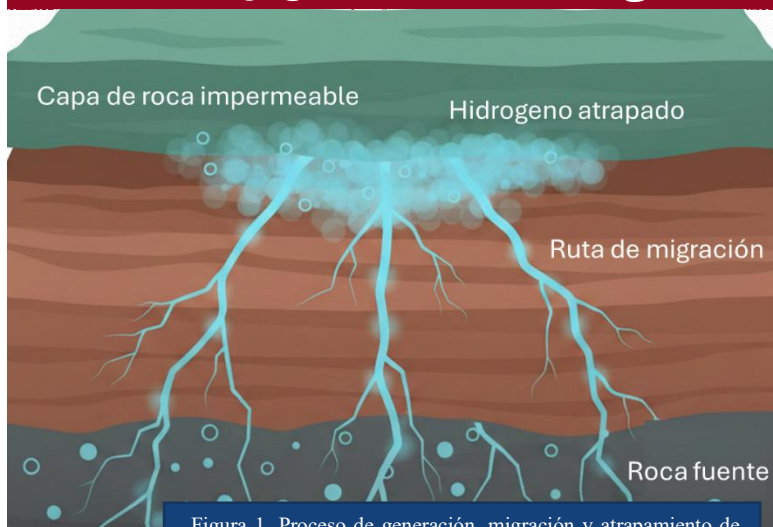


Figura 1. Proceso de generación, migración y atrapamiento de hidrógeno en el subsuelo.

El hidrógeno natural es el hidrógeno molecular ( $H_2$ ) que ocurre y se acumula de forma espontánea en la Tierra. A diferencia del hidrógeno industrial (gris, azul o verde), que es un "vector energético" (requiere otra energía para ser producido), el hidrógeno natural es una fuente de energía primaria que ya existe en el subsuelo.

A diferencia de los combustibles fósiles, que requieren millones de años para acumularse, el hidrógeno natural se produce de manera continua en el subsuelo por reacciones geoquímicas.

Estudios realizados en formaciones geológicas han confirmado liberaciones ininterrumpidas de gas durante periodos prolongados; por ejemplo, en Chimaera (Turquía), se han detectado flujos de hidrógeno activos por más de 2000 años [5]

Un caso emblemático es el campo de Bourakébougou en Malí, donde los pozos han producido hidrógeno con una pureza del 98% de manera

**"El hidrógeno natural es energía primaria y vector energético."**

-[2]

constante desde 2012 [3] sin que se observe una disminución significativa en la presión del yacimiento, lo que sugiere una recarga natural continua. Debido a esto, el hidrógeno natural se clasifica como una fuente de energía renovable y sostenible.

El hidrógeno es la molécula más pequeña, ligera y difusiva de todos los gases, lo que le otorga una movilidad extrema en el subsuelo. Su capacidad de migración se manifiesta a través de fallas, fisuras y fracturas en la corteza terrestre.

A pesar de su difusividad, puede quedar atrapado bajo barreras impermeables (sellos), formando reservorios similares a los de petróleo o gas. Rocas como la halita (sal) o intrusiones de dolerita actúan como sellos que impiden que el gas escape hacia la atmósfera [4].

## ¿Por qué el Hidrógeno natural es importante para el futuro energético?

El hidrógeno natural se ha convertido en un recurso fundamental para la transición energética porque su combustión genera únicamente vapor de agua, lo que permite reducir drásticamente la huella de carbono en sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada (siderurgia, refinación), la producción de amoníaco y el transporte de larga distancia.

Se estima que el costo de explotación del hidrógeno natural podría ser significativamente menor a 1 USD por kg, lo que lo hace mucho más competitivo que el hidrógeno verde

producido por electrólisis (aprox. 8 USD/kg) o el hidrógeno azul derivado de combustibles fósiles (aprox. 2 USD/kg) [6].

Investigaciones recientes sugieren que las reservas en la corteza terrestre podrían ser vastas, estimándose que solo la litósfera continental precámbrica podría generar alrededor de 554 millones de toneladas anuales [7]. Se han identificado manifestaciones en más de 30 países, incluyendo Australia, Brasil, Estados Unidos, Francia, Namibia y Colombia. Su explotación permite a los

países acceder a un recurso autóctono y limpio sin depender de grandes infraestructuras de electrólisis que requieren enormes cantidades de electricidad renovable y agua potable.

El hidrógeno puede ser mezclado con gas natural para calefacción doméstica, además de ser transportado aprovechando la infraestructura actual. Además, los mismos reservorios geológicos donde se encuentra ofrecen una gran capacidad para el almacenamiento a gran escala de  $H_2$  producido por otras fuentes.

# ¿Como se origina el Hidrógeno Natural?

La generación de hidrógeno natural ocurre a través de una amplia variedad de procesos en el subsuelo, los cuales se clasifican generalmente en mecanismos abióticos (geológicos) y bióticos.

## Mecanismos Geológicos (Abióticos)

**Serpentinización:** Es considerado el mecanismo más significativo y estudiado. Ocurre cuando el agua interactúa con rocas ultramáficas (pobres en sílice y ricas en minerales ferromagnesianos como el olivino y el piroxeno). Durante la reacción, el hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) se oxida a hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), mientras que el agua se reduce para formar hidrógeno molecular ( $\text{H}_2$ ) y minerales secundarios como la serpentinita y la magnetita. Las temperaturas óptimas para este proceso se sitúan entre los 200 y 310 °C.

**Radiólisis del agua:** Consiste en la disociación de las moléculas de agua debido a la energía de la radiación ionizante (partículas alfa, beta y rayos gamma) emitida por el decaimiento radiactivo natural de elementos como el uranio (U), torio (Th) y potasio (K) presentes en la corteza. Este mecanismo es particularmente relevante en entornos de basamento cristalino precámbrico.

**Desgasificación del manto o núcleo:** Se refiere a la liberación de hidrógeno primordial que ha estado en el interior de la Tierra desde su formación y que migra progresivamente hacia la superficie a través de fallas profundas o zonas de rift.

**Cataclasis o procesos mecanorradicales:** Ocurre en zonas de fallas activas donde el esfuerzo tectónico rompe los enlaces químicos de los silicatos (como el Si-O), generando radicales libres en las superficies frescas de las rocas que reaccionan con el agua para liberar  $\text{H}_2$ .

**Maduración tardía de la materia orgánica:** A temperaturas elevadas (generalmente por encima de los 200 °C), la pirólisis térmica de carbón o lutitas ricas en materia orgánica puede romper los enlaces C-H y liberar hidrógeno gaseoso.

**Otras reacciones minerales:** Incluyen la oxidación del hierro en otros contextos (como en las Formaciones de Hierro Bandeado o BIF), la formación de pirita a partir de sulfuros y agua, o la reacción de calcio metálico (producto del decaimiento del potasio-40) con agua.

