

Oro Blanco

La nueva frontera energética del subsuelo

2026



ANH
AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS
COLOMBIA


Ciencias



PSL
PROANÁLISIS
S.A.S BIC.

HPO Global 

Copyright:

Cartilla de estudio sobre la exploración de hidrógeno natural

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:

HPO Global Resources Ventures Inc.
Carrera 68D 25B 86, Torre Central Davivienda, Oficina 631-1
Bogotá D.C., 110931
Colombia

Email: salim.shalom@hpoglobalinc.com
admin.contratos2@pslproanalisis.com

Diseñado y producido por:

PSL Proanalisis SAS BIC - Floridablanca, Santander, Colombia
HPO Global Resources Ventures Inc. - Bogotá D.C., Colombia

Proyecto financiado por:

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) – Bogotá D.C., Colombia
Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación – Bogotá D.C., Colombia

Investigador Principal:

Dr. Eugenio Jaramillo

Estructurador:

Msc. Salim Salon

Coautores:

Msc. Cesar Mora

Jose Gordillo

Msc. Juan Pardo

Msc. Fabian Gallego

Faiber Ochoa

Msc. Mary Piragauta

Msc. Jhon Salon

Henry Ramírez

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 (H₂) 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]

H₂ - “ORO BLANCO”

Tipos de Hidrógeno

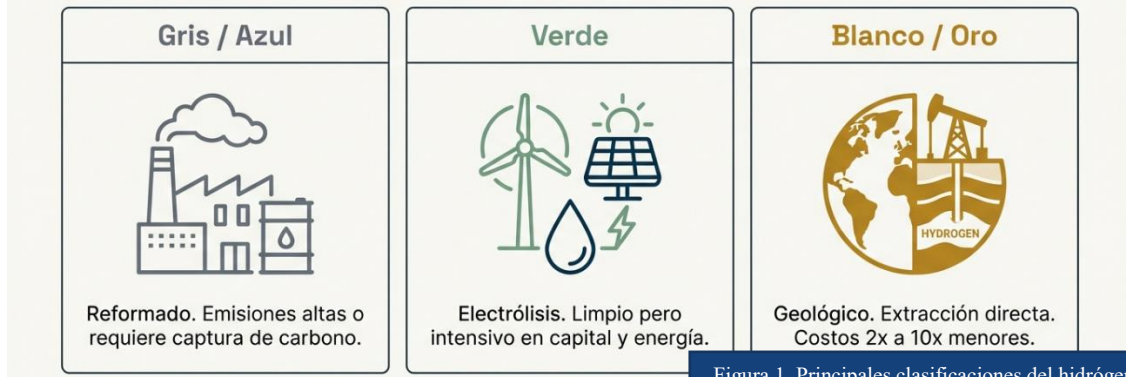


Figura 1. Principales clasificaciones del hidrógeno

Los tipos de hidrógeno se clasifican comúnmente mediante un espectro de colores que sirve para identificar las fuentes de energía utilizadas, las diferentes tecnologías de producción y la intensidad de sus emisiones de carbono.

Hidrógeno Verde

Se define como hidrógeno "limpio" porque se deriva de fuentes de energía renovable mediante procesos como la electrólisis (separación de la molécula de agua). También se incluye en esta categoría el hidrógeno producido por fotocatalisis (usando solo energía solar) y el "biohidrógeno" producido a través de reacciones bacterianas y de microalgas utilizando enzimas como la nitrogenasa o hidrogenasa.

Hidrógeno Rosa

Se produce mediante la electrólisis del agua utilizando energía nuclear.

Hidrógeno Rojo

Se genera a través de la separación termoquímica del agua, utilizando también energía nuclear.

Hidrógeno Amarillo

Se produce a través de la electrólisis utilizando energía de una red eléctrica de origen mixto.

Hidrógeno Gris

Es producido a partir de combustibles fósiles como gas natural, petróleo o betún. Utiliza métodos industriales como el reformado de metano con vapor (SMR), la oxidación parcial o el reformado autotérmico.

Hidrógeno Turquesa

Se obtiene mediante la pirólisis de metano, un proceso anaeróbico que produce hidrógeno gas y deja carbono sólido como subproducto.

Hidrógeno Marrón

Se produce a partir de la gasificación de lignito (un tipo de carbón de bajo rango) o a través de la combustión de residuos de biomasa y biogás.

Hidrógeno Negro

Se genera mediante la gasificación de carbón bituminoso.

Hidrógeno Azul

Es el hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, pero al que se le aplican tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) para reducir y mitigar los gases de efecto invernadero generados en su producción.

Hidrógeno Aqua

Se produce directamente en el subsuelo a partir de betún o petróleo mediante procesos de reformado para producir gas de síntesis. Posteriormente, el hidrógeno se recolecta a través de membranas en los pozos de producción.

Hidrógeno Blanco

Es el hidrógeno que se produce de forma natural y se encuentra como gas libre en formaciones geológicas y fluidos hidrotermales.

¿Qué es el Hidrógeno blanco o natural?

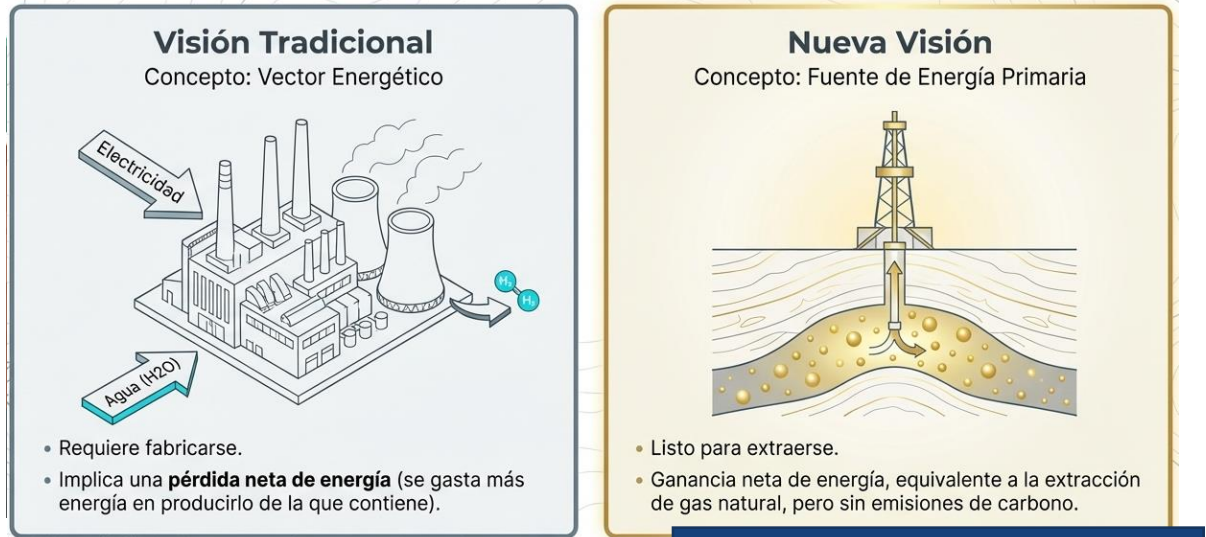


Figura 2. El cambio de paradigma del hidrógeno natural

El hidrógeno natural es el hidrógeno molecular (H₂) que ocurre y se acumula de forma espontánea en la Tierra. A diferencia del hidrógeno industrial, que requiere otra energía para ser producido (vector energético), 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 [4]

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 [2].

“El hidrógeno natural es energía primaria y vector energético.”

-[3]

¿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) [5].

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 [6]. 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 H₂ producido por otras fuentes.

El caso de Malí



Figura 3. Detalles del descubrimiento y producción de hidrógeno blanco en Malí, África

Malí representa el hito fundacional y la prueba de concepto más importante a nivel mundial en la exploración y explotación comercial de hidrógeno natural. Este paradigma ha transformado la comprensión científica y la industria energética sobre el hidrógeno geológico a través de los siguientes puntos clave:

Descubrimiento fortuito y alta pureza

El descubrimiento en Malí ocurrió por accidente en 1987 durante la perforación de un pozo de agua en Bourakebougou, en la cuenca de Taoudeni, tras una explosión imprevista. El gas extraído del pozo Bougou-1 resultó tener una pureza excepcional, compuesto en un 98% por hidrógeno [7].

Primera explotación comercial y uso local

En 2012, la compañía canadiense Petroma (hoy conocida como Hydroma) comenzó a explorar y utilizar activamente el pozo original para la generación de electricidad a pequeña escala [7]. Tras confirmar el potencial, la empresa perforó 24 pozos adicionales entre 2017 y 2018, demostrando la presencia de un yacimiento que se extiende por más de 8 km de diámetro.

Viabilidad económica

El caso de Malí ha demostrado que la producción de hidrógeno natural puede ser de 2 a 10 veces más

barata que el hidrógeno manufacturado a partir de combustibles fósiles (hidrógeno gris/azul) o mediante la electrólisis industrial del agua (hidrógeno verde).

Relevancia geológica (Trampas y Sellos)

Geológicamente, Malí demostró que el hidrógeno, siendo una molécula muy pequeña y volátil, puede acumularse y quedar atrapado eficientemente en el subsuelo. En este caso, las intrusiones de capas de dolerita actúan como un sello excelente para los yacimientos de hidrógeno. Además, se ha observado que la presencia de hidrógeno en esta región está asociada con emanaciones en la superficie que a menudo forman depresiones circulares en el suelo, conocidas como "círculos de hadas" (aunque la presencia de costras de laterita a veces las oculta).

Catalizador de la exploración global

El éxito en Malí ha brindado la confianza necesaria para considerar al hidrógeno natural como una fuente de energía independiente, sostenible y libre de carbono. Esto ha motivado a que varios países (como Australia, Brasil, Estados Unidos y naciones europeas) comiencen a explorar activamente sus propias cuencas geológicas, especialmente en entornos de cratones antiguos y rocas ricas en hierro o ultramáficas, buscando replicar el hallazgo de Malí.

Estados del Hidrógeno en el subsuelo

El hidrógeno natural se puede clasificar según su estado de ocurrencia en el subsuelo en las siguientes categorías principales:

Hidrógeno libre

Se refiere al gas que puede migrar libremente a través de los poros, fisuras o fracturas de las rocas y los estratos. Es una de las formas de aparición más importantes del hidrógeno natural, el cual puede acumularse formando yacimientos subterráneos o escapar hacia la superficie manifestándose en manantiales hipercalinos o emisiones constantes de gas.

Hidrógeno disuelto

El hidrógeno natural también se encuentra disuelto en aguas subterráneas y fluidos hidrotermales. Su concentración en las aguas subterráneas puede variar desde cantidades traza hasta alcanzar decenas por ciento, y se ha documentado que esta concentración tiende a aumentar con la profundidad de muestreo.

Hidrógeno en inclusiones

El gas puede quedar atrapado dentro de inclusiones fluidas naturales presentes en los minerales (comúnmente en cristales de cuarzo o diamantes). Estas inclusiones con hidrógeno han sido identificadas en numerosos entornos geológicos, incluyendo rocas ultrabásicas, ígneas, volcánicas, metamórficas, sedimentarias y depósitos de sal, presentando concentraciones variables que van desde un 0.2% hasta un 100%.

Hidrógeno adsorbido

El hidrógeno puede quedar retenido en el interior de diferentes tipos de rocas como un producto de adsorción. Por ejemplo, en rocas arcillosas asociadas a yacimientos de uranio, minerales como la clorita, la illita y la caolinita pueden adsorber y atrapar en su estructura un porcentaje significativo del hidrógeno que se produce localmente por la radiólisis del agua.

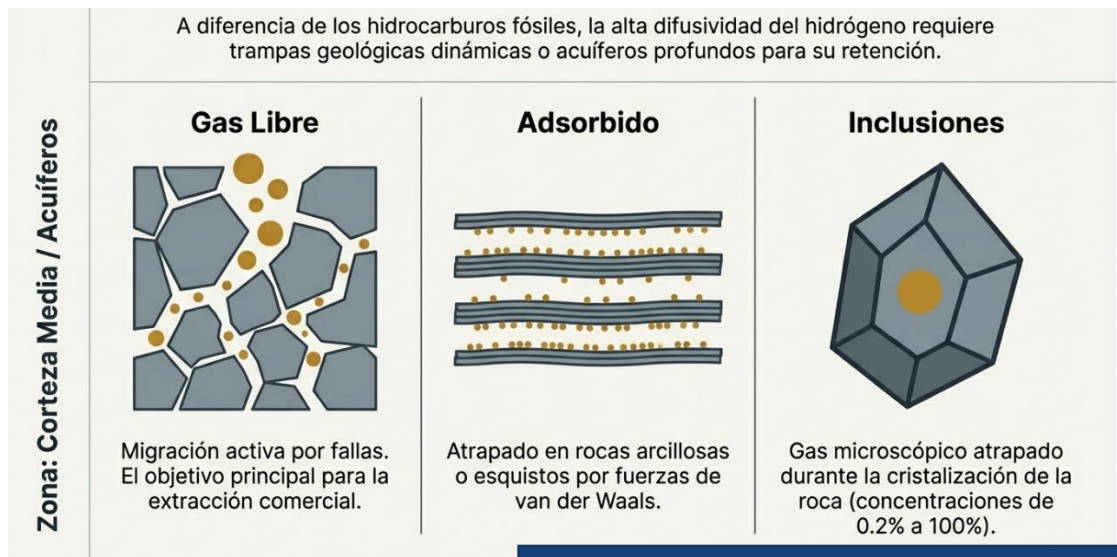
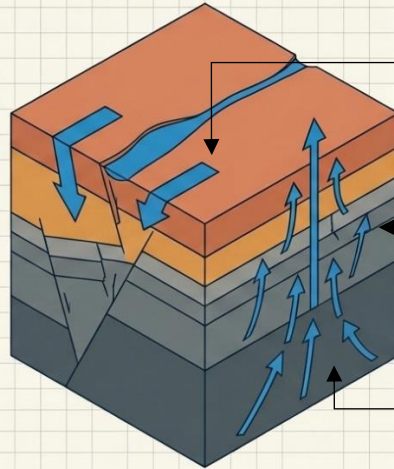


Figura 4. Principales estados del hidrógeno natural en el subsuelo

¿Como se origina el Hidrógeno Natural?

A diferencia de los hidrocarburos, que son depósitos finitos de biomasa antigua, el hidrógeno geológico es el producto de un sistema dinámico y abierto. La Tierra actúa como un reactor químico masivo que genera gas de manera continua a través de interacciones constantes entre el agua y las rocas profundas.



Zona de Infiltración:
El agua superficial y marina penetra a través de fallas y porosidad.

Zona de Migración:
El H2 asciende rápidamente debido a su alta movilidad y baja densidad.

Zona de Reacción (El Reactor): Condiciones óptimas de presión y temperatura provocan alteraciones químicas.

Motores de producción subterránea

Motor Primario: Reacciones Agua-Roca (Serpentinización)

El mecanismo dominante a nivel global. Reducción de agua acoplada a la oxidación de hierro.

Motor Secundario: Radiólisis del Agua

Disociación de moléculas de agua impulsada por la descomposición radiactiva natural en la corteza.

Motores Terciarios: Procesos Físicos y Biológicos

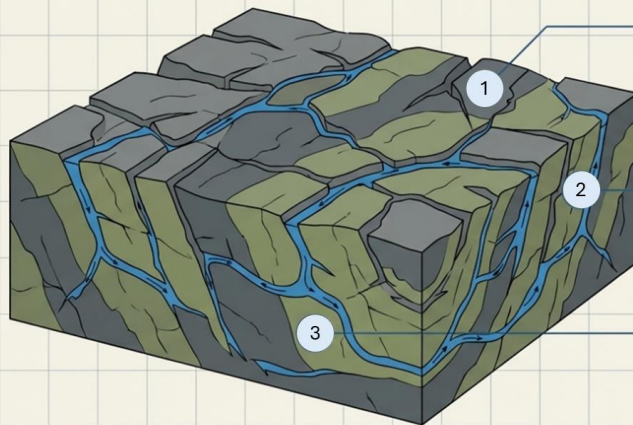
Cataclasis
(Fricción tectónica)

Desgasificación Profunda
(Emisiones del manto/núcleo)

Maduración Térmica
(Pirólisis tardía de materia orgánica)

Motor primario: Serpentinización

La serpentinización es un proceso metamórfico rápido y eficaz que ocurre cuando el agua interactúa con rocas ultramáficas ricas en olivino y piroxeno a temperaturas de 200°C a 320°C.