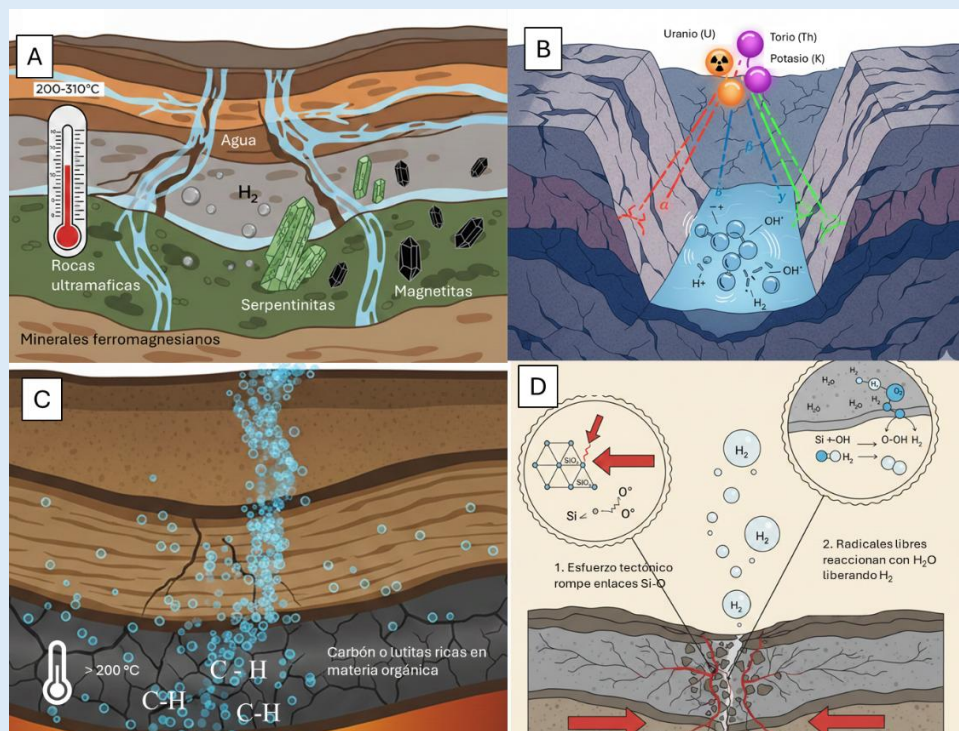


Figura 2. Principales procesos de formación de  $\text{H}_2$  natural en el subsuelo por mecanismos geológicos (A) Serpentinización, (B) Radiólisis del agua, (C) Maduración tardía de la materia orgánica, (D) Cataclasis o procesos mecanorradicales

# ¿Como se origina el Hidrógeno Natural?

## Mecanismos Bióticos (Microbianos)

Muchos microorganismos producen hidrógeno como parte de su metabolismo, aunque en la naturaleza este hidrógeno suele ser consumido rápidamente por otras comunidades (como los metanógenos o reductores de sulfato), lo que lo convierte a menudo en un producto transitorio.

**Fermentación:** Microorganismos anaerobios descomponen materia orgánica compleja (como carbohidratos) en compuestos más simples, liberando  $H_2$  y  $CO_2$  como subproductos.

**Fijación de nitrógeno:** El hidrógeno es un subproducto obligado de la reacción catalizada por

la enzima nitrogenasa cuando los microorganismos (como los presentes en los nódulos de las leguminosas o ciertas cianobacterias) convierten el nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) en amoníaco ( $NH_3$ ).

**Oxidación anaeróbica de CO:** Algunos procariontes pueden utilizar la reacción de desplazamiento de gas de agua ( $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ) para obtener energía, generando hidrógeno en el proceso.

**Oxidación de fosfito:** Se ha observado en laboratorio que microorganismos como *Escherichia coli* pueden generar hidrógeno durante la oxidación de fosfito a fosfato bajo condiciones anaerobias.

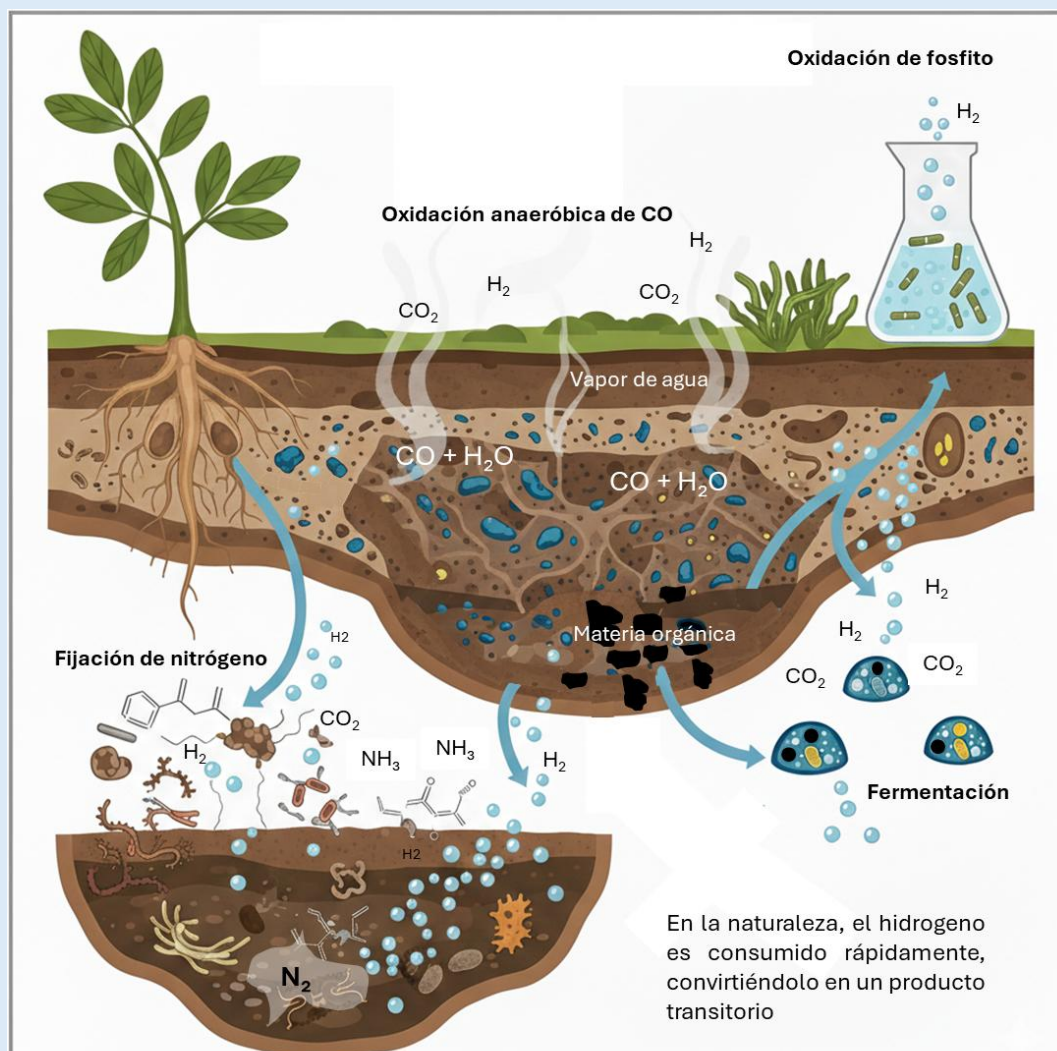


Figura 3. Principales procesos de formación del hidrogeno natural en el subsuelo por mecanismos bióticos