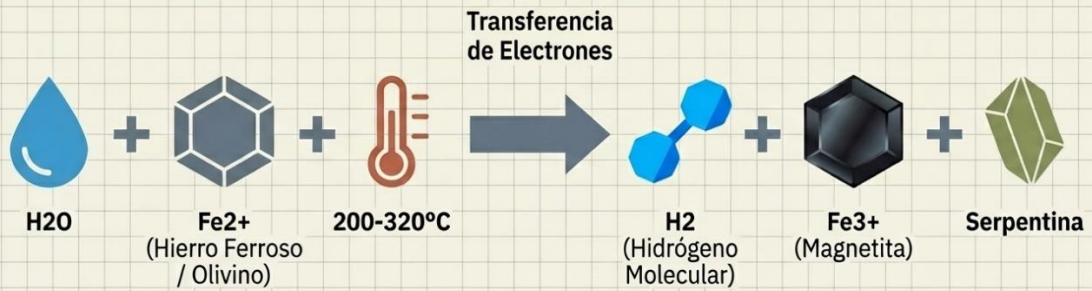


1. La Roca Base (Ultramáfica)
Rocas con bajo contenido de sílice y ricas en hierro reducido (Fe²⁺) y magnesio, dominadas por la solución sólida de fayalita-forsterita.

2. La Inyección de Agua
Fluidos hidrotermales que circulan a través de la red de fracturas de la matriz mineral.

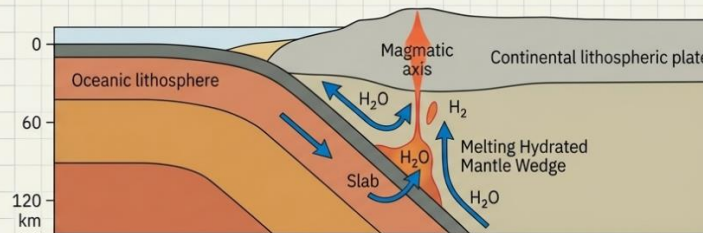
3. La Metamorfosis
La alteración hídrica transforma la roca en serpentina, expulsando al hierro de su estructura inicial.

El proceso de serpentinización



En esencia, es un proceso de oxidación-reducción (redox). El hierro de la roca base cede electrones, oxidándose para formar magnetita, mientras que el agua se reduce, liberando hidrógeno en forma gaseosa. La roca base (olivino) se hidrata y transforma en el mineral serpentina.

Ambientes geotectónicos óptimos



Dorsales Medioceánicas

Alteración del manto expuesto por el agua de mar profunda (ej. 'Lost City' en la dorsal mesoatlántica). Genera los mayores volúmenes documentados en tiempo real.

Zonas de Subducción y Ofiolitas

Complejos de corteza oceánica exhumada e incrustada en continentes. Múltiples episodios de serpentinización durante su metamorfismo.

Cratones Precámbricos Intraplaca

Rocas cristalinas antiguas y profundas en el corazón de los continentes. Demuestran que el H₂ no es exclusivo de los fondos marinos.

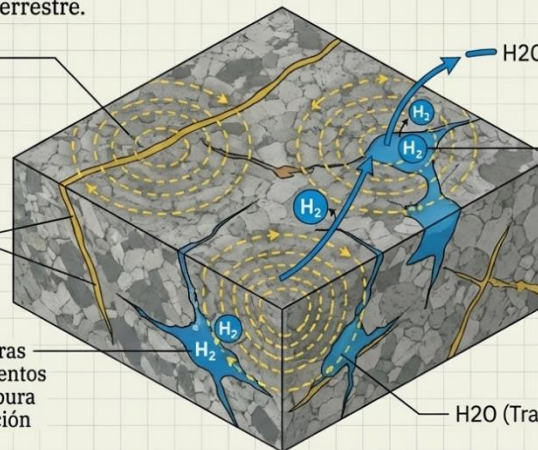
Motor secundario: Radiólisis

La radiólisis no requiere altas temperaturas ni formaciones ultramáficas. Depende de la presencia de agua y de la desintegración radiactiva natural de elementos como el Uranio (U), el Torio (Th) y el Potasio (K) presentes en la corteza terrestre.

- **Energía Ionizante:** La desintegración emite rayos α , β y γ .

U, Th, K Deposits

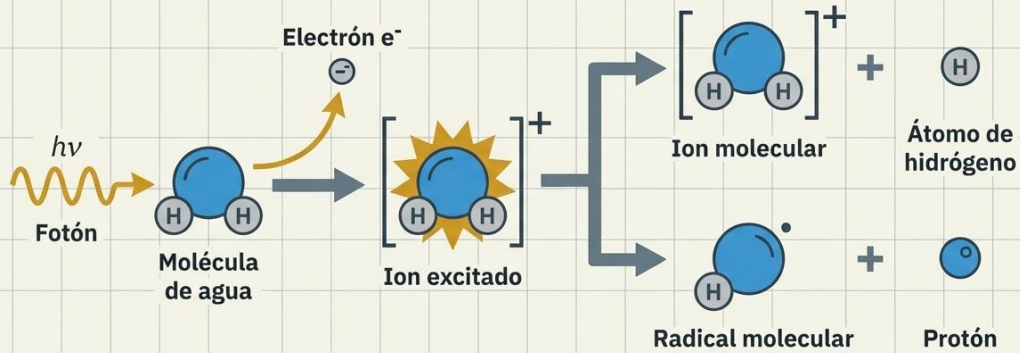
- **Efecto Salino:** Las salmueras generan mayores rendimientos de hidrógeno que el agua pura debido al efecto de ionización de las sales.



- **Porosidad Crítica:** El rendimiento de H₂ es directamente proporcional a la porosidad de la roca llena de agua, ya que la matriz mineral absorbe la mayor parte de la energía.

H₂O (Trapped Water)

El proceso de la radiólisis



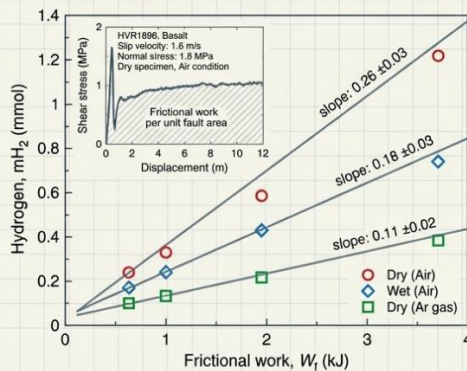
Key Insight: A diferencia de la serpentinización, la radiólisis genera tanto reductores (H_2) como oxidantes solubles (H_2O_2 , O_2). Esta co-generación es la huella digital geoquímica de este proceso.

Motores abióticos principales

	Serpentinización	Radiólisis
Mecanismo Químico	Interacción agua-roca (Redox)	Disociación por energía ionizante
Catalizador Principal	Hierro reducido (Fe^{2+}) + Calor	Desintegración natural (U, Th, K)
Roca Huésped Requerida	Ultramáfica / Máfica (Rica en Olivino/Piroxeno)	Basamento Cristalino / Rocas Ígneas Felsicas
Subproductos Clave	Magnetita, Serpentina, Brucita	Oxígeno (O_2), Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2), Helio ($4He$)
Ubicación Típica	Dorsales oceánicas, Ofilitas continentales	Cratones Precámbricos, Zonas ricas en uranio

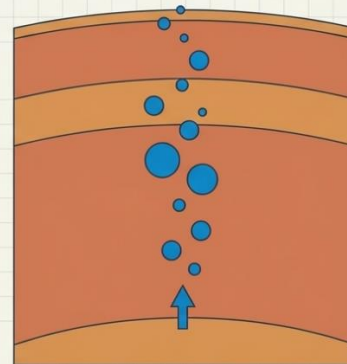
Motores terciarios: Fricción y profundidad

Cataclisis (Procesos Mecanorradicales)



- **Mecanismo:** La constante fricción en las fallas tectónicas sísmicamente activas rompe los enlaces Si-O en los silicatos.
 - **Reacción:** Produce radicales superficiales que reaccionan con las aguas subterráneas para generar H_2 . Es una fuente localizada, pero altamente activa.

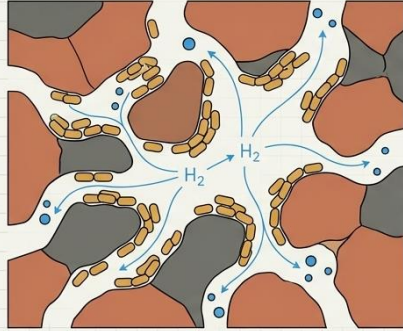
Desgasificación Profunda (Manto/Núcleo)



- **Mecanismo:** El H_2 atrapado desde la formación del planeta en la zona de transición o en el núcleo de la Tierra.
 - **Proceso:** Liberado gradualmente durante la desgasificación del magma o el vulcanismo.

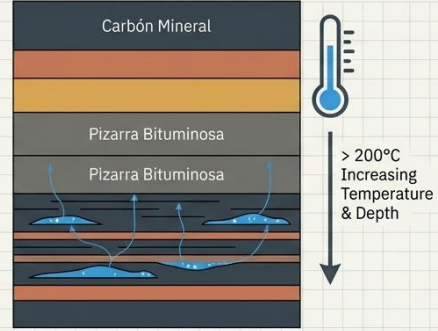
Motores terciarios: Biología y termogénesis

Actividad Biológica (Fermentación)



- **Mecanismo:** Procesos de descomposición de materia orgánica o fijación de nitrógeno por comunidades microbianas en la biósfera profunda.
- **Dinámica:** Las bacterias a menudo actúan más como consumidoras de H₂ (para generar metano), pero cepas específicas pueden producirlo temporalmente como subproducto.

Maduración Térmica (Termogénesis)

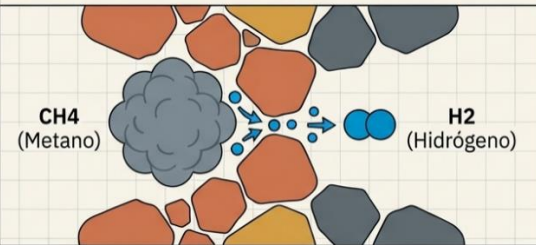


- **Mecanismo:** A profundidades extremas y temperaturas superiores a los 200°C, la pirólisis tardía de la materia orgánica, especialmente de kerógeno inestable y carbón mineral.
- **Resultado:** Genera H₂ que puede quedar atrapado en nanoporos, aunque generalmente está mezclado con metano y otros gases secos.

La migración del hidrógeno

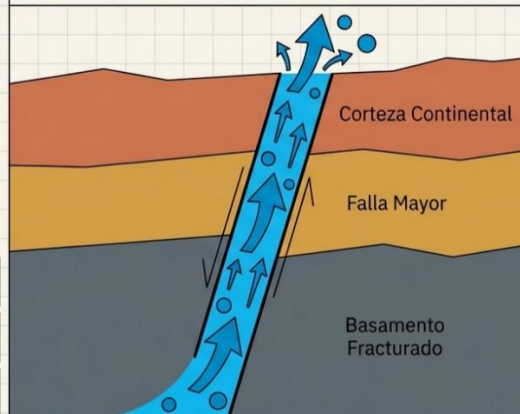
El hidrógeno es la molécula más pequeña, ligera y difusiva del universo. Generarlo es común; atraparlo es el verdadero reto geológico.

Micro-escala: Permeabilidad Diferencial

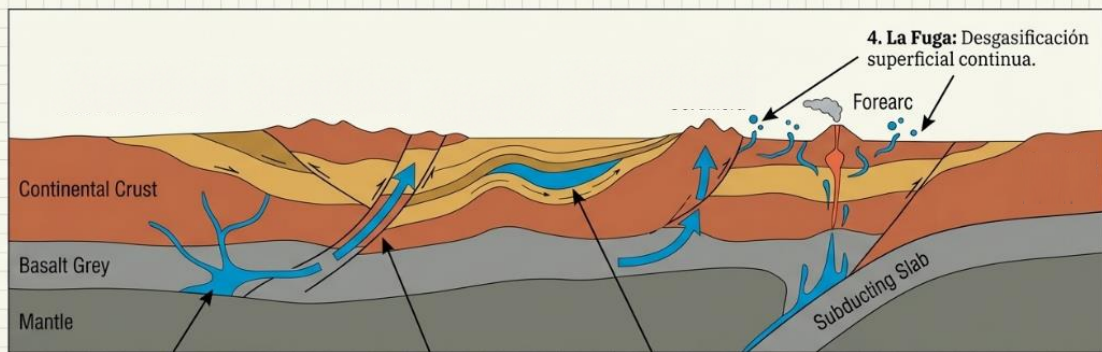


1. **Alta Movilidad:** Las moléculas diatómicas de H₂ penetran rocas sellantes que normalmente atraparían hidrocarburos.
2. **Químicamente Reactivo:** Durante su ascenso, el H₂ puede ser consumido por bacterias litotróficas o reaccionar con carbono para formar metano.
3. **Trampas Dinámicas:** Los sistemas viables funcionan como cuellos de botella geológicos: la tasa de recarga continua supera la tasa de escape.

Macro-escala: Fuga por Fallas



El sistema del hidrógeno natural



1. **La Fuente:** Radiólisis en el basamento cristalino y serpentinización profunda.
2. **La Migración:** Ascenso vertical a través de sistemas de fallas mayores.
3. **El Sello y la Trampa:** Capas impermeables de sal o arcilla forzando la acumulación.
4. **La Fuga:** Desgasificación superficial continua.

El ciclo subterráneo del Hidrógeno

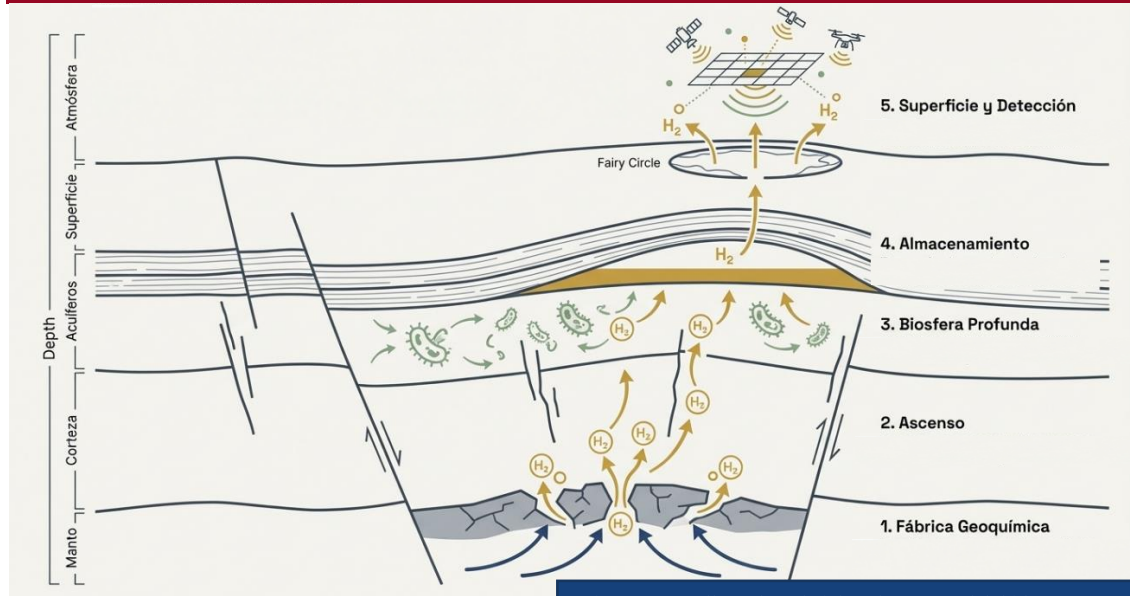


Figura 5. Detalles sobre el ciclo subterráneo del hidrógeno natural

La **fábrica geoquímica** constituye el origen y el motor del ciclo del hidrógeno (H_2) en el subsuelo, donde el gas se genera continuamente a través de diversos procesos fisicoquímicos en la corteza terrestre.

El **ascenso** describe las rutas de migración que toma el hidrógeno desde su fuente profunda de generación hacia horizontes menos profundos. La molécula de H_2 aprovecha los sistemas de fallas profundamente enraizadas y las redes de fracturas de la corteza terrestre, los cuales actúan como conductos preferenciales para su circulación rápida. La tectónica regional, junto con los gradientes de presión generados por la misma alteración de las rocas, facilitan el bombeo y la canalización de estos fluidos ricos en H_2 hacia la superficie o hacia trampas geológicas.

A lo largo de sus rutas de ascenso, el hidrógeno entra en contacto con la **biosfera profunda**, donde actúa como un pilar fundamental para sostener ecosistemas microbianos litotróficos del subsuelo (SLiMEs), los cuales son completamente independientes de la luz solar y la fotosíntesis. En este entorno, el H_2 es un donante de electrones altamente energético y es consumido velozmente por microorganismos adaptados a condiciones extremas. Los principales sumideros biológicos de hidrógeno incluyen a las arqueas metanógenas (que utilizan el H_2 para reducir el dióxido de carbono y producir metano), así como a las bacterias reductoras de sulfato y acetógenas. Esta inmensa actividad de la biosfera profunda sirve como un "filtro" dinámico que puede consumir enormes

cantidades del hidrógeno ascendente antes de que llegue a la superficie, alterando las proporciones originales de los gases generados en la fábrica geoquímica.

El **almacenamiento** ocurre cuando el hidrógeno, en lugar de ser consumido por completo o escapar a la atmósfera, encuentra trampas estructurales o estratigráficas que permiten su acumulación comercial. Las formaciones de sal (evaporitas) se consideran uno de los mejores sellos debido a su naturaleza inerte frente al H_2 y a su extrema impermeabilidad. Otras litologías que pueden actuar como sellos efectivos incluyen estratos gruesos de arcillas/lutitas e intrusiones ígneas duras.

En la etapa de **superficie y detección**, el hidrógeno que logra sobrepasar los sumideros biológicos y carece de trampas geológicas se filtra hacia el exterior. A menudo, estas emanaciones se asocian con depresiones subcirculares en el suelo conocidas popularmente como "círculos de hadas". Estos escapes generan anomalías en la vegetación, como áreas centrales yermas bordeadas por anillos de vegetación inusualmente saludable, características fácilmente identificables mediante el uso de índices de vegetación (como el SAVI) e imágenes satelitales en las fases previas de exploración.

Diferencias del sistema de H₂ vs hidrocarburos

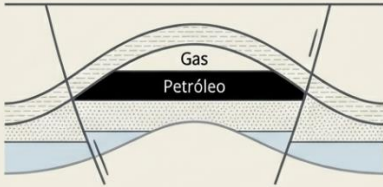

Sistemas de Hidrocarburos		Sistemas de Hidrógeno Natural	
			
Origen	Biológico (materia orgánica degradada)	Abiótico (Radiólisis y Serpentinización profunda)	
Escala de Tiempo	Geológica (Millones de años)	Humana (Renovabilidad continua)	
Comportamiento	Sistema Cerrado (Acumulación estática)	Sistema Abierto (Migración activa, efecto cuello de botella)	
Trazadores	Gases nobles controlados por el acuífero original	Fraccionamiento agresivo por destilación migratoria	

Figura 6. Principales diferencias entre un sistema de hidrógeno y un sistema de hidrocarburos

El sistema de hidrógeno natural y el sistema de hidrocarburos (petróleo y gas natural) presentan diferencias fundamentales en su origen, la velocidad de su generación, sus mecanismos de migración y sus condiciones de entrapamiento y preservación. A continuación, se detallan las diferencias más importantes:

Roca generadora (Protolito) y mecanismo de origen

Hidrocarburos: Se originan a partir de la descomposición y maduración térmica (pirólisis) de materia orgánica (como el querógeno) contenida en rocas sedimentarias. Por lo general, la roca madre se encuentra dentro de la misma cuenca sedimentaria por la que los fluidos migrarán posteriormente.

Hidrógeno natural: Su origen es principalmente inorgánico y abiótico, producto de reacciones geoquímicas profundas como la reducción del agua mediante la serpentinización de rocas ricas en hierro (rocas ultramáficas o máficas), la radiólisis del agua por desintegración radiactiva (en rocas del basamento precámbrico) y la desgasificación del manto. El protolito o "roca fuente" del hidrógeno suele ubicarse en el basamento cristalino o en la corteza profunda, estando geológicamente separado de los sedimentos por los que el gas migra hacia la superficie.

Escala temporal de generación y renovabilidad

Hidrocarburos: La generación de petróleo y gas es un proceso extremadamente lento que toma desde millones hasta decenas de millones de años, lo que clasifica a los hidrocarburos como combustibles fósiles no renovables a escala humana.

Hidrógeno natural: La generación de hidrógeno es geológicamente "instantánea" y sumamente activa, ocurriendo en escalas de tiempo que van desde años hasta décadas. Debido a este flujo constante de generación en el subsuelo, el hidrógeno se considera un recurso dinámico y renovable a escala de tiempo humana.

Migración y distancia hacia el reservorio

Hidrocarburos: El gas natural y el petróleo son más pesados, menos difusivos y más estables. Pueden migrar de forma advectiva a través de largas distancias desde su roca generadora hasta el reservorio sin consumirse en el camino.

Hidrógeno natural: Al ser la molécula más pequeña del universo, el hidrógeno posee una difusividad, movilidad y reactividad química muy superiores a las del metano o el dióxido de

carbono. El hidrógeno migra predominantemente en fase gaseosa y disuelto en agua a velocidades mucho mayores, provocando un flujo de filtración hacia la superficie (seepages) que puede ser hasta cinco órdenes de magnitud (100.000 veces) mayor que las filtraciones de hidrocarburos. Dado que el hidrógeno se consume rápidamente por reacciones biológicas (bacterias) y geoquímicas en su ascenso, los yacimientos económicos probablemente requieran distancias de migración mucho más cortas entre la roca madre y la trampa.

Entrampamiento y rocas sello

Hidrocarburos: Las trampas de hidrocarburos dependen típicamente de rocas sello impermeables convencionales como lutitas (shales), limolitas o areniscas altamente cementadas.

Hidrógeno natural: Por su altísima flotabilidad y tamaño diminuto, el hidrógeno es extremadamente difícil de contener; atraviesa fácilmente los sellos convencionales de los hidrocarburos. Para atrapar hidrógeno de manera efectiva, se requieren formaciones rocosas extremadamente densas e impermeables, como depósitos de sal (evaporitas), carbonatos muy compactos o intrusiones rocosas ígneas, como los sills de dolerita que actúan como barreras de fluidos en yacimientos como el de Malí.

Preservación y dinámica del yacimiento

Hidrocarburos: Los sistemas petroleros funcionan en su mayoría como sistemas cerrados donde los fluidos pueden permanecer preservados de forma estática en las rocas del reservorio durante millones de años.

Hidrógeno natural: Constituye un sistema abierto y dinámico. Debido a su altísima reactividad y a que sirve como nutriente principal para comunidades microbianas profundas, el hidrógeno que no logra una acumulación perfecta se oxida o consume rápidamente. Esto resulta en tiempos de residencia muy cortos en el subsuelo, estimándose que la vida de una molécula en un yacimiento varía apenas entre 10 y 100 años. Además, durante su migración, el gas sufre procesos de fraccionamiento físico intensos con acuíferos (como la destilación de Rayleigh), en constante renovación frente a las pérdidas. Si la tasa de recarga desde el basamento no supera la tasa de fuga o consumo, la acumulación no se mantiene estable.



Figura 7. Análisis del comportamiento de fluidos en el Grupo Bambuí, cuenca São Francisco, Brasil [14]

¿Qué es el proceso de destilación de Rayleigh?

El proceso de destilación de Rayleigh aplicado a los gases es un modelo de fraccionamiento físico (destilación fraccionada) que ocurre cuando dos fases se encuentran en equilibrio, pero una de ellas es removida del sistema de manera sistemática y continua.

¿Cómo funciona este proceso en el subsuelo?

Interacción Gas-Agua en un sistema abierto:

Cuando una fase gaseosa asciende hacia la superficie y cruza un acuífero, interactúa físicamente con el agua. Esta agua contiene gases nobles fósiles disueltos (como el neón-20, argón-36 y criptón-84) que originalmente estaban en equilibrio con la atmósfera.

Exsolución y diferencias de solubilidad: A medida que el gas pasa, los gases nobles disueltos en el agua tienden a escapar (exsolverse) hacia las burbujas del gas migratorio. Sin embargo, cada gas noble tiene diferentes tasas de solubilidad y difusión.

El efecto de destilación fraccionada: Como el sistema es abierto y el gas continúa su camino hacia arriba, se genera un fraccionamiento. Inicialmente, el gas que se forma extrae de manera mucho más eficiente los elementos más ligeros, menos solubles y más difusivos, como el neón. Conforme el gas fluye y abandona el sistema, el agua residual se empobrece de estos isótopos ligeros. Con el paso del tiempo, las burbujas de gas que continúan extrayéndose estarán cada vez más enriquecidas en los isótopos más pesados y de exsolución más lenta, como el argón y el criptón.

Importancia en la exploración de hidrógeno

Evidencia de sistemas dinámicos y renovables: A diferencia de los yacimientos de hidrocarburos, que actúan predominantemente como sistemas estáticos y cerrados, las firmas isotópicas de los gases nobles en el hidrógeno natural muestran que este sufre una destilación de Rayleigh. Esto confirma que el hidrógeno opera en un sistema abierto y extremadamente rápido, sufriendo pérdidas y recargas continuas durante su flujo hacia la superficie.

Descarte de mezclas simples: Explica por qué las proporciones de gases nobles medidas en el hidrógeno natural en todo el mundo no siguen una línea de mezcla simple o recta entre el aire y el agua, sino que forman una curva característica que sólo puede justificarse mediante este fraccionamiento cinético.

Estimación de la profundidad de origen: Al ajustar los datos de los gases a la ecuación matemática de Rayleigh, los científicos pueden deducir la temperatura termodinámica en la que el gas y el agua estuvieron en equilibrio. En varios sistemas estudiados, el modelo encaja perfectamente si se asume una temperatura de exsolución cercana a los 70 °C. Considerando el gradiente térmico natural de la Tierra, esto revela que el hidrógeno comienza a separarse del agua y a migrar como una fase gaseosa independiente a profundidades de aproximadamente 2 kilómetros.

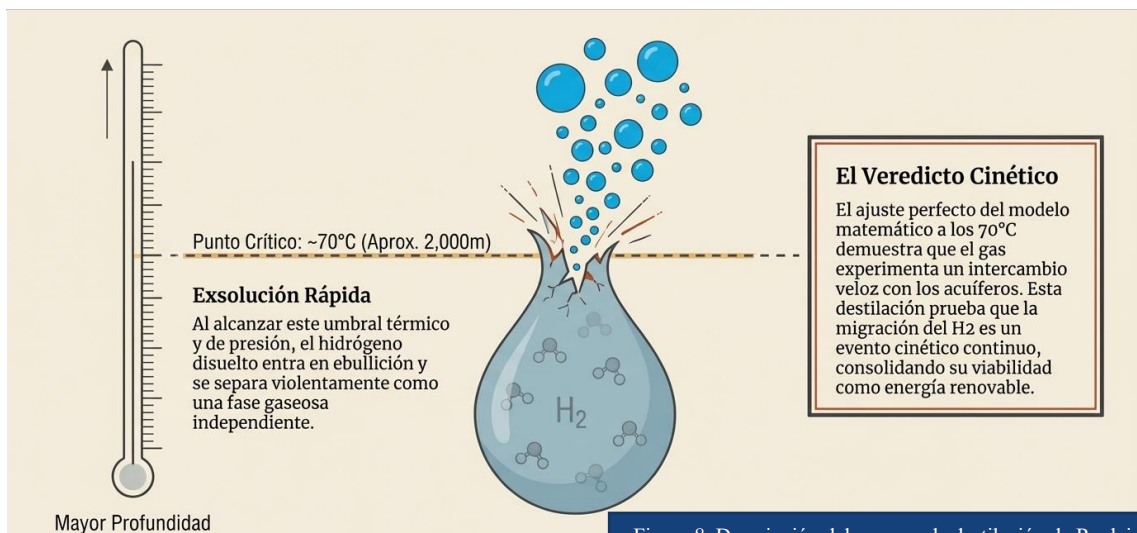


Figura 8. Descripción del proceso de destilación de Rayleigh

¿Como se extrae el H₂ Natural del subsuelo?

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 H₂. Se debe evitar que el gas 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 H₂ puede fragilizar y fracturar las tuberías; por tanto, deben emplearse materiales resistentes.”

-[8]

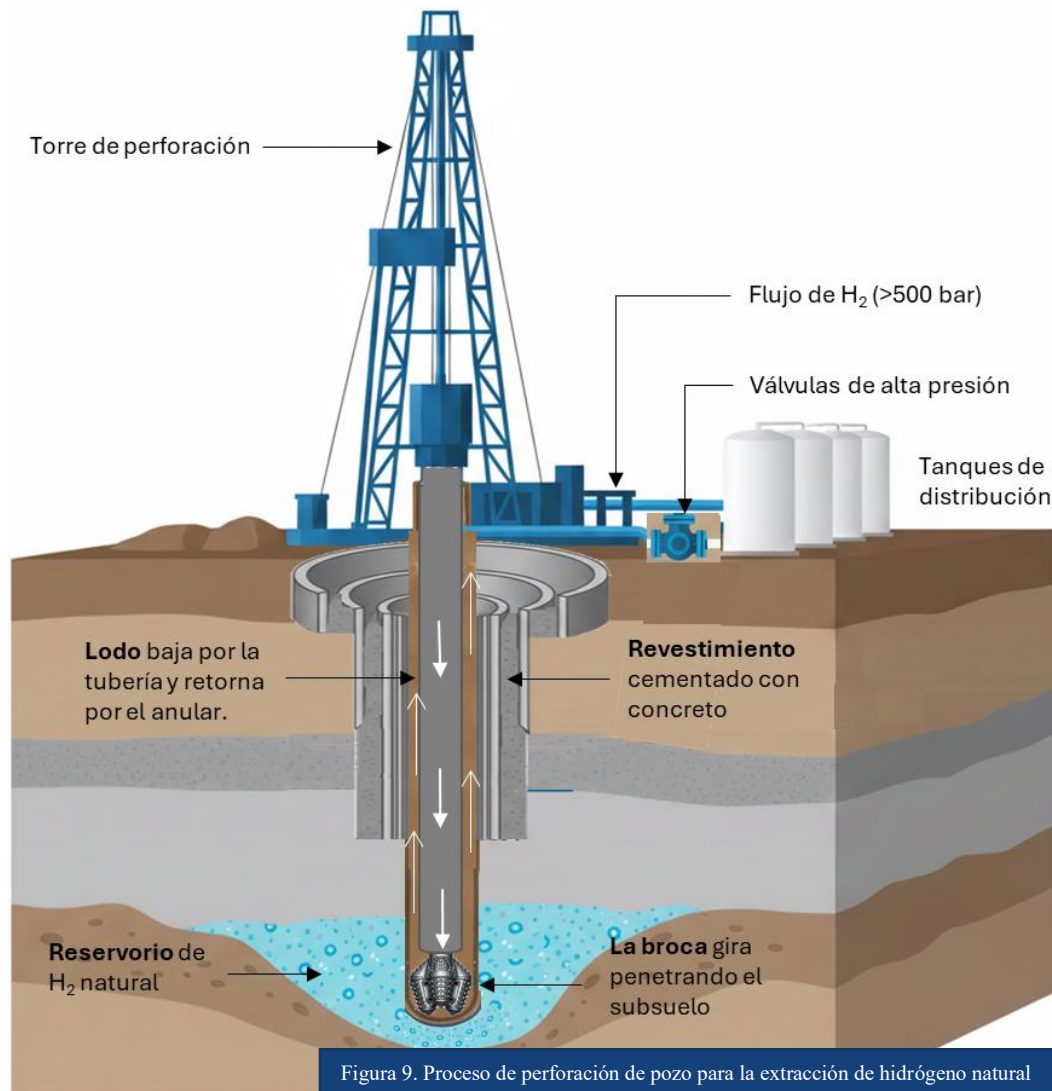


Figura 9. Proceso de perforación de pozo para la extracción de hidrógeno natural

Estratigrafía y retención de Hidrógeno

Si el hidrógeno es un fluido cinético continuo, su rentabilidad comercial depende de los cuellos de botella geológicos que lo agrupan temporalmente.

El Desafío de Datación

Para predecir y modelar estas acumulaciones temporales, es imperativo datar con precisión milimétrica la edad y naturaleza de los grupos sedimentarios superiores (las rocas sello).

La bioestratigrafía proporciona el reloj geológico más riguroso para descifrar la arquitectura de estas cuencas intra-cratónicas y asegurar la interceptación del flujo.

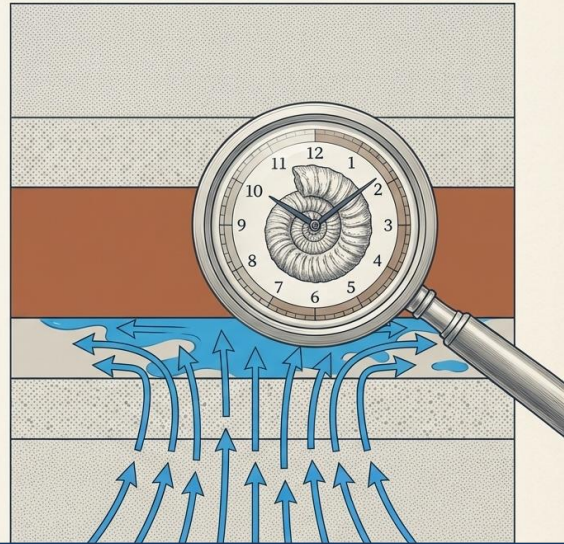


Figura 10. Papel de la bioestratigrafía en las acumulaciones de hidrógeno natural

En los sistemas de hidrógeno natural, la "retención dinámica" hace referencia a la capacidad del subsuelo para acumular temporalmente un gas que está en constante generación, migración y consumo. En este contexto, la estratigrafía juega el papel fundamental de modular el equilibrio entre las tasas de migración desde las zonas de generación activa y las tasas de pérdida o filtración hacia la superficie.