## ¿Como se extrae el H<sub>2</sub> Natural del subsuelo?

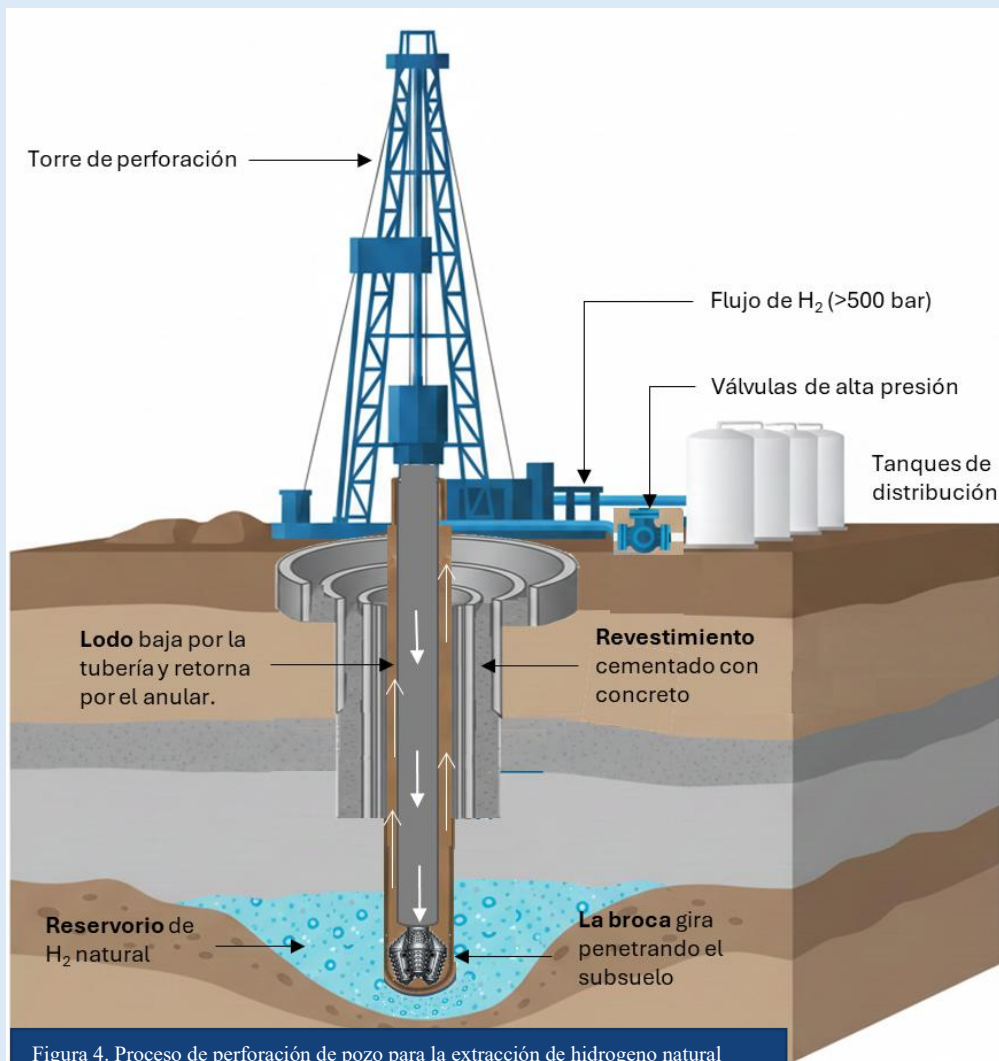


Figura 4. Proceso de perforación de pozo para la extracción de hidrógeno natural

### Extracción directa mediante perforación

La forma principal de obtener hidrógeno acumulado naturalmente es mediante la adaptación de tecnologías ya utilizadas en la extracción de gas natural. El proceso general incluye:

**Perforación:** Se utilizan torres de perforación para penetrar las capas de roca hasta alcanzar el reservorio. Se emplea la circulación continua de lodo para controlar la temperatura y la presión durante este proceso.

**Revestimiento:** Una vez alcanzado el depósito, las tuberías se recubren con concreto para garantizar la integridad estructural y minimizar la migración o fuga del gas hacia otras capas geológicas, dada la

naturaleza altamente difusiva del H<sub>2</sub>. Se debe evitar que el se filtre a profundidades someras, ya que puede formar mezclas inflamables y explosivas al entrar en contacto con el oxígeno.

**Control de extracción:** Se instalan válvulas de alta presión para regular la salida del gas y mantener la presión interna del reservorio.

**Recolección:** El hidrógeno fluye a través de tuberías aprovechando su propia presión (frecuentemente superior a 500 bar) para llenar tanques de distribución a pequeña escala.

**“El H<sub>2</sub> puede fragilizar y fracturar las tuberías; por tanto, deben emplearse materiales resistentes.”**

-[8]