Provisión de sellos impermeables no convencionales

Para lograr una retención dinámica del hidrógeno que permita una acumulación comercial, la estratigrafía debe contar con capas de roca con permeabilidad y porosidad extremadamente bajas.

Intrusiones ígneas: En el emblemático campo de Bourakebougou en Malí, el entrapamiento depende de la presencia estratigráfica de intrusiones masivas de dolerita (sills) con una baja densidad de fracturas. Curiosamente, la estratigrafía de arcillas limosas (silty shales) ubicadas debajo de las doleritas no demostró tener ningún impacto en la retención del hidrógeno, desafiando los conceptos petroleros tradicionales.

Evaporitas: Las secuencias estratigráficas que contienen capas de sal (halita) o evaporitas, como las observadas en la Cuenca de Amadeus en Australia, actúan como sellos excepcionalmente efectivos debido a su nula permeabilidad, previniendo que el hidrógeno ascienda y escape.

Los acuíferos y el agua como barreras de permeabilidad

El hidrógeno tiene una solubilidad muy baja en agua a condiciones de baja presión y temperatura somera. Debido a esto, las formaciones geológicas saturadas de agua (acuíferos) pueden comportarse físicamente como medios impermeables para el hidrógeno. Cuando el gas asciende y se encuentra con el agua en la estratigrafía, su avance se retrasa drásticamente, favoreciendo la retención. Esto puede generar acumulaciones sobrepresurizadas y sistemas dinámicos tipo géiser (o "gas lift"), donde una fase gaseosa liberada empuja el agua hacia la superficie de forma eruptiva.

Modificación diagenética de los estratos (Generación de porosidad)

El hidrógeno puede alterar la composición química de las rocas estratificadas por las que migra. Al reaccionar con los minerales, produce agua y compuestos solubles que se movilizan, induciendo un aumento en la porosidad y creando de forma dinámica sus propios canales preferenciales de ascenso. Esto significa que el hidrógeno no solo se adapta a la estratigrafía existente, sino que puede modificar físicamente los estratos durante su flujo

Rocas generadoras de Hidrógeno



Figura 11. Tipos de rocas generadoras de hidrógeno natural en el subsuelo

En el contexto de la exploración de hidrógeno natural, las rocas generadoras se dividen de manera diagnóstica en cuatro grupos principales (H₂ GR), basados en la litología y en el proceso geoquímico específico que origina el gas:

H₂ GR1 (Rocas básicas y ultrabásicas de afinidad oceánica/mantélica): Este grupo incluye rocas como las peridotitas, gabros y basaltos. El hidrógeno se genera a través de reacciones de alteración hidrotermal, destacando principalmente el proceso de serpentinización. En este proceso, minerales ferromagnesianos como el olivino y el piroxeno se oxidan e hidratan, reduciendo el agua circundante y liberando H₂.

H₂ GR2 (Rocas portadoras de hierro): Comprende rocas sedimentarias, como las formaciones de hierro bandeado (BIF), y rocas intrusivas, como los granitos ricos en biotita. La generación de hidrógeno se produce por medio de reacciones redox (oxidación-reducción) en las cuales el hierro ferroso (Fe²⁺) contenido en las rocas se oxida durante su interacción con el agua.

H₂ GR3 (Rocas radiactivas): Consiste en rocas de la corteza continental que contienen minerales ricos en uranio (U), torio (Th) y potasio (K). El hidrógeno se genera mediante la radiólisis del agua, un proceso en el cual la desintegración radiactiva natural de estos elementos disocia las moléculas de agua presentes en los poros de la roca.

H₂ GR4 (Rocas ricas en materia orgánica): Incluye rocas como el carbón, las lutitas y las lutitas carbonosas. La generación de H₂ en este grupo es resultado de la maduración tardía (pirólisis o craqueo térmico) de la materia orgánica a altas temperaturas. A diferencia de los otros tres grupos, esta es la única categoría que genera hidrógeno de forma completamente independiente de las interacciones con el agua.

Cuando se trata de diagnosticar el origen de gases hidrocarburos termogénicos (aquellos formados por la descomposición térmica), las rocas generadoras se evalúan y clasifican según la madurez y el tipo de materia orgánica (querógeno), lo cual puede determinarse aplicando modelos de proporciones de isótopos estables de carbono. De forma diagnóstica, se dividen típicamente en:

Tipo II: Rocas generadoras que contienen materia orgánica de origen marino o sapropélico.

Tipo III: Rocas generadoras que son ricas en materia orgánica de origen terrestre (restos de plantas y desechos continentales). Se ha diagnosticado que, por ejemplo, para la expulsión de gases como etano y propano de origen termogénico, esta roca debe alcanzar un grado específico de madurez térmica (medido entre el 1.3% y el 1.5% de reflectancia de la vitrinita).

¿Cómo encontramos Hidrógeno Natural?

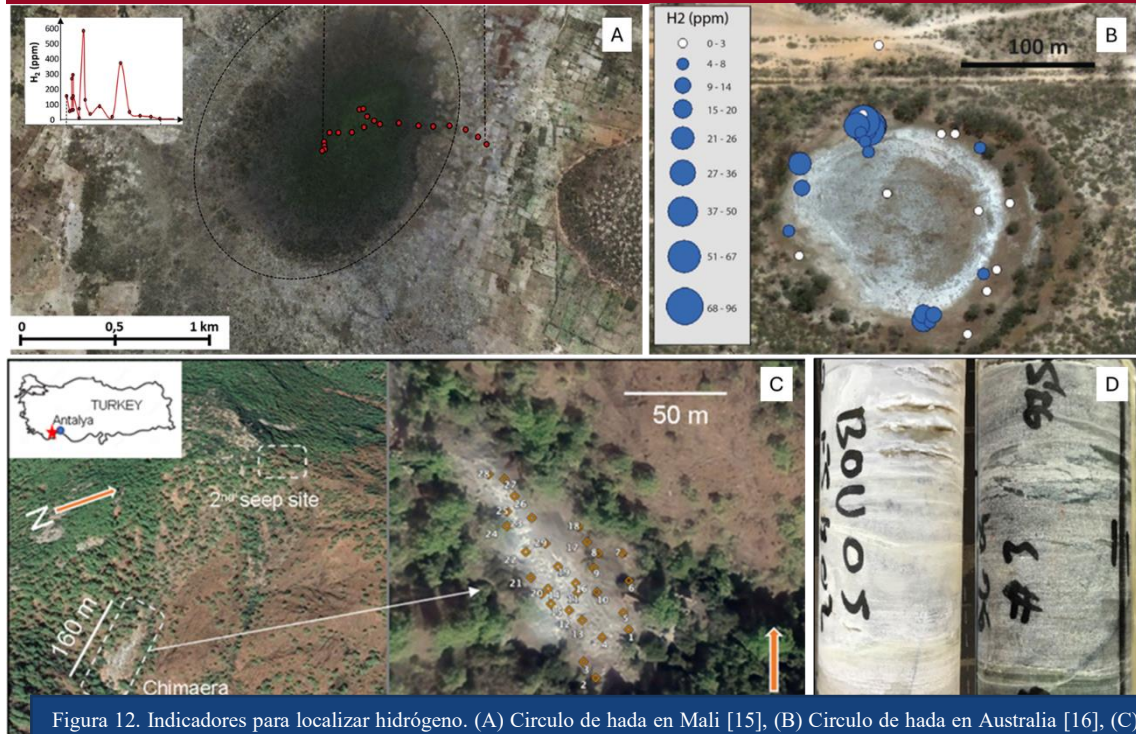


Figura 12. Indicadores para localizar hidrógeno. (A) Círculo de hada en Mali [15], (B) Círculo de hada en Australia [16], (C) Emanaciones de gas en Turquía [10], (D) Rocas extraídas de pozos en Mali, Africa

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.

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

Entornos geológicos de interés

Indicadores visuales en la superficie

La búsqueda se concentra en regiones donde ocurren procesos químicos que liberan H₂ de forma masiva:

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

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 (Fe²⁺).

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.

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

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].

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

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].

Círculos de hadas

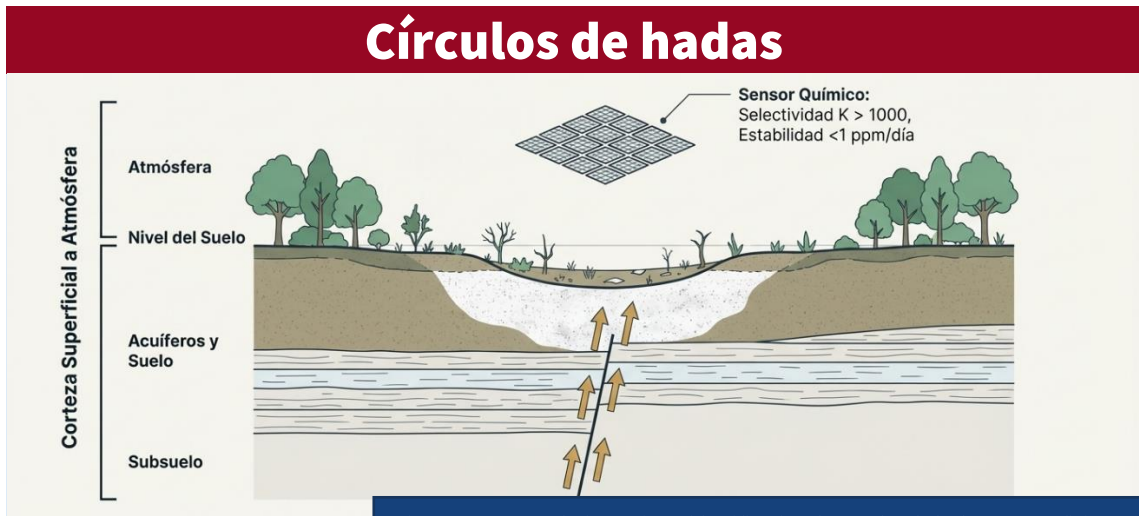


Figura 13 Proceso de formación e identificación de círculos de hadas en superficie

Los "círculos de hadas" (también conocidos como depresiones subcirculares o SCD por sus siglas en inglés) son depresiones superficiales en el terreno, de forma circular u ovoide, que están asociadas de manera directa con la emanación o filtración natural de gas hidrógeno (H_2) desde el subsuelo.

Físicamente, tienen un diámetro que varía desde unos pocos metros hasta 1 kilómetro, pero son muy poco profundos (generalmente con menos de 10 metros de profundidad) y presentan bordes con pendientes muy suaves, típicamente menores al 3%. Estos círculos pueden intersecarse entre sí y a menudo crecen al fusionarse debido a la filtración de los gases. Una de sus características más notorias es el impacto que la emanación de hidrógeno tiene sobre la flora local. En regiones de clima seco, templado o mediterráneo (como en zonas de Rusia, Estados Unidos, Brasil, Australia y Namibia), se manifiestan como claros o brechas donde la vegetación desaparece en el centro de la depresión, mientras que en los anillos externos la vegetación se mantiene saludable.

Sin embargo, en climas tropicales y muy húmedos, como en el Valle del Cauca-Patía en Colombia, la vegetación no desaparece por completo, sino que presenta anomalías visuales, tales como cultivos de menor altura o el crecimiento de especies vegetales distintas (como el bambú) en su interior.

Debido a que los suelos de estas depresiones contienen con frecuencia altas concentraciones de gas hidrógeno (a veces acompañadas de emanaciones de CO_2 y radón), los círculos de hadas se han convertido en un indicador clave y una herramienta de exploración fundamental para localizar yacimientos subterráneos de hidrógeno natural (conocido como hidrógeno "blanco" o "dorado") en cuencas intracratónicas de diversas partes del mundo. Hoy en día, los geólogos los identifican fácilmente a gran escala mediante el análisis de imágenes satelitales, modelos de elevación digital y herramientas de teledetección multiespectral.

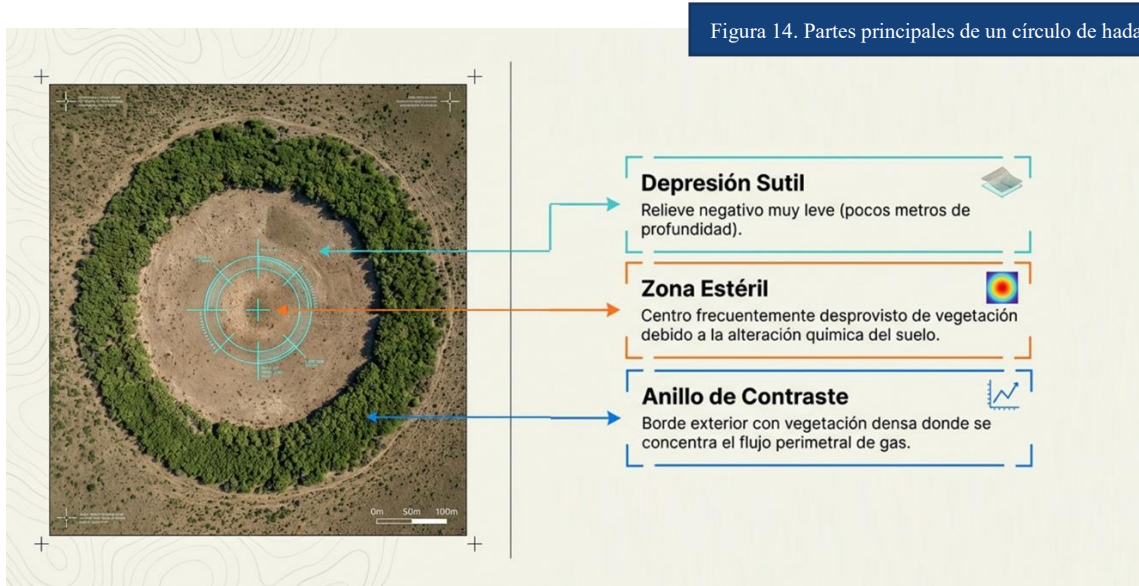


Figura 14. Partes principales de un círculo de hada

Flujo de trabajo para la exploración de H₂



Figura 15. Flujo de trabajo para la exploración superficial de hidrógeno natural

El flujo de trabajo integral para la exploración de hidrógeno natural se divide en tres fases principales: el trabajo previo al campo, el trabajo de campo y los análisis de laboratorio.

En el trabajo previo al campo (Pre-fieldwork) el objetivo es identificar puntos calientes ("hot spots") de H₂ mediante la revisión de datos y sensores remotos antes de ir al terreno. Se buscan áreas que contengan rocas generadoras de H₂. Se analiza literatura, informes de pozos de petróleo/gas, hidrogeológicos o mineros históricos donde se hayan reportado inlfujos de gas o concentraciones anómalas de H₂. También se buscan evidencias en datos sísmicos (como chimeneas de gas), ventilaciones de gas libre o fuentes de aguas burbujeantes (a menudo hiperalcalinas). Posteriormente, se buscan depresiones subcirculares (SCDs o "anillos de hadas") que son indicadores comunes de flujo de H₂ en el suelo.

El trabajo de campo (Fieldwork) consiste en la adquisición de datos de gases in situ y la recolección de muestras de rocas potenciales. El flujo de gas se debe canalizar adecuadamente mediante tubos o sondas para evitar la contaminación con aire atmosférico, dependiendo de si proviene de pozos, agua burbujeante o del suelo. Debido a que las emisiones de H₂ varían espacial y temporalmente, no basta con una sola medición. Se debe realizar un monitoreo a largo plazo con sondas enterradas para medir los pulsos

cíclicos de gas. Se toman muestras de rocas y núcleos de perforación en diferentes puntos para estudiar su heterogeneidad. En campo, se utilizan instrumentos de Fluorescencia de Rayos X (XRF) portátil para medir los elementos principales y kapámetros para evaluar la susceptibilidad magnética (determinada por la presencia de magnetita, un subproducto de la generación de H₂).

En el trabajo posterior al campo (Análisis de laboratorio) las muestras recolectadas se estudian detalladamente para entender los mecanismos de generación y el origen de los gases. Se utiliza Cromatografía de Gases (GC) para cuantificar con precisión la composición química de la mezcla. Se emplea la Espectrometría de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS) para determinar las firmas isotópicas, lo cual ayuda a definir los parámetros fisicoquímicos del origen, atrapamiento y migración del H₂. Se emplean técnicas como ICP y XRF para determinar concentraciones de Fe, U, Th y K. La espectroscopía Mössbauer de ⁵⁷Fe es crucial para determinar el estado de oxidación del hierro (Fe²⁺/Fe³⁺) y evaluar el potencial generador restante. La mineralogía se detalla con Difracción de Rayos X (XRD) y microscopía óptica o electrónica (SEM, TEM, EPMA) para identificar qué minerales específicos albergan los elementos generadores. La microtomografía de rayos X (XCT) se usa para evaluar la porosidad y las fases minerales en 3D y la pirólisis Rock-Eval para rocas ricas en materia orgánica

Métodos de exploración superficial de H₂

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 H₂ 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 H₂ 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 H₂, He y N₂, 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, cristal o atmosférico).

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

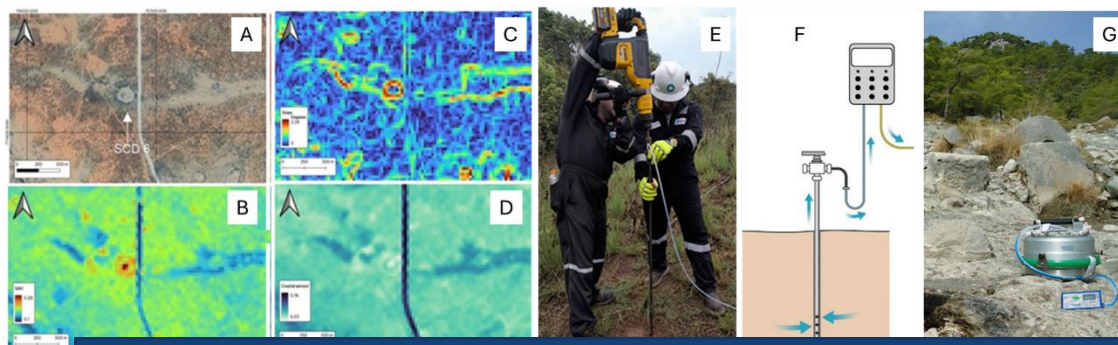


Figura 16. Métodos para exploración superficial de H₂. (A) Imagen satelital, (B) Índice SAVI, (C) Pendiente, (D) Índice de aerosol, (E) Equipo de muestreo superficial [17], (F) Sonda y sensor geoquímico [17], (G) Cámara cerrada de flujo

Métodos de exploración de H₂ en el subsuelo

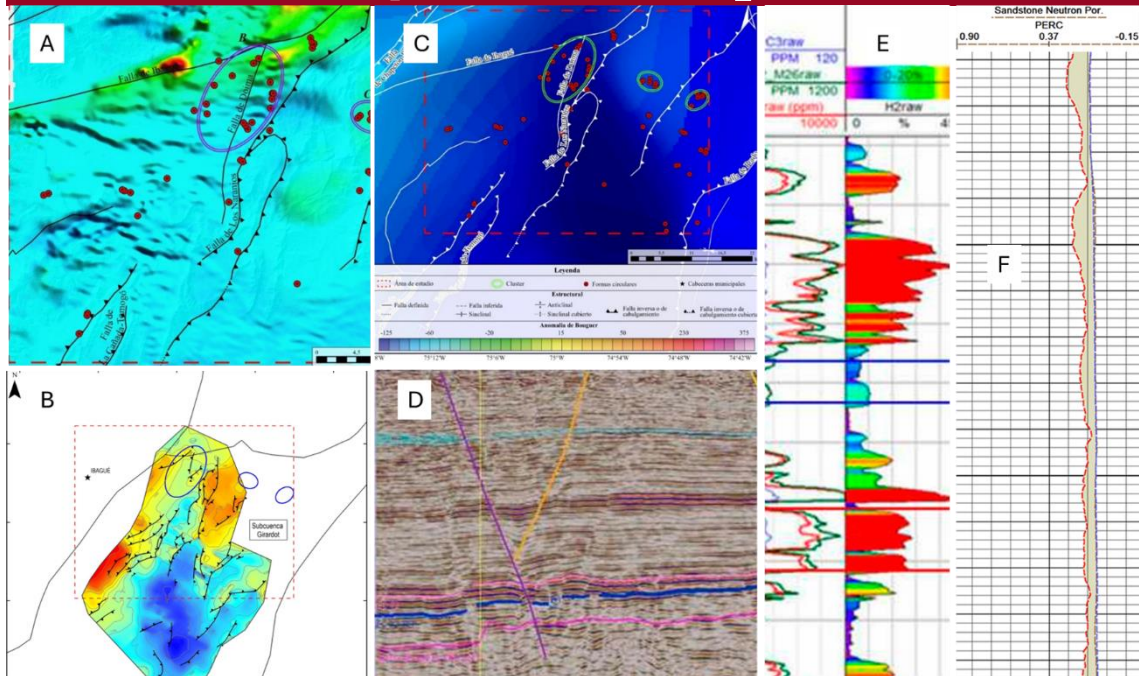


Figura 17. Métodos de exploración de H₂ en el subsuelo. (A) Mapa magnetométrico, (B) Mapa de basamento en tiempo sísmico, (C) Mapa gravimétrico, (D) Interpretación sísmica [13], (E) Registro de gases [13], (F) Registro Neutrón.

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.

Métodos geofísicos de subsuelo

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 H₂.

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

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

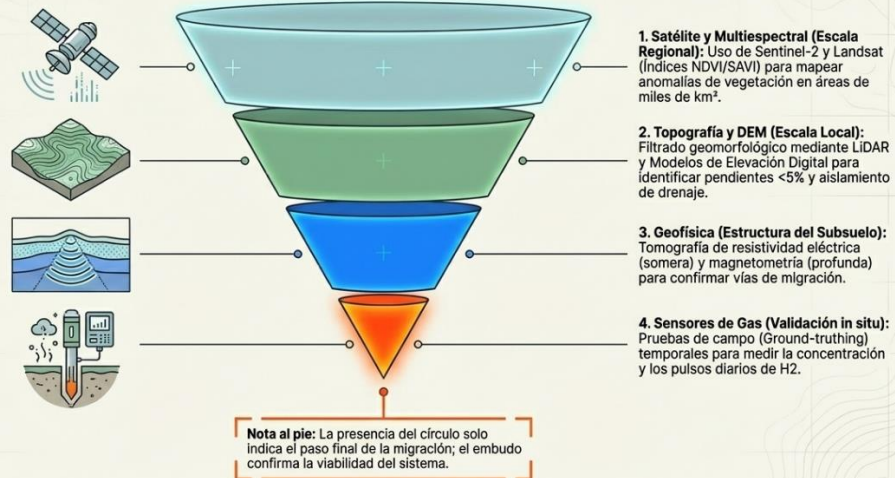
Prospección sísmica: Aunque el hidrógeno es difícil de visualizar directamente por sí solo, la sísmica se usa para mapear trampas estructurales, fallas y la arquitectura del reservorio, similar a la exploración de hidrocarburos.

Técnicas de perforación y muestreo directo

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.

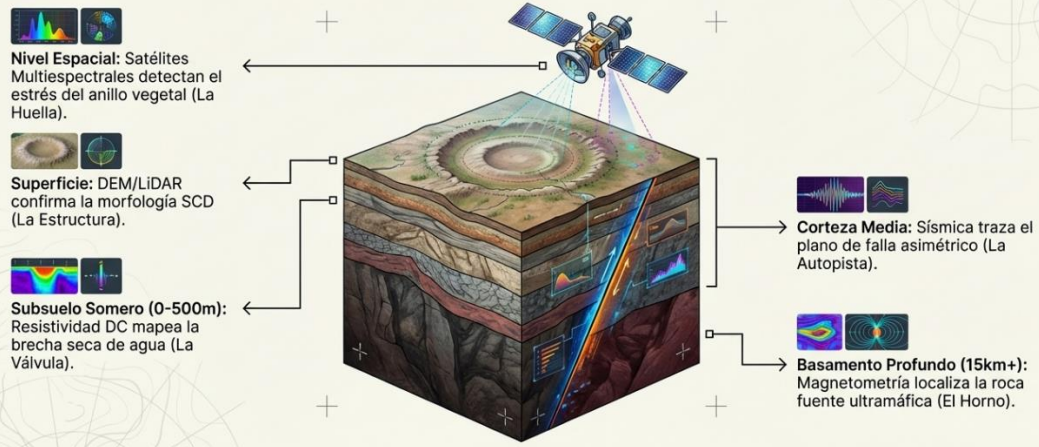
Perfilaje de Neutrones (Neutron Logging): Es una herramienta fundamental para identificar potenciales reservorios de gas hidrógeno. Los valores de neutrones reflejan el contenido de átomos de hidrógeno en los fluidos; un desajuste significativo entre los perfiles de neutrón y de densidad (efecto de gas)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

Flujo de teledetección y análisis superficial



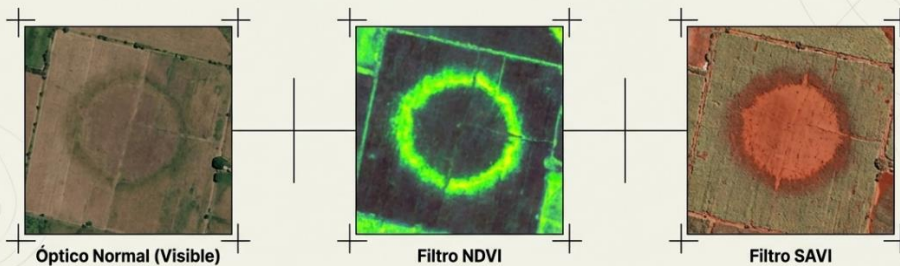
Flujo integrado de exploración de Hidrógeno

La teledetección de superficie es el primer paso, no el último. Un objetivo des-riesgado requiere que todas las capas geofísicas cuenten la misma historia.



Firmas multispectrales y estrés vegetal

La detección óptica requiere ir más allá del espectro visible. Algoritmos automatizados escanean vastas áreas **utilizando índices** específicos para aislar el "anillo de contraste" frente al ruido de fondo.



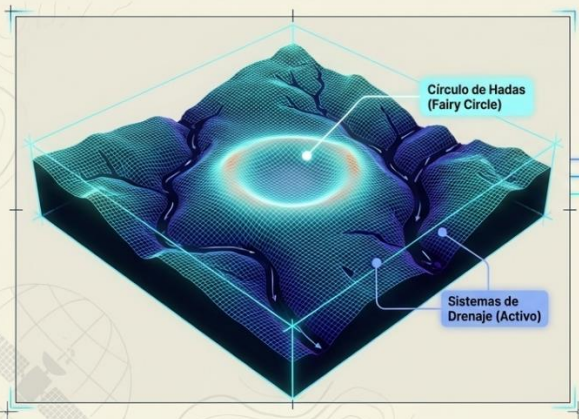
Herramientas:
Constelaciones Sentinel-2 (alta resolución, 10-13m) y Landsat.

Índices Clave:
NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo).

El Caso Colombiano:
En el Valle del Cauca-Patía, los SCDs no están totalmente calvos. Las imágenes satelitales detectan cuadrados o círculos de crecimiento reducido (estrés) dentro de densos cultivos de caña de azúcar, invisibles a simple vista.

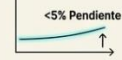
Modelos geomorfológicos y de elevación (DEM)

No cualquier depresión es un objetivo válido. El análisis topográfico de alta resolución (como LiDAR y DEM de 1/3 de arco de segundo) filtra las depresiones erosivas ordinarias basándose en su huella geomorfológica única.



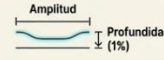
Pendiente Sutil

Los verdaderos círculos de hadas emisores de H₂ exhiben gradientes extremadamente suaves, típicamente <5%.



Relación Tamaño/Profundidad

La profundidad es mínima en proporción a la amplitud (ratio cercano al 1%).



Aislamiento Hídrico

Como se evidenció en los estudios de Nebraska, se ubican en áreas estables, físicamente desconectadas y no afectadas por los sistemas activos de drenaje de agua superficial (arroyos/rios).



Diagnóstico de círculos reales vs falsos

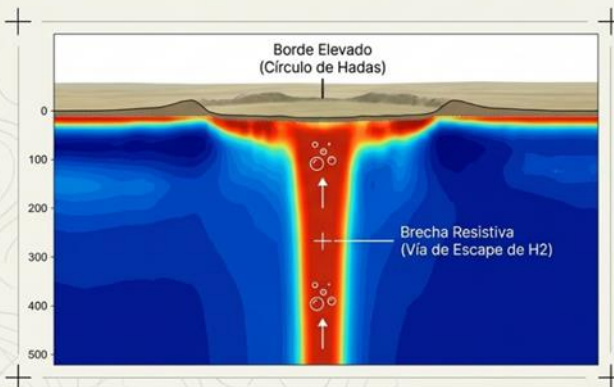
Discriminando objetivos mediante firmas geomorfológicas.

Tipo de Estructura	Perfil de Pendiente	Relación Profundidad	Firma Multiespectral	Causa Raíz
Círculos de Hadas (SCD)	Muy suave (<5%)	Superficial (~1%)	Anomalía vegetal concéntrica	Alteración por gas H ₂ / Subsistencia
Dolinas (Karst)	Pronunciada (>50%)	Profunda (agujero)	Variable, a menudo boscosa	Disolución de roca carbonatada
Lagos de Sal	Plana (0-1%)	Extremadamente superficial	Alta reflectancia, sin anillo vegetal	Acumulación evaporítica
Cráteres de Impacto	Borde elevado abrupto	Profunda / Cónica	Fracturación radial	Impacto meteórico (Aislados)

Nota Analítica: Las estructuras hechas por el hombre (estanques agrícolas) pueden imitar firmas circulares, haciendo vital la validación del perfil topográfico.

Geofísica somera

Los perfiles de resistividad de corriente continua (DC) permiten ver los primeros 500 metros bajo el círculo. El reciente análisis geofísico en Nebraska reveló una firma eléctrica inconfundible que explica el escape de gas.



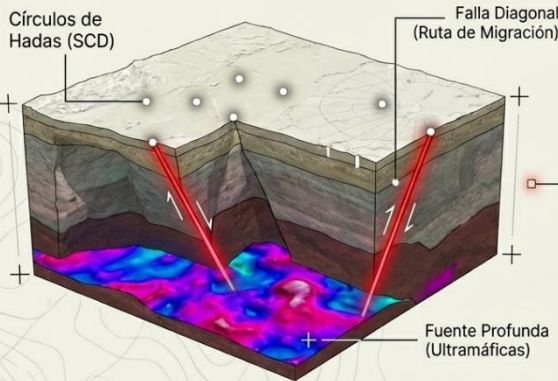
El Anillo Resistivo: Debajo del borde elevado del círculo existe una ruptura abrupta en la capa conductiva del subsuelo.

La Vía de Escape: Esta brecha de alta resistividad indica una zona de baja saturación de agua (o agua de baja salinidad) en las fracturas.

El Mecanismo: Al haber menos agua bloqueando los poros de la roca, el gas H₂ encuentra un camino de menor resistencia para filtrarse masivamente hacia la superficie, coincidiendo exactamente con el borde del círculo.

Geofísica profunda

¿Están los círculos de hadas directamente sobre los yacimientos primarios de H₂? Los datos magnéticos y radiométricos a gran escala (sensibles hasta 15-20 km de profundidad) demuestran que NO.

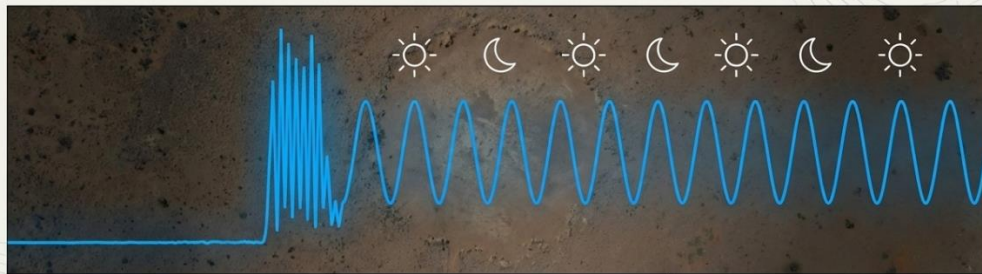


El Rol de la Geofísica Profunda:

- Falta de Correlación Directa:** No hay alineación vertical directa entre los SCDs superficiales y la roca madre profunda ricas en hierro (ultramáficas).
- Indicadores de Tránsito:** Los círculos de hadas señalan la vía de migración final, no el horno de generación.
- Implicación Estratégica:** Perforar directamente debajo de un círculo de hadas es un error táctico. La exploración profunda requiere integrar datos sísmicos para rastrear la falla inclinada desde el en la superficie hasta la verdadera fuente generadora a kilómetros de distancia.

Validación In Situ

El monitoreo en la Cuenca de São Francisco (Brasil) mediante sensores permanentes revolucionó nuestra comprensión del flujo superficial. Medir la concentración de gas una sola vez puede generar falsos negativos catastróficos.