# ¿Cómo encontramos Hidrogeno Natural?

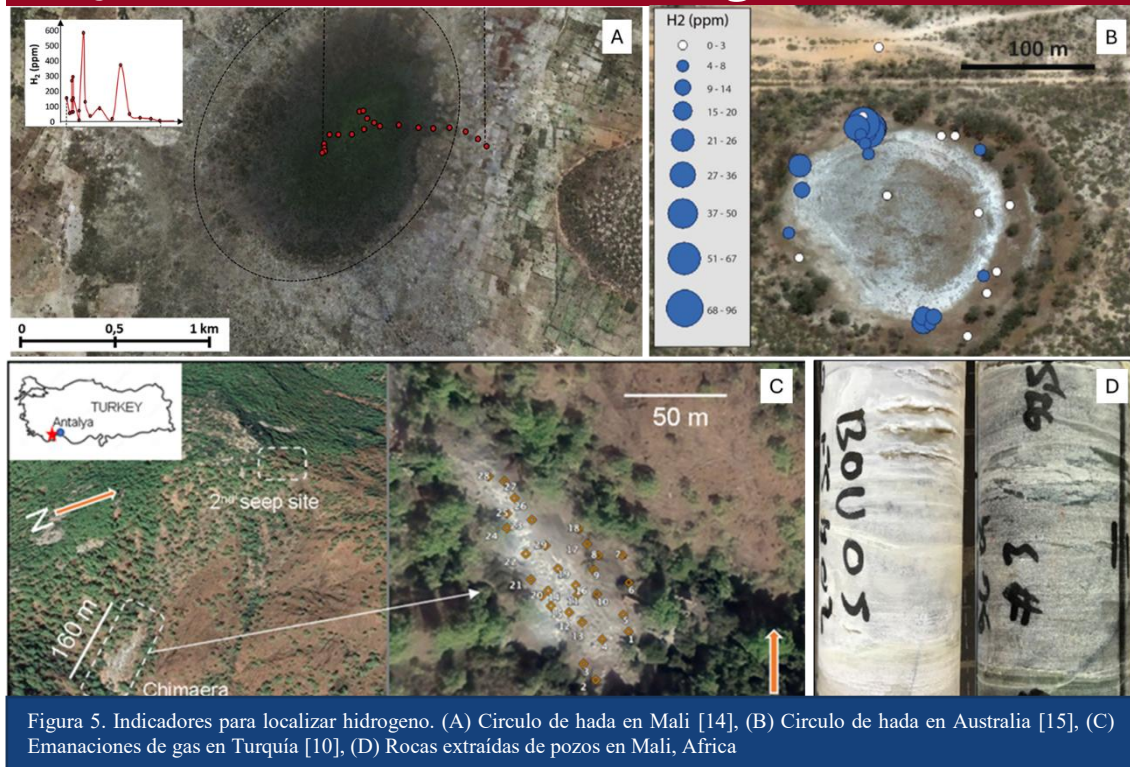


Figura 5. Indicadores para localizar hidrogeno. (A) Circulo de hada en Mali [14], (B) Circulo de hada en Australia [15], (C) Emanaciones de gas en Turquía [10], (D) Rocas extraídas de pozos en Malí, Africa

Para localizar hidrógeno, se puede emplear un enfoque integrado que combina indicadores geológicos y anomalías en la superficie detectadas por sensores remotos y trabajo de campo.

## Entornos geológicos de interés



La búsqueda se concentra en regiones donde ocurren procesos químicos que liberan H<sub>2</sub> de forma masiva:

**Cratones y escudos continentales:** Se buscan rocas precámbricas ricas en hierro, como las formaciones de hierro bandeado (BIF), que pueden generar hidrógeno mediante la oxidación del hierro ferroso (Fe<sup>2+</sup>).

**Ofiolitas:** Son fragmentos de corteza oceánica situados en tierra firme donde ocurre la serpentinización, un proceso en el que minerales como el olivino reaccionan con el agua para producir serpentina, magnetita e hidrógeno.

**Zonas de falla y rifts:** Las fallas profundas actúan como conductos que permiten que el hidrógeno generado a grandes profundidades migre hacia la superficie.

**Cuencas con carbón u materia orgánica:** La maduración tardía de la materia orgánica a altas temperaturas también puede liberar hidrógeno libre.

## Indicadores visuales en la superficie



Uno de los métodos más efectivos para localizar posibles fugas de hidrógeno es la identificación de rasgos geomorfológicos:

**Círculos de hadas (SCD):** Son depresiones subcirculares u ovoides en el terreno, a menudo con diámetros de cientos de metros, donde la vegetación es escasa o nula.

**Anomalías en la vegetación:** El hidrógeno puede inhibir el crecimiento de ciertas plantas o favorecer el de otras; por ejemplo, en Colombia se ha observado que el hidrógeno afecta los cultivos de caña de azúcar pero permite el crecimiento de bambú [9].

**Emanaciones de gas y fuegos eternos:** En lugares como Chimaera (Turquía) o Filipinas, el hidrógeno se filtra por fracturas rocosas y puede encenderse espontáneamente cuando se mezcla con metano [10].

# Métodos de exploración superficial de H<sub>2</sub>

La exploración de hidrógeno natural es una disciplina incipiente que combina métodos de superficie para identificar filtraciones de gas en el suelo como primer proxy exploratorio en un área determinada. Debido a la alta movilidad y reactividad de la molécula de hidrógeno, su detección requiere herramientas altamente sensibles y flujos de trabajo integrados.

## Teledetección y análisis de superficie

**Identificación de "círculos de hadas" (SCD):** Se utilizan imágenes satelitales (como Google Earth) y Modelos Digitales de Elevación (DEM) para localizar depresiones subcirculares que suelen presentar vegetación anómala o nula, indicadores comunes de fugas de hidrógeno. generado a grandes profundidades migre hacia la superficie.

**Índices de vegetación multiespectrales:** El uso de imágenes de satélites como Landsat o Sentinel-2 permite calcular índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) para detectar cambios en la salud de las plantas causados por el gas.

**Espectrometría de rayos gamma:** Identificación de anomalías de torio (Th) y uranio en la superficie, que en algunos casos se han correlacionado con sitios de emanación de hidrógeno .

## Sensores de medición química

**Analizadores portátiles de gas:** Se utilizan dispositivos como el GA5000, Variotec 460 u Optimax, equipados con celdas electroquímicas o

semiconductores para medir concentraciones de H<sub>2</sub> en partes por millón (ppm) [11].

**Monitoreo continuo a largo plazo:** Dado que las emanaciones de hidrógeno son a menudo pulsantes y varían según la hora del día o la presión atmosférica, se instalan estaciones fijas (como los sensores Parhys) para registrar datos durante semanas o meses [12].

**Análisis de gas del espacio de cabeza (Headspace):** Una técnica innovadora para ambientes saturados de agua que consiste en agitar el agua subterránea extraída de pozos poco profundos para liberar y medir los gases atrapados.

**Cámaras cerradas de flujo:** Se emplean para cuantificar el flujo de gas desde el suelo a la atmósfera, midiendo la acumulación de H<sub>2</sub> dentro de una cámara de volumen conocido en un tiempo determinado [10].

## Análisis de laboratorio

**Cromatografía de gases (GC):** Es la herramienta fundamental para determinar la composición molecular del gas recolectado en campo. Se utilizan detectores para gases inorgánicos como el H<sub>2</sub>, He y N<sub>2</sub>, y para cuantificar trazas de hidrocarburos livianos.

**Espectrometría de masas para gases nobles:** Se utiliza para medir concentraciones de He, Ne, Ar, Kr y Xe. Estos gases son inertes y sirven como trazadores de procesos físicos de transporte y origen (mantélico, crustal o atmosférico).

**Isótopos de Helio (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He):** Fundamental para identificar la contribución de fluidos derivados del manto frente a los de origen puramente crustal.

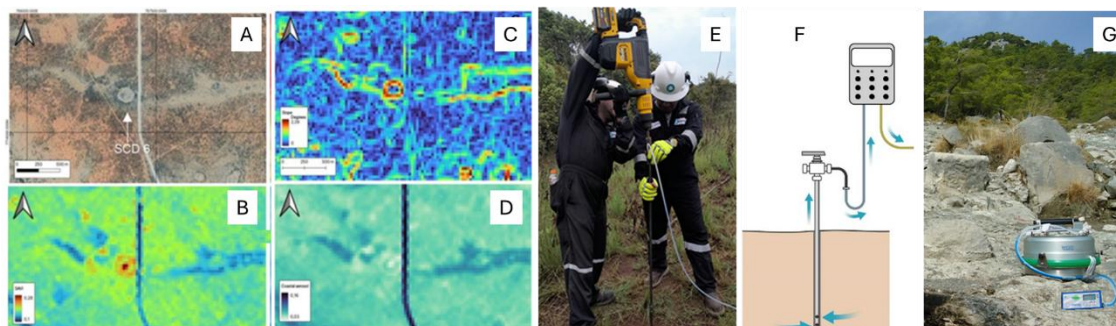


Figura 6. Métodos para exploración superficial de H<sub>2</sub>. (A) Imagen satelital , (B), Índice SAVI, (C) Pendiente, (D) Índice de aerosol, (E) Equipo de muestreo superficial [16], (F) Sonda y sensor geoquímico [16], (G) Cámara cerrada de flujo

## ¿Cómo llega el hidrógeno a la superficie?

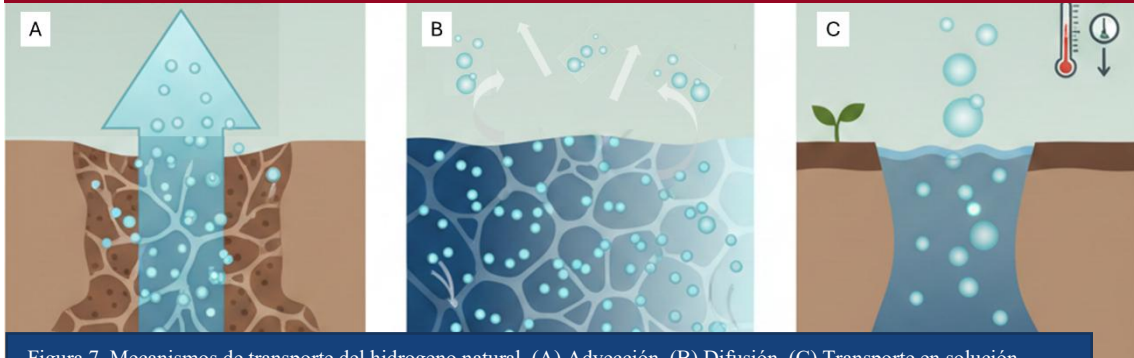


Figura 7. Mecanismos de transporte del hidrógeno natural. (A) Advección, (B) Difusión, (C) Transporte en solución

El hidrógeno natural llega a la superficie desde sus áreas de generación (o "cocinas") a través de procesos de migración complejos que dependen de la presión, la flotabilidad y la estructura geológica del subsuelo.

### Mecanismos de transporte



**Advección (Flujo impulsado por presión):** Es el método más eficiente de transporte, donde el hidrógeno en fase gaseosa se mueve rápidamente debido a su alta flotabilidad (es menos denso que el agua y otros gases) y a los gradientes de presión.

**Difusión:** El hidrógeno, al ser la molécula más pequeña y ligera, tiene una capacidad de difusión extremadamente alta a través de los poros de las rocas y fluidos, moviéndose de zonas de mayor a menor concentración.

**Transporte en solución:** El gas puede viajar disuelto en el agua subterránea (fase acuosa) dentro de los acuíferos. A medida que el agua asciende y la presión y temperatura disminuyen, la solubilidad del hidrógeno cae, lo que provoca que el gas se separe del líquido (proceso de exsolución) y forme burbujas que suben hacia la superficie.

### Conductos y vías de migración



**Fallas y fracturas profundas:** Actúan como verdaderas "tuberías" o chimeneas que conectan las fuentes profundas con la superficie. En rocas compactas como las del basamento cristalino o las ofiolitas, el gas circula preferencialmente por estas zonas de debilidad estructural.

**Rocas de alta permeabilidad:** Una vez que el hidrógeno entra en las capas sedimentarias, puede moverse lateral o verticalmente a través de areniscas o rocas porosas hasta encontrar una salida o ser atrapado por una capa impermeable.

### Dinámica del flujo



**Emisiones pulsantes o episódicas:** El hidrógeno no siempre fluye de manera constante; a menudo llega a la superficie en pulsos o ráfagas. Esto puede deberse a un efecto de "válvula de falla", donde el estrés tectónico abre fracturas de forma intermitente, liberando acumulaciones de gas de manera repentina.

**Influencia atmosférica:** En los suelos, el flujo puede verse afectado por variaciones diarias en la presión atmosférica; una caída de presión puede "succionar" el gas hacia afuera, mientras que una presión alta puede retardar su salida.

### Barreras y pérdidas en el camino



No todo el hidrógeno generado llega a la superficie. Su ascenso puede ser bloqueado por sellos geológicos como capas de sal o sills de dolerita, que lo obligan a acumularse en reservorios. Además, durante su viaje por el suelo, una gran parte puede ser consumida por microorganismos (bacterias hidrogenotróficas) o reaccionar con minerales oxidados, lo que significa que lo que se mide en la superficie es a menudo solo una fracción del flujo profundo original.

# Métodos de exploración de H<sub>2</sub> en el subsuelo

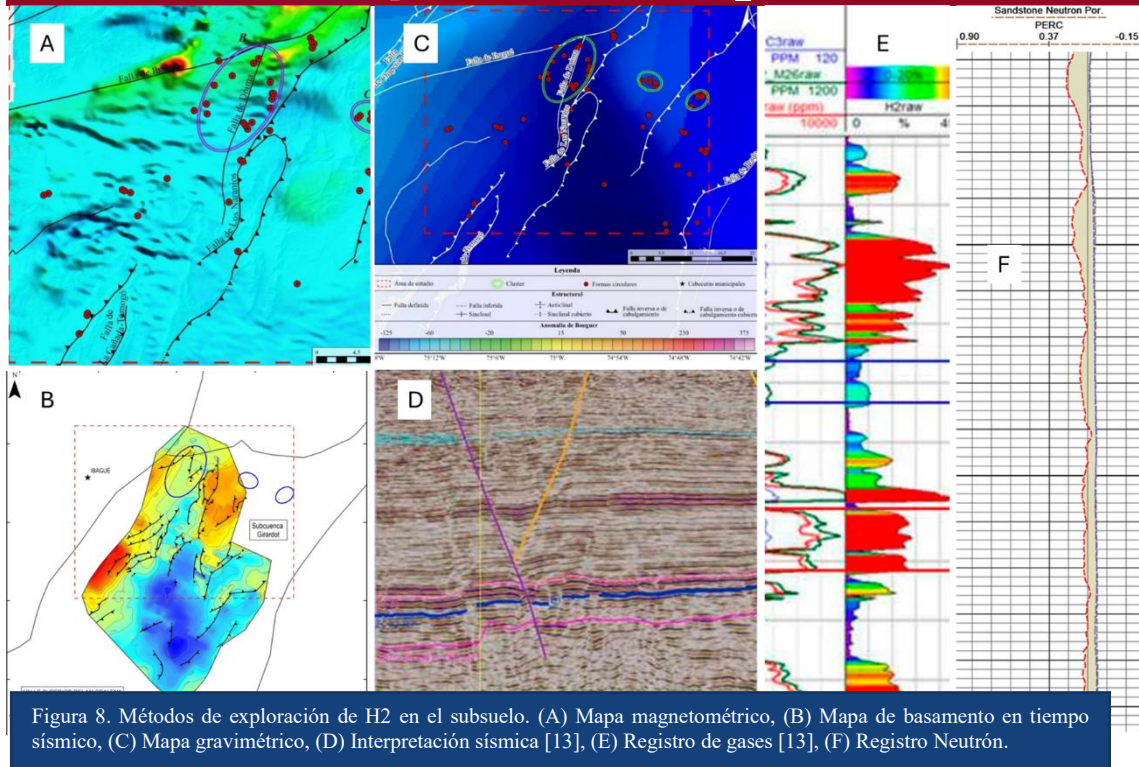


Figura 8. Métodos de exploración de H<sub>2</sub> en el subsuelo. (A) Mapa magnetométrico, (B) Mapa de basamento en tiempo sísmico, (C) Mapa gravimétrico, (D) Interpretación sísmica [13], (E) Registro de gases [13], (F) Registro Neutrón.