Ciclos Diurnos (24h):

El flujo de H₂ oscila rítmicamente cada día, fuertemente dictado por variaciones de presión atmosférica y mareas terrestres.

Pulsos Esporádicos:

Periodos de flujo constante son interrumpidos por liberaciones masivas de gas que pueden saturar temporalmente los sensores.

Regla de Exploración:

Un círculo puede parecer completamente inactivo durante días y estar altamente activo mensualmente. Se requiere un monitoreo continuo (redes de sensores) para cuantificar verdaderamente el flujo volumétrico.

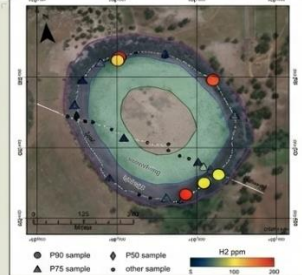
Variabilidad global

Brasil (Cuenca São Francisco)



Firma: Depresiones masivas superpuestas (hasta 400m de radio).
Datos: Emisiones de cientos de kg/día; flujo comprobado a través de monitoreo satelital a largo plazo (2+ años).
Atributo Clave: Dinámica de pulsos extremos.

Australia (Cuenca Norte de Perth)



Firma: Círculos alineados con la falla cortical de Darling.
Datos: Lecturas superficiales masivas de hasta 447 ppm de H₂.
Atributo Clave: Concentraciones máximas estrictamente confinadas al anillo verde exterior, cayendo a 0 ppm fuera del círculo.

Colombia (Valle Cauca-Patía)



Firma: Pequeñas anomalías (10-60 m²) en terrenos agrícolas.
Datos: Detectados con alta resolución Sentinel-2 (10m).
Atributo Clave: No hay calvicie total del suelo; se detecta mediante la reducción en la altura del cultivo de caña de azúcar (micro-filtraciones).

Limitaciones de la detección superficial

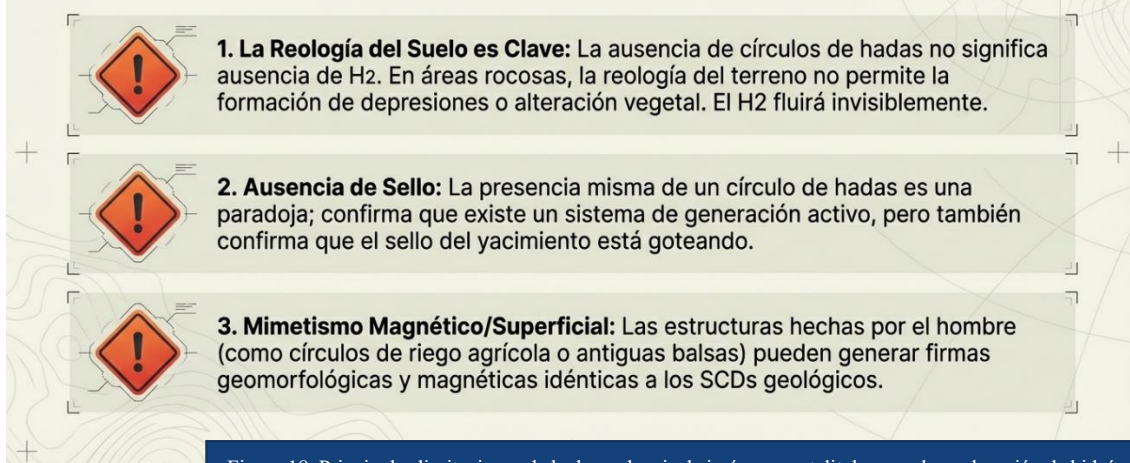


Figura 18. Principales limitaciones de la dependencia de imágenes satelitales para la exploración de hidrógeno

Depender exclusivamente de imágenes satelitales y de la detección superficial para la exploración de hidrógeno natural conlleva riesgos significativos y limitaciones críticas. Aunque las imágenes satelitales son herramientas útiles en las fases iniciales para identificar anomalías en la vegetación y "círculos de hadas", estas técnicas no son suficientes para garantizar el éxito exploratorio por sí solas.

1. Alta probabilidad de "falsos positivos" geomorfológicos: Las imágenes satelitales y el análisis multispectral (como los índices de vegetación NDVI y SAVI) permiten identificar depresiones subcirculares en la superficie, las cuales a menudo se asocian con filtraciones de hidrógeno. Sin embargo, no todas las depresiones detectadas por satélite están relacionadas con emanaciones de gas. Existen múltiples procesos geomorfológicos y biológicos que pueden crear características circulares idénticas, tales como la actividad del viento en zonas desérticas, la actividad de termitas o roedores, el colapso de techos de cuevas, sumideros kársticos, cuencos glaciares y depósitos de sal o salares.

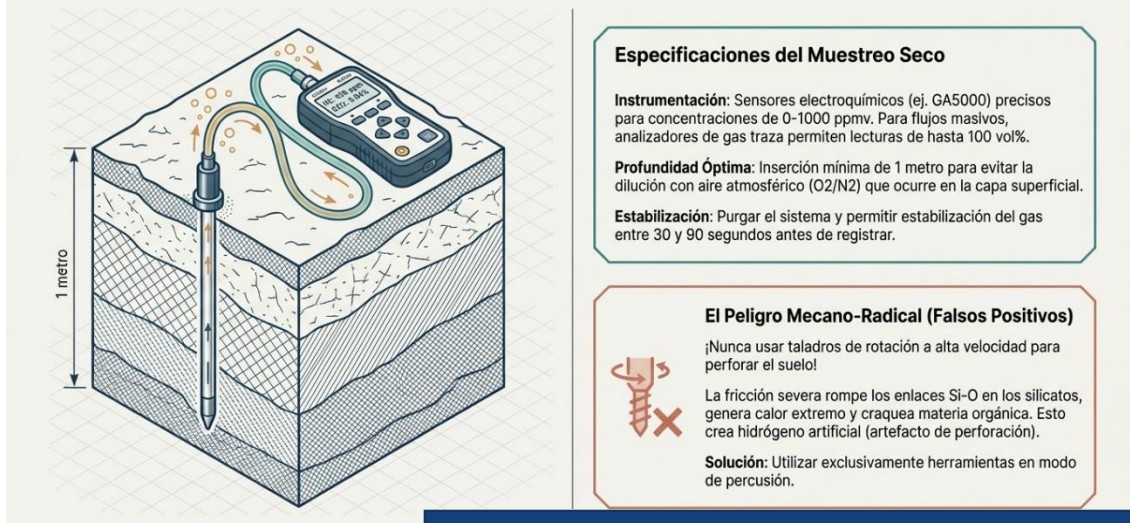
2. Riesgo de "falsos negativos" debido al consumo y bloqueo superficial: La ausencia de "círculos de hadas" o de filtraciones visibles en las imágenes satelitales no significa que no exista un yacimiento de hidrógeno en el subsuelo. El hidrógeno puede quedar atrapado o consumido antes de llegar a la superficie de manera visible. Las rocas superficiales ricas en óxidos de hierro (como las lateritas) y la intensa actividad de microorganismos en el suelo pueden consumir rápidamente el hidrógeno a medida que asciende. Además, la presencia de niveles freáticos altos (agua subterránea) impide el flujo de hidrógeno

hacia la superficie debido a la baja difusividad y solubilidad de este gas en el agua a condiciones superficiales, lo que genera resultados falsos negativos en ambientes húmedos.

3. Desconexión espacial entre la emanación superficial y el yacimiento profundo: Incluso cuando las imágenes satelitales identifican con éxito un círculo de hadas que emite hidrógeno, este rasgo superficial no es un indicador directo de la ubicación del yacimiento o de la roca madre. Debido a que el hidrógeno se moviliza a través de complejas redes de fracturas y fallas geológicas, las rocas generadoras o los reservorios suelen estar ubicados a grandes distancias laterales y verticales de la anomalía superficial. Por lo tanto, perforar un pozo directamente en el centro de un círculo de hadas basándose únicamente en imágenes satelitales es una estrategia de alto riesgo que tiene bajas probabilidades de alcanzar la acumulación principal de hidrógeno.

4. Incapacidad para cuantificar volúmenes, flujo profundo y profundidad: Las observaciones satelitales y las mediciones de gases superficiales proporcionan información sobre la presencia del gas, pero no ofrecen ninguna perspectiva sobre el flujo profundo de hidrógeno, su evolución temporal, el tamaño de la acumulación ni la profundidad del reservorio subyacente. El valor de concentración de hidrógeno en el suelo no puede utilizarse para determinar la profundidad de la fuente. Para que un sistema sea comercialmente viable, es imperativo conocer la existencia de una roca sello eficiente y de una trampa estructural que retenga volúmenes masivos, información que los satélites no pueden proveer.

Muestreo puntual del hidrógeno del suelo



Especificaciones del Muestreo Seco

Instrumentación: Sensores electroquímicos (ej. GA5000) precisos para concentraciones de 0-1000 ppmv. Para flujos masivos, analizadores de gas traza permiten lecturas de hasta 100 vol%.

Profundidad Óptima: Inserción mínima de 1 metro para evitar la dilución con aire atmosférico (O₂/N₂) que ocurre en la capa superficial.

Estabilización: Purgar el sistema y permitir estabilización del gas entre 30 y 90 segundos antes de registrar.

El Peligro Mecano-Radical (Falsos Positivos)

¡Nunca usar taladros de rotación a alta velocidad para perforar el suelo!

La fricción severa rompe los enlaces Si-O en los silicatos, genera calor extremo y craquea materia orgánica. Esto crea hidrógeno artificial (artefacto de perforación).

Solución: Utilizar exclusivamente herramientas en modo de percusión.

Figura 19. Especificaciones del muestreo puntual de hidrógeno en superficie

El proceso de muestreo puntual de hidrógeno en el suelo es una técnica de exploración geoquímica superficial diseñada para medir de forma instantánea y directa las concentraciones de este gas en los poros del terreno. A continuación, se detallan los pasos y precauciones que conforman este procedimiento:

1. Perforación del suelo: El proceso comienza perforando un agujero en el suelo, típicamente a profundidades que varían entre 10 cm y 120 cm (siendo muy comunes las profundidades de 80 a 100 cm), dependiendo siempre del nivel freático y de la dureza del terreno. Es críticamente importante utilizar un taladro portátil en modo de percusión únicamente (sin rotación de la broca). El uso de taladros rotatorios puede generar hidrógeno de forma artificial (artefactos) debido al calentamiento extremo de la broca que craquea térmicamente la materia orgánica presente en el suelo, o a través de procesos "mecanorradicales" que disocian los enlaces de los silicatos al interactuar con agua durante la fricción. Además, el diámetro de la broca debe ser lo más parecido posible al diámetro de la sonda que se va a insertar (por ejemplo, agujeros de unos 12 mm de diámetro) para minimizar el espacio vacío y evitar una entrada masiva de aire atmosférico.

2. Inserción de la sonda y sellado: Inmediatamente después de retirar la broca, se introduce una sonda en el orificio. Esta sonda suele ser un tubo hueco de acero inoxidable, cobre o PVC (comúnmente de unos 7 a 12 mm de diámetro) que tiene perforaciones en los últimos centímetros de su extremo inferior para permitir la succión del gas confinado en los poros del suelo. Para asegurar que la muestra no se diluya con el aire de la atmósfera,

la parte superior del agujero alrededor del tubo debe sellarse herméticamente; en la práctica de campo, suele utilizarse plastilina u otros sellantes en la superficie.

3. Instalación de filtros: Antes de que el gas del suelo ingrese al equipo de medición, la sonda se conecta a través de mangueras (por ejemplo, de silicona) que cuentan con filtros en línea (como filtros Pall Acro de 0.45 μ m). Estos filtros son esenciales para bloquear la entrada de polvo y prevenir que la humedad penetre y dañe las celdas electroquímicas de los detectores.

4. Medición in situ: Se conecta un analizador de gases portátil y multigas a la línea de muestreo. El instrumento utiliza una bomba interna para succionar el aire del suelo a una tasa de flujo controlada, usualmente entre 400 y 550 mL/min. La medición se realiza en ciclos cortos, habitualmente de 1 a 2 minutos. La dinámica del muestreo puntual muestra que la concentración de hidrógeno se comporta como una curva de campana: aumenta rápidamente hasta alcanzar un pico máximo (usualmente entre los 30 y 40 segundos del bombeo) y luego decrece gradualmente hacia cero a medida que el bolsillo de gas local se agota y es reemplazado por aire que se infiltra en el sistema. El valor pico detectado antes del declive es el que se toma como representativo de la concentración de hidrógeno en ese punto.

5. Recolección de muestras para laboratorio: En los casos donde se requiere confirmar la composición exacta o realizar estudios isotópicos, se toman muestras físicas del gas para analizarlas posteriormente mediante cromatografía de gases (GC).

Monitoreo continuo y variabilidad temporal

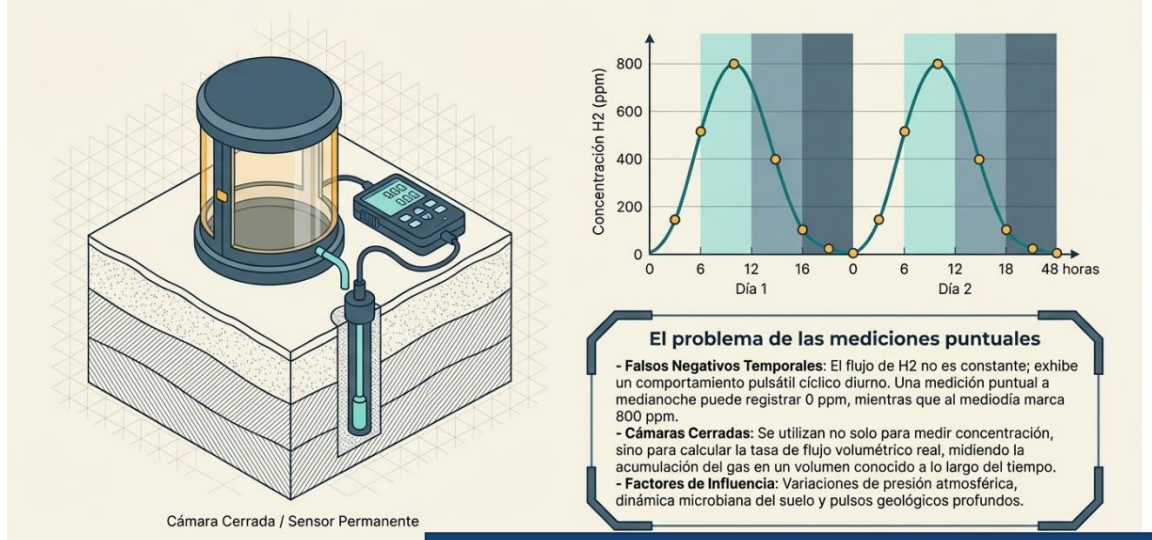


Figura 20. Especificaciones del monitoreo continuo de hidrógeno en superficie

El proceso de monitoreo continuo de hidrógeno (H₂) en superficie requiere la instalación de redes de analizadores de gas automatizados y permanentes, diseñados específicamente para registrar las emisiones a lo largo de amplios períodos de tiempo. Debido a que la cantidad de hidrógeno presente en los suelos no es constante ni en el tiempo ni en el espacio geográfico, las mediciones puntuales de unos pocos minutos no se consideran representativas ni cuantitativas, haciendo del monitoreo continuo una herramienta esencial para la exploración. El proceso de instalación y operación incluye los siguientes pasos:

1. Perforación e instalación de sondas: Se perforan agujeros a poca profundidad, generalmente de hasta 1 metro de profundidad en el suelo, donde se insertan tubos o sondas especiales.

2. Instrumentación automatizada: Se emplean sensores electroquímicos de hidrógeno (como los equipos comerciales PARHyS o prototipos como MONHyTOR) que están calibrados en laboratorio utilizando gases estándar. Estos equipos están diseñados para resistir la intemperie, variaciones extremas de temperatura y operar en ubicaciones remotas utilizando baterías de alto rendimiento.

3. Frecuencia de medición y transmisión: Los sensores realizan lecturas simultáneas e independientes en el suelo de manera continua, con tasas de muestreo que pueden variar desde una vez por hora hasta mediciones en pocos segundos. En muchos sistemas, una pequeña bomba extrae gas durante ciclos cortos (ej. 2 minutos) para analizarlo

Sin embargo, existen herramientas modernas que operan sin bombas de succión para evitar la inducción de gradientes de presión artificiales y flujos de aire no naturales en el suelo.

4. Recolección de datos: Los parámetros registrados, como la concentración de H₂ (en partes por millón o ppm), la temperatura y la humedad del suelo, se envían en tiempo real a una base de datos central a través de conexiones satelitales o redes de transmisión.

El monitoreo a largo plazo (de meses a años) ha demostrado de forma inequívoca que la filtración de hidrógeno es un proceso dinámico y altamente irregular. Esta variabilidad se manifiesta mediante varios ciclos y eventos:

El comportamiento más común observado en las zonas de emisión es una oscilación periódica diaria. Las emisiones de hidrógeno tienden a alcanzar su pico máximo durante el mediodía o en las horas más calurosas del día (con intensidades de algunos cientos de ppm), y descienden a niveles de línea base cercanos a cero durante la noche.

De forma adicional a los ciclos diarios, los sensores registran la llegada repentina de pulsos erráticos e irregulares de altas concentraciones de H₂ (con frecuencia superando los miles de ppm y saturando el límite de los instrumentos). Estos pulsos no responden a ninguna periodicidad, ya pueden ocurrir durante la noche. Se interpreta que corresponden a la llegada directa de un flujo profundo, reflejando el escape y recarga de hidrógeno proveniente de reservorios o acuíferos subsuperficiales hacia las porosidades del terreno.

Falsos negativos en entornos saturados

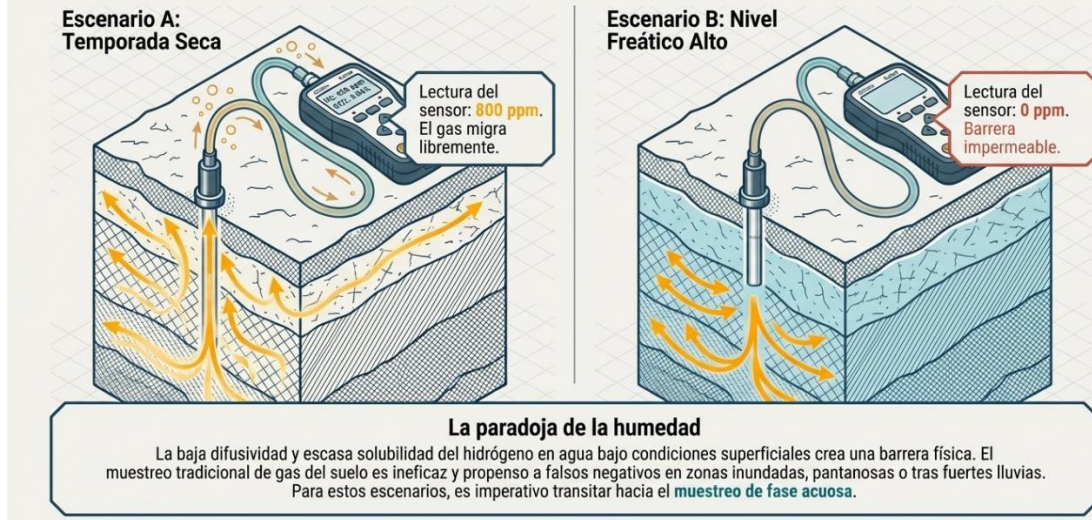


Figura 21. Influencia de la humedad en la medición de hidrógeno en superficie

El proceso de medición de hidrógeno natural en entornos saturados de agua requiere metodologías e instrumentos especializados. Los falsos negativos en la detección de gas en el suelo son un problema recurrente en ambientes húmedos debido a las barreras físicas y químicas que el agua impone al hidrógeno. Para superar los obstáculos que impiden al gas llegar a la superficie, se ha desarrollado el análisis de gas en el espacio de cabeza (Headspace) in situ.

Este método innovador fue diseñado específicamente para de-riscar (reducir el riesgo en) la exploración en entornos húmedos, y consiste en capturar y medir in situ los vapores desgasificados a partir de agua subterránea que es agitada mecánicamente. El proceso se ejecuta de la siguiente manera:

- Se perforan pozos de sondeo poco profundos (de aproximadamente 1 metro de profundidad) dedicados a este propósito.

- El agua subterránea se evacúa desde el pozo utilizando una bomba de transferencia con impulsor de paletas rotativas. Previo al proceso, el equipo de bombeo debe someterse a pruebas rigurosas utilizando salmueras para garantizar que la fricción de sus componentes (como los impulsores de goma) no genere hidrógeno de manera antropogénica (artificial), lo que arruinaría la integridad de la prueba.
- El agua extraída se bombea hacia el lateral de una cámara receptora o recipiente de 1.25 litros (conocido como possum belly) y se deja caer hacia su base. Esta caída provoca la agitación física del agua subterránea
- Al ser agitada, el agua libera hacia el espacio vacío del recipiente (espacio de cabeza) el hidrógeno y otros gases que estaban disueltos o atrapados en la fase líquida.
- Mediante un tubo acoplado en la parte superior del recipiente, se extraen dichos vapores desgasificados y se dirigen hacia un medidor multigas portátil para su medición directa.



Figura 22. Proceso de muestreo headspace en zonas húmedas

Errores comunes y mejores prácticas





Errores / Contaminación	Mejores Prácticas
<p>✗ Uso de brocas rotativas a alta velocidad. Genera calor masivo y fractura silicatos, creando H₂ artificial (efecto mecano-radical).</p> 	<p>✓ Uso exclusivo de herramientas manuales o taladros en modo de percusión de baja velocidad.</p> 
<p>✗ Tomar lecturas del sensor inmediatamente tras perforar el agujero.</p> 	<p>✓ Inserción ajustada de la sonda, purga del sistema y espera de estabilización del gas (30-90 segundos).</p> 
<p>✗ Uso de viales plásticos con septos de baja calidad o jeringas expuestas al aire.</p>	<p>✓ Uso estricto de cilindros de acero inoxidable al vacío (tipo Swagelok) con válvulas dobles.</p>
<p>✗ Medición directa en suelo inundado o pantanoso asumiendo que el sensor leerá el gas a través del agua.</p>	<p>✓ Uso del método de espacio de cabeza (Headspace) con agitación vigorosa del fluido extraído.</p>

Figura 23. Principales errores en la medición superficial de hidrógeno y mejores prácticas

La exploración de hidrógeno natural (H₂) mediante el análisis de gases en el suelo es una disciplina incipiente, y aplicar metodologías tradicionales de la industria del gas y petróleo puede llevar a fallos significativos. Los errores más comunes incluyen:

- **Generación de hidrógeno artificial por la técnica de perforación (Metamorfismo de la broca):** Uno de los errores más graves es el uso de taladros rotatorios. La fricción y el calentamiento de la broca de perforación pueden provocar el craqueo térmico de la materia orgánica del suelo, o desencadenar procesos "mecanorradicales" (disociación de silicatos en rocas saturadas de agua) que generan hidrógeno de forma artificial. Esto arroja falsos positivos (a menudo superiores a 1000 ppm) que no representan el flujo natural del subsuelo.
- **Dependencia excesiva de mediciones puntuales (Spot sampling):** Asumir que una lectura instantánea representa el comportamiento real del yacimiento es un error crítico. El flujo de hidrógeno en el suelo es altamente variable, presentando ciclos diurnos (un "respiro" del suelo guiado por temperatura, presión atmosférica o evaporación) y pulsos esporádicos de alta intensidad. Tomar una medición en un solo momento puede resultar en un falso negativo si se mide durante una fase de inactividad, o sobreestimar el recurso si se captura un pulso aislado.
- **Contaminación atmosférica y dilución de la muestra:** Al utilizar analizadores portátiles que succionan el gas con bombas (ej. a 500 mL/min) un sellado deficiente entre el tubo de muestreo y la pared del pozo provocará la intrusión de aire atmosférico. Esto diluye drásticamente el gas del suelo muestreado, mostrando concentraciones de hidrógeno muy por debajo de las reales.
- **Muestreo demasiado superficial y consumo biológico:** Los suelos oxigenados y la actividad de microorganismos actúan como un sumidero extremadamente eficiente para el H₂. Las bacterias que contienen enzimas hidrogenasas pueden consumir hasta el 80% del hidrógeno que asciende antes de que llegue a la atmósfera. Realizar lecturas demasiado superficiales suele resultar en concentraciones nulas debido a este consumo microbiano.
- **Ignorar la humedad del suelo y el nivel freático:** El hidrógeno tiene muy baja solubilidad en agua a presiones superficiales y le cuesta difundirse a través de medios saturados. Las fuertes lluvias o un nivel freático alto pueden bloquear el gas, atrapándolo temporalmente y provocando que los analizadores de gases de suelo no detecten nada por encima del agua.
- **Equipos no calibrados para H₂ o problemas de almacenamiento:** Históricamente, en los análisis de cromatografía de gases se ha usado el H₂ como gas portador, lo que imposibilitaba su detección. Además, almacenar el gas en tubos metálicos estándar de acero durante días o semanas permite que el hidrógeno, por su pequeño tamaño, se fugue, o que el propio cilindro genere H₂ por corrosión, alterando sus valores e isótopos originales.

Gases disueltos y manantiales hidrotermales



Figura 24. Descripción para la medición de hidrogeno gases disueltos y manantiales hidrotermales

El análisis de fluidos profundos es vital para estudiar gases disueltos como el hidrógeno y el metano, pero recolectarlos sin perder sus componentes volátiles ni contaminarlos con aire atmosférico es un gran desafío. Para lograrlo y obtener muestras representativas, se emplean técnicas especializadas que permiten separar los gases del agua y extraer el agua de poro directamente de los sedimentos de manera segura.

Extracción por burbujeo (Bubble stripping)

Este método se emplea fundamentalmente para capturar y medir gases disueltos, como el hidrógeno, metano y dióxido de carbono, en aguas profundas y manantiales hidrotermales. El proceso se desarrolla de la siguiente manera:

- **Bombeo y conducción:** Las aguas de origen se bombean desde la profundidad (por ejemplo, usando una bomba peristáltica portátil de 12 V) a través de tuberías aisladas e impermeables a los gases, dirigiendo el flujo hacia una botella de vidrio diseñada para la extracción.
- **Creación de la burbuja:** Se introduce un pequeño volumen de aire atmosférico dentro de la botella llena de agua para formar una burbuja. Esto permite que los gases disueltos en el fluido hidrotermal alcancen el equilibrio termodinámico con la burbuja de aire introducida.
- **Recolección:** Se mide la temperatura de la burbuja y luego el gas es extraído utilizando una jeringa hermética. Finalmente, se transfiere a

viales de vidrio impermeables sellados con un septo y cargados previamente con nitrógeno, quedando listos para su análisis en el laboratorio mediante cromatografía de gases.

Muestreadores de poros (Rhizon samplers)

Este tipo de muestreadores se utiliza para extraer el agua intersticial (agua de poro) atrapada dentro de los núcleos de sedimentos, tales como los lodos recuperados del fondo marino en zonas de subducción y volcanes de lodo de serpentinita. El procedimiento consiste en:

- **Preparación e inserción:** Los muestreadores Rhizon están compuestos por un polímero poroso (típicamente de 5 cm de longitud y con poros de 0.15 µm) que se empapa en agua destilada antes de su uso. Para acceder al sedimento, se perforan pequeños orificios en la cubierta del núcleo extraído y se insertan los Rhizons directamente en el lodo.
- **Extracción por vacío:** Los muestreadores se conectan a jeringas que generan un vacío, el cual succiona y filtra el agua de los poros separándola de la matriz de sedimento sólido.
- **Almacenamiento:** Una vez extraídas, las muestras de agua se almacenan en viales herméticos (como tubos Eppendorf de 2 mL) a baja temperatura (aproximadamente 4 °C) hasta que se realizan los análisis geoquímicos posteriores, como la determinación de aniones y sulfatos mediante cromatografía iónica.

Análisis in situ de roca generadora

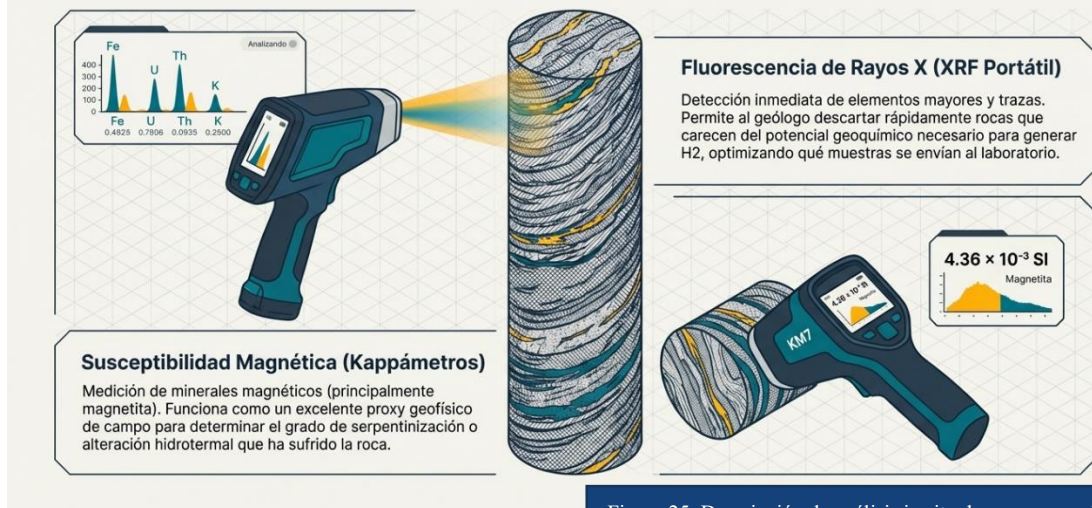


Figura 25. Descripción de análisis in situ de roca generadora

El proceso de análisis in situ de rocas generadoras (típicamente evaluadas para la exploración de hidrógeno natural) se fundamenta en metodologías prácticas que permiten obtener datos inmediatos durante el trabajo de campo. Para lograr esto, los geólogos emplean equipos portátiles que realizan evaluaciones rápidas, confiables y no destructivas directamente sobre los afloramientos, destacándose la fluorescencia de rayos X y la medición de la susceptibilidad magnética. A continuación, se detalla cómo se lleva a cabo el proceso con cada una de estas herramientas:

1. Análisis mediante Fluorescencia de Rayos X (XRF) Portátil

Esta técnica tiene como objetivo principal proporcionar acceso inmediato a las concentraciones de los elementos mayores que componen la roca matriz.

Se utiliza un instrumento XRF portátil (como una pistola de escaneo) que se coloca directamente sobre la superficie de la roca. El equipo emite rayos X que excitan los átomos de la muestra, generando una emisión secundaria (fluorescencia) que el detector lee para identificar y semicuantificar los elementos presentes.

Es un método sumamente rápido, confiable y no destructivo. Permite a los exploradores identificar in situ si la roca contiene cantidades significativas de elementos de interés (como el hierro, vital para las reacciones redox que generan hidrógeno) antes de decidir qué muestras recolectar para el laboratorio.

2. Análisis de Susceptibilidad Magnética

Funciona como un indicador de campo rápido para determinar el estado de alteración o el grado de serpentinización de la roca generadora. La susceptibilidad magnética de una roca está controlada por el tipo y la cantidad de minerales magnéticos presentes en su paragénesis. En el contexto de rocas generadoras de hidrógeno, el principal portador de esta señal magnética es la magnetita, debido a su fuerte comportamiento ferromagnético.

Las mediciones de campo son bastante simples y se realizan utilizando Kappámetros portátiles (como el modelo KM7). Para ejecutar el análisis, el operario solo requiere de una pequeña interfaz plana en la superficie de la roca donde apoyar el sensor del equipo. Sin embargo, existe una condición crítica para garantizar la precisión de los datos: las mediciones deben realizarse obligatoriamente sobre afloramientos frescos. Esto es imperativo para evitar que el impacto de la meteorización (weathering) enmascare o altere las verdaderas propiedades magnéticas de la roca original.

Además de medir la susceptibilidad con un Kappámetro, el análisis in situ se puede complementar midiendo el campo magnético local utilizando un magnetómetro de precesión de protones (como el modelo G-857 Memory-Mag). Esta medición en la superficie ayuda a registrar la interacción entre el campo magnético externo de la Tierra y el comportamiento magnético de los minerales subyacentes.