La exploración de hidrógeno natural en el subsuelo combina técnicas adaptadas de la industria petrolera y minera para identificar rocas fuente, vías de migración y posibles reservorios. Debido a la alta movilidad y reactividad del gas, se requieren métodos integrados que abarquen desde el análisis de fluidos en pozos hasta el mapeo geofísico profundo.

zonas de alteración hidrotermal que sirven como vías de migración para el gas.

**Prospección sísmica:** Aunque el hidrógeno es difícil de visualizar directamente por sí solo, la sísmica se usa para mapear trampas estructurales, fallas y la arquitectura del reservorio, similar a la exploración de hidrocarburos.

## Métodos geofísicos de subsuelo

## Técnicas de perforación y muestreo directo

**Magnetometría (Aerotransportada y de superficie):** Es fundamental para delinear rocas fuente de tipo ultramáfico (como peridotitas) y detectar zonas de serpentinización, proceso que altera las propiedades magnéticas de la roca mientras genera H<sub>2</sub>.

**Gravimetría:** Se buscan anomalías de gravedad de Bouguer positivas para identificar cuerpos de roca densa en el basamento que podrían actuar como cocinas de generación.

**Magnetotelúrica (MT) y Resistividad Eléctrica (ERT):** Estas herramientas mapean la conductividad eléctrica a grandes profundidades, ayudando a identificar fallas de raíz profunda o

**Mud logging (Registro de lodo) en tiempo real:** Durante la perforación, se analiza continuamente la composición de los gases que entran en el pozo a través de fracturas o por la trituración de la roca. Este método permite delinear zonas con diferente permeabilidad y detectar influjos de hidrógeno condicionados por la litología y la densidad de fracturas.

**Perfilaje de Neutrones (Neutron Logging):** Es una herramienta fundamental para identificar potenciales reservorios de gas hidrógeno. Los valores de neutrones reflejan el contenido de átomos de hidrógeno en los fluidos; un desajuste significativo entre los perfiles de neutrón y de densidad (efecto de gas) puede indicar la presencia de una fase gaseosa de hidrógeno.

# Exploración de hidrogeno en Colombia



En Colombia, las investigaciones sobre el hidrógeno natural han avanzado significativamente en los últimos años, impulsadas por el reconocimiento legal de este recurso como una fuente no convencional de energía renovable (FNCER) en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. Los estudios se han centrado principalmente en la identificación de emanaciones superficiales y la evaluación de sistemas geológicos en diversas cuencas sedimentarias.

## Valle del Cauca-Patía y Cordillera Occidental

Investigaciones recientes han proporcionado las primeras evidencias de emisiones de hidrógeno natural en los terrenos acreditados de esta zona. Se utilizaron herramientas de detección remota, específicamente anomalías de vegetación mediante el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI), para preseleccionar áreas con potencial. El muestreo de gases del suelo confirmó la presencia de  $H_2$  en todas las estructuras preseleccionadas. Se considera que las ofiolitas (rocas de la litosfera oceánica) son la fuente primaria probable de hidrógeno en esta región, aunque también se contempla la alteración del Batolito de Buga [9].

## Cuenca de la Cordillera Oriental

Investigaciones lideradas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, HPO Global Resources Ventures Inc, Echeverry ingeniería y Kuenka SAS han realizado evaluaciones integrales mediante la perforación de pozos estratigráficos tipo slim hole.

**Pozos ANH-MACANAL-1X y 2X:** Estos estudios confirmaron la existencia de un sistema de hidrógeno con abundantes manifestaciones a lo largo de toda la sección perforada. Se detectaron concentraciones que superaron los 30,000 ppm en la Formación Lutitas de Macanal. Los datos

sugieren un origen termogénico, donde el  $H_2$  se genera a partir de la materia orgánica (carbones y lutitas) en niveles muy altos de madurez térmica.

## Pozos ANH-UNE-1X y ANH-FOMEQUE-1X:

En estos sectores se identificó predominantemente gas metano, con manifestaciones de hidrógeno mucho más limitadas o casi nulas, lo que indica que la madurez térmica en estas áreas específicas podría estar por debajo del umbral necesario para la generación masiva de  $H_2$ .

## Cuenca de los Llanos Orientales

Esta región ha sido objeto de estudios pioneros sobre el muestreo de reservorios en profundidad. Investigaciones lideradas por Ecopetrol y SLB reportaron el primer muestreo de fondo de pozo de un reservorio de hidrógeno natural en Colombia. Se evaluó el potencial de generación asociado al basamento cristalino precámbrico, donde procesos como la serpentización o la radiólisis del agua podrían estar liberando  $H_2$ . Se ha propuesto que fallas principales conducen el hidrógeno desde el basamento, y formaciones como las shales de León podrían actuar como sellos efectivos, creando acumulaciones bajo la roca [13].

## Cuenca Sinú-San Jacinto

Estudios de modelamiento geológico en los pozos **ANH-SAN RAFAEL-1X y 2X** han evaluado la prospectividad en el sector sur de esta cuenca. Se detectó hidrógeno libre en múltiples intervalos estratigráficos, interpretado como gas que ha migrado desde zonas estructuralmente más profundas a través de sistemas de fracturamiento. Las rocas ultramáficas asociadas a la Gran Provincia Ígnea del Caribe en el basamento de la cuenca se consideran una fuente conceptual clave para el hidrógeno blanco en esta región.

# Exploración de hidrogeno en Colombia

## Cuenca Cesar-Ranchería

En esta cuenca se perforó el pozo **ANH-COGOLLO-1X** (municipio de Bosconia), alcanzando una profundidad de 2,855 pies. La exploración se centró en evaluar el potencial de generación y almacenamiento en una columna que abarca desde el Jurásico hasta el Mioceno, destacando unidades como las formaciones La Luna y el Grupo Cogollo. Los estudios en esta zona integraron análisis de cromatografía de gases y espectrometría de masas para identificar la presencia de hidrógeno y gas natural asociados a plataformas carbonatadas y depósitos volcánicos de la Formación Guatapuri, aportando datos clave para entender la madurez térmica y el sistema de fluidos en el norte del país.

## Cuenca Valle Superior del Magdalena (subcuenca de Girardot)

La exploración en esta región se llevó a cabo mediante el pozo **ANH-OLINI-1X** (Coello, Tolima), el cual atravesó unidades del Cretácico Superior como el Grupo Oliní y el Grupo Villeta (formaciones Loma Gorda y Hondita). El proyecto evaluó la capacidad de estas rocas, compuestas principalmente por liditas, cherts y

lutitas carbonosas, para generar o almacenar gases de transición.

A través de la integración de petrofísica y geoquímica de rocas, se busca determinar el potencial de este "play" combinado, donde la compleja estructura de fallas y pliegues de la zona podría favorecer la acumulación de hidrógeno natural en reservorios no convencionales.

## Cuenca Cordillera Oriental

Esta cuenca es de vital interés debido a la presencia de diapirismo de sal y sistemas de fallas inversas que podrían actuar como trampas o vías de migración para el hidrógeno. Se perforaron dos pozos estratégicos: el **ANH-CONEJO-1X** (Sutatausa, Cundinamarca) y el **ANH-PAJA-1X** (Palmas del Socorro, Santander). En el pozo Conejo se evaluaron formaciones como Churuvita y Simijaca, mientras que en el pozo Paja se analizaron las formaciones Tablazo y Paja. Los registros de gases inorgánicos y el modelamiento térmico en estas áreas buscan confirmar si las condiciones de presión y temperatura, sumadas a la interacción con rocas ricas en materia orgánica y depósitos evaporíticos, han permitido la generación de hidrógeno natural en el centro de Colombia.



Figura 9. Pozo Slim Hole ANH-COGOLLO-1X para exploración de hidrogeno perforado por las empresas HPO Global Resources Ventures Inc, Echeverry Ingeniería y Kuenka SAS en Colombia

## Referencias

- [1] L. Wang, Z. Jin, X. Chen, Y. Su, and X. Huang, “The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen,” Mar. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16052400.
- [2] A. Prinzhofer, C. Rigollet, N. Lefeuvre, J. Françolin, and P. E. Valadão de Miranda, “Maricá (Brazil), the new natural hydrogen play which changes the paradigm of hydrogen exploration,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 62, pp. 91–98, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.263.
- [3] Q. ning Tian, S. qing Yao, M. juan Shao, W. Zhang, and H. hua Wang, “Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of ‘carbon neutrality,’” Oct. 01, 2022, *KeAi Communications Co.* doi: 10.31035/cg2022046.
- [4] O. Maiga, E. Deville, J. Laval, A. Prinzhofer, and A. B. Diallo, “Trapping processes of large volumes of natural hydrogen in the subsurface: The emblematic case of the Bourakebougou H<sub>2</sub> field in Mali,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 640–647, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.131.
- [5] R. Blay-Roger *et al.*, “Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas,” Jan. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2023.113888.
- [6] M. Sequeira *et al.*, “Natural Hydrogen in Uruguay: Catalog of H<sub>2</sub>-Generating Rocks, Prospective Exploration Areas, and Potential Systems,” *Geosciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.3390/geosciences15020054.
- [7] Y. Wei *et al.*, “Helium and natural hydrogen in the Bohai Bay Basin, China: Occurrence, resources, and exploration prospects,” *Appl Energy*, vol. 383, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125398.
- [8] V. Zgonnik, “The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review,” Apr. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103140.
- [9] A. Carrillo Ramirez, F. Gonzalez Penagos, G. Rodriguez, and I. Moretti, “Natural H<sub>2</sub> Emissions in Colombian Ophiolites: First Findings,” *Geosciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.3390/geosciences13120358.
- [10] G. Etiope, “Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): Gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurised accumulations,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 25, pp. 9172–9184, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.025.
- [11] D. Lévy *et al.*, “Natural H<sub>2</sub> exploration: tools and workflows to characterize a play,” 2023, *Editions Technip*. doi: 10.2516/stet/2023021.
- [12] A. Prinzhofer *et al.*, “Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H<sub>2</sub> -emitting structure,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 12, pp. 5676–5685, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.119.
- [13] C. Patiño *et al.*, “First downhole sampling of a natural hydrogen reservoir in Colombia,” *Front Energy Res*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1443269.
- [14] A. Prinzhofer, C. S. Tahara Cissé, and A. B. Diallo, “Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali),” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 42, pp. 19315–19326, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.193.
- [15] E. Frery, L. Langhi, M. Maison, and I. Moretti, “Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 61, pp. 31158–31173, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.023.

- [16] C. Patino, D. Piedrahita, E. Colorado, K. Aristizabal, and I. Moretti, “Natural H<sub>2</sub> Transfer in Soil: Insights from Soil Gas Measurements at Varying Depths,” *Geosciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/geosciences14110296.

## Preguntas de repaso

1. ¿Por qué el hidrógeno natural se considera una fuente de energía primaria y no solo un vector energético?
2. Explica por qué el descubrimiento del campo de Bourakébougou (Mali) cambió el paradigma sobre el hidrógeno natural.
3. ¿Cuáles eran las razones históricas por las que se pensaba que el hidrógeno no podía acumularse en el subsuelo?
4. ¿Qué ventajas económicas y ambientales presenta el hidrógeno natural frente al hidrógeno verde y azul?
5. El hidrógeno natural se diferencia del hidrógeno industrial porque:
  - A) Tiene menor poder calorífico
  - B) Requiere electrólisis para su producción
  - C) Se genera de forma continua en el subsuelo
  - D) Solo existe en ambientes volcánicos
6. El costo estimado de producción del hidrógeno natural es aproximadamente:
  - A) 8 USD/kg
  - B) 5 USD/kg
  - C) 2 USD/kg
  - D) Entre 0.5 y 1 USD/kg
7. Define hidrógeno natural e indica en qué se diferencia de los combustibles fósiles.
8. ¿Por qué, a pesar de su alta difusividad, el hidrógeno puede formar reservorios en el subsuelo?
9. Explica el papel de los sellos geológicos como la halita o la dolerita en la acumulación de  $H_2$ .
10. El hidrógeno natural puede clasificarse como energía renovable porque:
  - A) Se produce solo en ambientes volcánicos
  - B) Se genera continuamente y presenta recarga natural
  - C) Siempre se asocia al gas natural
  - D) No requiere perforación

11. Describe el proceso de serpentización y explica por qué es clave en la generación de hidrógeno natural.
12. ¿Qué es la radiólisis del agua y en qué tipo de ambientes geológicos es más relevante?
13. Explica dos diferencias entre los mecanismos abióticos y bióticos de generación de hidrógeno.
14. ¿Por qué la maduración tardía de la materia orgánica puede generar H<sub>2</sub>?
15. La serpentización ocurre principalmente en:
  - A) Lutitas ricas en carbono
  - B) Rocas ultramáficas ricas en olivino y piroxeno
  - C) Areniscas cuarzosas
  - D) Evaporitas
16. ¿Cuál de los siguientes es un mecanismo biótico de producción de hidrógeno?
  - A) Cataclasis
  - B) Radiólisis del agua
  - C) Fermentación microbiana
  - D) Desgasificación del manto
17. Describe las etapas principales del proceso de extracción de hidrógeno natural mediante perforación.
18. ¿Por qué el revestimiento del pozo es especialmente crítico en proyectos de hidrógeno natural?
19. Explica el fenómeno de fragilización de tuberías por hidrógeno y sus implicaciones operativas.
20. Una de las principales funciones del lodo de perforación es:
  - A) Almacenar el hidrógeno
  - B) Controlar presión y temperatura durante la perforación
  - C) Separar el hidrógeno del metano
  - D) Sellar permanentemente el pozo
21. ¿Qué son los círculos de hadas (SCD) y por qué son importantes en la exploración de hidrógeno natural?

22. Explica cómo el hidrógeno puede afectar la vegetación en superficie.
23. Describe el enfoque integrado para localizar hidrógeno natural en superficie.
24. ¿Cuál de los siguientes entornos es más favorable para la generación de  $H_2$  por oxidación del hierro?
- A) Cuencas carbonatadas
  - B) Cratones con formaciones de hierro bandeado
  - C) Arrecifes fósiles
  - D) Ambientes glaciares
25. El NDVI y el SAVI se utilizan principalmente para:
- A) Medir presión del gas
  - B) Detectar anomalías en la vegetación
  - C) Analizar composición isotópica
  - D) Medir flujo de gas en cámaras
26. Describe los principales mecanismos de transporte del hidrógeno desde el subsuelo hasta la superficie.
27. ¿Qué se entiende por emisiones pulsantes de hidrógeno y a qué se deben?
28. Explica por qué lo que se mide en superficie suele ser solo una fracción del hidrógeno generado en profundidad.
29. El mecanismo de transporte más eficiente del hidrógeno es:
- A) Difusión
  - B) Transporte en solución
  - C) Advección
  - D) Absorción mineral
30. ¿Qué técnicas geofísicas se utilizan para identificar posibles cocinas de generación de hidrógeno?
31. Explica el papel del mud logging en la detección de hidrógeno durante la perforación.
32. Resume los principales hallazgos de exploración de hidrógeno natural en Colombia.
33. El perfilaje de neutrones es útil porque:
- A) Mide directamente el flujo de hidrógeno

- B) Detecta átomos de hidrógeno en los fluidos del reservorio
- C) Identifica fallas superficiales
- D) Analiza vegetación

34. En los pozos Macanal-1X y 2X, el origen del hidrógeno se interpreta principalmente como:
- E) Mantélico
  - F) Biogénico superficial
  - G) Termogénico asociado a alta madurez térmica
  - H) Atmosférico

# Glosario de términos

## **Advección**

Mecanismo de transporte de hidrógeno impulsado por gradientes de presión y flotabilidad, que permite un movimiento rápido del gas desde zonas profundas hacia la superficie.

## **Anomalías de vegetación**

Cambios anómalos en la densidad o vigor de la vegetación asociados a la presencia de hidrógeno en el suelo, detectables mediante índices espectrales.

## **ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera)**

Índice espectral utilizado para reducir efectos atmosféricos y detectar estrés vegetal relacionado con emanaciones de gases.

## **Basamento cristalino**

Conjunto de rocas ígneas y metamórficas antiguas que constituyen la base de la corteza continental y pueden actuar como zonas generadoras de hidrógeno.

## **BIF (Formaciones de Hierro Bandeado)**

Rocas ricas en hierro donde la oxidación del  $\text{Fe}^{2+}$  puede generar hidrógeno natural.

## **Biótico (mecanismo)**

Proceso de generación de hidrógeno asociado a la actividad metabólica de microorganismos.

## **Cámaras cerradas de flujo**

Dispositivos utilizados para medir el flujo de hidrógeno desde el suelo a la atmósfera mediante la acumulación del gas en un volumen controlado.

## **Cataclasis / procesos mecanorradicales**

Generación de hidrógeno causada por la ruptura de enlaces químicos en rocas sometidas a esfuerzos tectónicos.

## **Círculos de hadas (SCD, Subcircular Depressions)**

Depresiones subcirculares en superficie, con escasa o nula vegetación, asociadas a fugas de hidrógeno desde el subsuelo.

## **Cocina de generación**

Zona del subsuelo donde se produce hidrógeno de forma continua mediante procesos geológicos o bióticos.

## **Difusión**

Movimiento del hidrógeno desde zonas de mayor a menor concentración debido a su alta movilidad molecular.

## **Desgasificación del manto**

Liberación de hidrógeno primordial desde el interior profundo de la Tierra hacia la corteza.

## **Emanaciones de gas**

Liberaciones naturales de hidrógeno a la superficie a través de fracturas o suelos permeables.

## **Energía primaria**

Fuente de energía que existe de forma natural sin requerir procesos industriales para su generación.

## **Fallas y fracturas**

Discontinuidades estructurales de la corteza que actúan como vías preferenciales de migración del hidrógeno.

## **FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovable)**

Categoría legal que reconoce al hidrógeno natural como recurso energético renovable en Colombia.

**Fragilización por hidrógeno**

Fenómeno por el cual el hidrógeno debilita materiales metálicos, aumentando el riesgo de fractura en tuberías.

**Headspace (análisis de gas del espacio de cabeza)**

Técnica de muestreo que permite medir gases liberados desde agua subterránea agitada en un recipiente cerrado.

**Hidrógeno natural (o hidrógeno blanco)**

Hidrógeno molecular ( $H_2$ ) presente de forma natural en el subsuelo, generado continuamente por procesos geológicos y bióticos.

**Índices de vegetación (NDVI, SAVI)**

Indicadores multispectrales utilizados para evaluar la salud de la vegetación y detectar anomalías asociadas a gases del suelo.

**Magnetometría**

Método geofísico que permite identificar rocas ultramáficas y zonas de serpentinización mediante anomalías magnéticas.

**Magnetotelúrica (MT)**

Técnica geofísica que mide la resistividad eléctrica del subsuelo para identificar fallas profundas y zonas de alteración.

**Migración de gas**

Proceso mediante el cual el hidrógeno se desplaza desde su zona de generación hacia la superficie o hacia reservorios.

**Mud logging**

Registro continuo de gases y litología durante la perforación de un pozo, utilizado para detectar influjos de hidrógeno.

**Ofiolitas**

Fragmentos de litosfera oceánica emplazados en continentes, donde ocurre serpentinización y generación de hidrógeno.

**Permeabilidad**

Capacidad de una roca para permitir el paso de fluidos, controlando la migración del hidrógeno.

**Perfilaje de neutrones**

Registro geofísico que identifica la presencia de hidrógeno mediante el contenido de átomos de hidrógeno en los fluidos del subsuelo.

**Radiólisis del agua**

Generación de hidrógeno por disociación del agua debido a radiación ionizante emitida por elementos radiactivos naturales.

**Reservorio**

Acumulación de hidrógeno atrapada bajo una roca sello impermeable, similar a los reservorios de gas natural.

**Roca sello**

Capa impermeable (como sal o dolerita) que impide la fuga del hidrógeno y permite su acumulación.

**Serpentinización**

Reacción entre agua y rocas ultramáficas que produce minerales de serpentina, magnetita y libera hidrógeno molecular.

**Slim hole**

Tipo de pozo de pequeño diámetro utilizado para exploración estratigráfica y muestreo de hidrógeno.

**Transporte en solución**

Migración del hidrógeno disuelto en agua subterránea, que se libera al disminuir presión y temperatura.

**Vector energético**

Portador de energía que requiere otra fuente energética para ser producido, a diferencia del hidrógeno natural.