Caracterización de gases en laboratorio

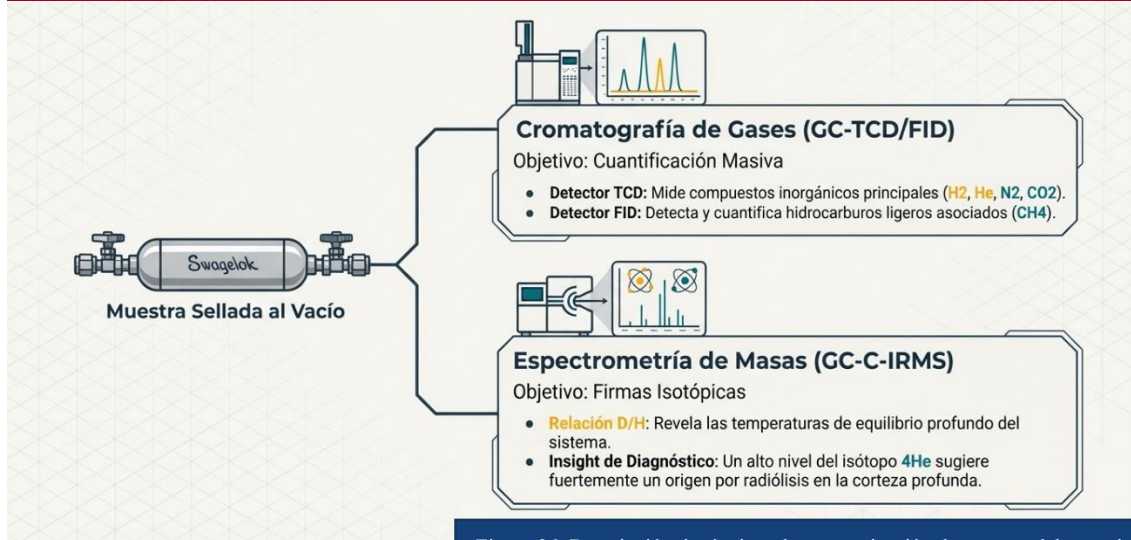


Figura 26. Descripción de técnicas de caracterización de gases en laboratorio

El proceso de caracterización de gases en el laboratorio requiere la combinación de tecnologías avanzadas para separar, identificar y cuantificar tanto la composición molecular como las firmas isotópicas de las muestras gaseosas. Este análisis se fundamenta en la integración de la Cromatografía de Gases (GC) y distintas configuraciones de Espectrometría de Masas (MS).

Análisis de Composición Molecular mediante Cromatografía de Gases (GC): Para determinar las proporciones moleculares relativas de una mezcla de gases, el método estándar consiste en inyectar los volúmenes de gas en cromatógrafos de alta resolución (tales como los modelos Varian 3800 o equipos Agilent) que operan con múltiples columnas de separación en serie. La cuantificación depende del tipo de gas y de los detectores acoplados al cromatógrafo:

- **Detector de Conductividad Térmica (TCD):** Se utiliza principalmente para compuestos inorgánicos. La cuantificación del hidrógeno (H_2) y helio (He) se realiza en un TCD utilizando nitrógeno (N_2) o argón (Ar) como gas portador. Por otro lado, la medición de dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), metano (CH_4) y alcanos superiores (etano, propano, butano) se efectúa en un TCD separado utilizando helio (He) como gas portador. Es importante tener en cuenta que las respuestas de un TCD suelen ser no lineales.
- **Detector de Ionización de Llama (FID):** A diferencia del TCD, el FID presenta una respuesta lineal exacta frente a los hidrocarburos y proporciona un mayor grado de sensibilidad. Por esto, se destina

exclusivamente a la cuantificación de bajos niveles de hidrocarburos ligeros (C_1 a C_5).

Caracterización Isotópica mediante GC-C-IRMS: Cuando se requiere conocer la procedencia u origen de los gases, el cromatógrafo de gases se acopla a un Espectrómetro de Masas de Relación Isotópica mediante una interfaz de combustión o pirólisis (técnica GC-C-IRMS). Esto permite medir isótopos estables fundamentales como el carbono ($\delta^{13}C$) y el hidrógeno (δD).

- **Isótopos de Carbono ($\delta^{13}C$):** Compuestos como el CH_4 se separan cromatográficamente (por ejemplo, mediante una columna Porabond Q a $40^\circ C$) y se envían a un horno de combustión operando a temperaturas de $1000^\circ C$. Allí, el metano se oxida y se transforma completamente en CO_2 , gas que posteriormente se transfiere al espectrómetro de masas para la medición isotópica y se calibra frente al estándar internacional Pee-Dee Belemnite (PDB).
- **Isótopos de Hidrógeno (δD):** Para el hidrógeno libre o el proveniente de hidrocarburos, el gas eluido atraviesa un horno de reducción/pirólisis a muy alta temperatura (ej. $1420^\circ C$). El hidrógeno resultante se transfiere al espectrómetro para su cuantificación en relación con el estándar internacional SMOW (Standard Mean Ocean Water). Ocasionalmente, el equipo de espectrometría precisa acoplar un filtro de energía destinado a eliminar la ionización de moléculas acarreadoras (como el $^4He^+$), las cuales pueden provocar interferencia isobárica en la detección del deuterio y el hidrógeno.

Petrografía y capacidad de generación

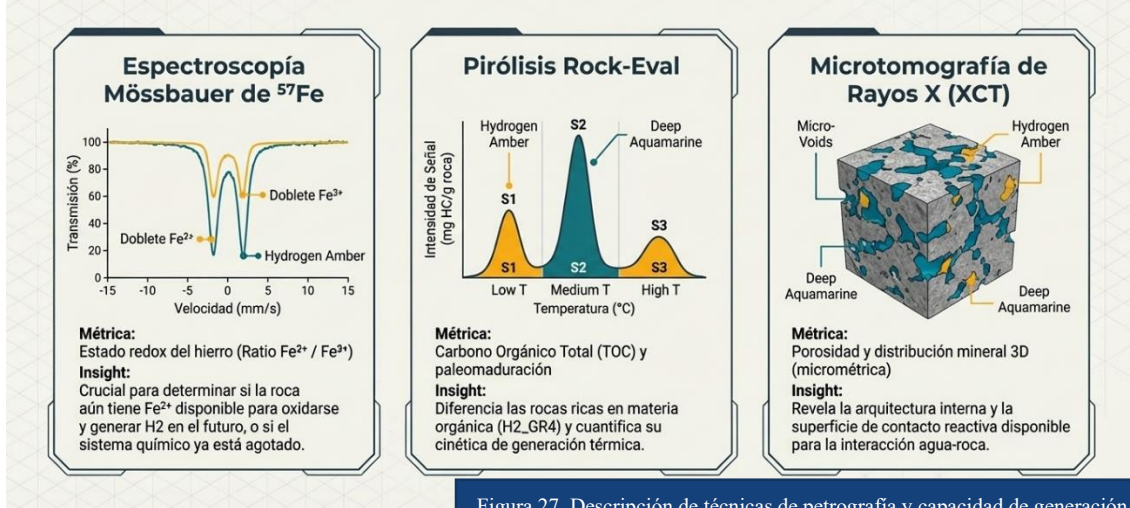


Figura 27. Descripción de técnicas de petrografía y capacidad de generación

El proceso de evaluación petrográfica y la determinación de la capacidad generadora remanente son etapas fundamentales en la exploración de hidrógeno natural. Estos procedimientos permiten caracterizar las rocas generadoras de hidrógeno (H_2GR) mediante herramientas analíticas que extraen información sobre los mecanismos de generación en la profundidad, así como los parámetros fisicoquímicos del sistema. La evaluación se divide principalmente en herramientas de cuantificación volumétrica y herramientas de observación detallada a diferentes escalas. A continuación, se detalla el proceso y las técnicas empleadas:

1. Análisis Cuantitativo y Determinación de la Capacidad Generadora Remanente: Para evaluar si una roca tiene el potencial de generar hidrógeno mediante interacciones agua-roca, primero se debe cuantificar su composición química y mineralógica.

- **Química de roca total:** Se emplean técnicas como la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) y la Fluorescencia de Rayos X (XRF) para **determinar** las concentraciones totales de elementos clave como el hierro (Fe), uranio (U), torio (Th) y potasio (K). Si una roca carece de cantidades significativas de estos elementos, se descarta como una roca generadora de hidrógeno.
- **Especiación del hierro y capacidad remanente:** Las técnicas como el ICP y XRF no revelan el estado redox de los elementos, lo cual es crítico. Para determinar la capacidad generadora remanente (es decir, si la roca todavía es capaz de producir hidrógeno en la

actualidad), se debe utilizar la espectroscopía Mössbauer de ^{57}Fe . Esta técnica permite evaluar la especiación del hierro en la roca total. Las rocas ricas en Fe^{2+} se consideran de alto potencial generador de hidrógeno, ya que el Fe^{2+} aún puede oxidarse al interactuar con el agua. Por el contrario, las rocas dominadas por Fe^{3+} indican que, aunque pudieron haber producido hidrógeno en el pasado, su capacidad generadora se ha agotado y no deben considerarse como fuentes viables para la producción futura.

- **Mineralogía cuantitativa:** Se utiliza la Difracción de Rayos X (XRD) combinada con algoritmos de cuantificación, como el método Rietveld, para evaluar qué fases minerales específicas (por ejemplo, clorita, biotita, serpentina) contienen los elementos de interés y en qué proporción se encuentran dentro del ensamblaje mineral.

2. Observación a Micro y Nanoescala: Comprender la dinámica de la generación de hidrógeno requiere complementar la química cuantitativa con la observación directa de las muestras para identificar la estabilidad y reactividad de los minerales.

- **Microscopía óptica:** Permite analizar las muestras a una resolución de micrones. Es esencial para identificar características como anillos de alteración que rodean los minerales de Fe^{2+} en proceso de alteración, inclusiones fluidas que contienen hidrógeno, y halos de desintegración radiactiva dentro de minerales como la biotita.

- **Microscopía electrónica (SEM y TEM):** La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y la Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) alcanzan resoluciones nanométricas. Al combinarse con técnicas analíticas in situ como la Microsonda Electrónica (EPMA), permiten conocer con precisión la química puntual de los minerales de interés, facilitando la identificación de las reacciones específicas que sostienen la generación de hidrógeno.
 - Una vez que se conoce el ensamblaje mineral, la XCT es indispensable para extrapolar las observaciones micrométricas a una escala mayor y estimar el verdadero potencial generador de hidrógeno normalizado a su volumen, tomando en cuenta las heterogeneidades mineralógicas reales de la formación geológica.
- 3. Representatividad de los Datos y Extrapolación Volumétrica (3D):** Uno de los mayores desafíos en la evaluación petrográfica es que las técnicas de imagen tradicionales proporcionan información en 2D (como las secciones delgadas), la cual puede no ser representativa del volumen real de la roca.
- **Microtomografía de Rayos X (XCT):** Para superar esta limitación, se utiliza la XCT en tapones de núcleos de roca (de cm^3 a m^3). Esta técnica permite obtener imágenes y cuantificar la distribución tridimensional de los minerales.
- 4. Evaluación de Rocas Ricas en Materia Orgánica:** Si el origen del hidrógeno natural sospechado proviene de la maduración tardía de la materia orgánica (clasificadas como $\text{H}_2\text{-GR4}$), el proceso petrográfico se complementa con un análisis de pirólisis Rock-Eval. Este equipo evalúa el Carbono Orgánico Total (TOC) y el grado de paleomaduración de la roca, diferenciando las rocas sobremaduradas que pueden generar hidrógeno. Para confirmar estas mediciones, se cruzan los datos con marcadores de paleotemperatura, como la reflectancia de la vitrinita o datos de espectroscopía Raman.

El rol de los gases nobles en la exploración

Los gases nobles (como el helio, neón, argón, criptón y radón) desempeñan un rol crítico como trazadores conservativos en la exploración de hidrógeno natural. Dado que son químicamente inertes y no participan en reacciones biológicas o geoquímicas en el subsuelo, conservan su firma física e isotópica, lo que permite a los geólogos comprender la dinámica del hidrógeno geológico. Sus principales funciones en la exploración se dividen en las siguientes áreas:

Identificación del origen y las fuentes del hidrógeno

El análisis isotópico de los gases nobles permite determinar cuantitativamente de qué capa geológica provienen los fluidos. Al medir las proporciones de distintos isótopos, los científicos pueden distinguir tres fuentes principales:

Origen cortical (Corteza terrestre): Una alta presencia de isótopos radiogénicos como el helio-4 (^4He) y el argón-40 (^{40}Ar) indica que los fluidos provienen de la corteza continental. Estos isótopos se producen por la desintegración natural de elementos radiactivos (uranio, torio y potasio) en las rocas.

Origen del manto (Profundo): La presencia de helio-3 (^3He), un isótopo primordial atrapado desde la formación de la Tierra, evidencia que parte de los fluidos provienen directamente del manto terrestre.

Origen atmosférico o de acuíferos superficiales: Isótopos fósiles como el neón-20 (^{20}Ne), argón-36 (^{36}Ar) y criptón-84 (^{84}Kr) provienen de la atmósfera o de aguas subterráneas equilibradas con el aire (ASW, por sus siglas en inglés).

Confirmación de la generación por radiólisis

Existe una fuerte asociación genética entre el helio y el hidrógeno generado por radiólisis. La radiólisis es el proceso mediante el cual la radiación ionizante (emitida por el decaimiento del uranio y el torio) rompe las moléculas de agua en el subsuelo, produciendo hidrógeno. Dado que este mismo decaimiento radiactivo produce helio como subproducto (partículas alfa), altos niveles de helio

cortical en una muestra de gas se consideran un marcador directo de que el hidrógeno fue generado por radiólisis.

Descarte de "falsos positivos" y validación de flujos profundos

Al medir gases en la superficie del suelo, existe el riesgo de interpretar erróneamente el origen del hidrógeno, ya que este puede ser producido artificialmente por bacterias superficiales o ser un artefacto de la perforación (metamorfismo de la broca). Sin embargo, como el helio solo proviene de formaciones geológicas profundas, la presencia simultánea de anomalías de helio junto con el hidrógeno en el suelo confirma inequívocamente la existencia de un flujo real desde el subsuelo.

Mapeo de fallas y vías de migración

El helio y el hidrógeno comparten propiedades físicas muy similares, como una alta movilidad y difusividad, por lo que muestran un comportamiento y distribución estrechamente relacionados en su ascenso a la superficie. La medición de concentraciones anómalas de gases nobles (especialmente helio y radón- ^{222}Rn) en el suelo se utiliza con gran éxito para delinear estructuras de fallas profundas y fracturas que actúan como canales de migración preferenciales para el hidrógeno.

Consumo en el subsuelo

Si el hidrógeno entra en contacto con bacterias o minerales reactivos, se consumirá rápidamente, mientras que el helio o el nitrógeno continuarán acumulándose inalterados. Si en un acuífero se observa una alta proporción de He y N_2 pero poco H_2 , puede indicar que el hidrógeno se generó, pero no logró preservarse.

¿Cómo llega el hidrógeno a la superficie?

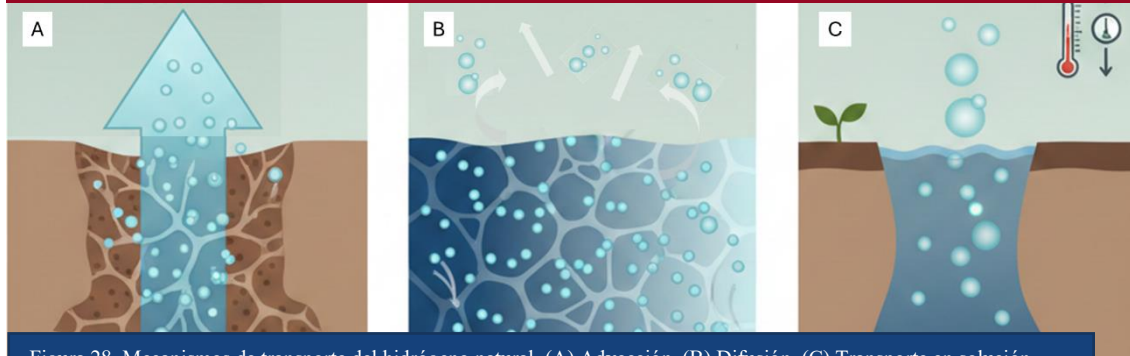


Figura 28. Mecanismos de transporte del hidrógeno natural. (A) Advección, (B) Difusión, (C) Transporte en solución

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.

Exploración de hidrógeno en el mundo



Figura 29. Principales países que han iniciado la exploración de hidrógeno natural en el mundo.

Mali

Mali es el país pionero y actualmente el único en el mundo con producción activa de hidrógeno natural para uso energético. El descubrimiento inicial ocurrió por accidente en 1987 durante la perforación del pozo de agua Bougou-1, el cual contenía un gas compuesto en un 98% por hidrógeno. Entre 2017 y 2018, la empresa Hydroma (anteriormente Petroma) perforó 24 pozos adicionales y actualmente utiliza este hidrógeno natural para generar electricidad para una aldea local, demostrando que su producción es significativamente más económica que la fabricación de hidrógeno a partir de combustibles fósiles o electrólisis industrial.

Australia

Australia presenta una de las actividades de exploración más intensas del mundo debido a una geología muy favorable que incluye cratones antiguos y formaciones ricas en hierro. Tras las evaluaciones realizadas por Geoscience Australia, el gobierno de Australia Meridional ha comenzado a emitir permisos comerciales de exploración, otorgando licencias a empresas como Golden Hydrogen. Se están reevaluando áreas como la

Península de Yorke y la Isla Canguro, donde pozos históricos ya habían reportado concentraciones de hidrógeno de hasta el 84%. Además, existen campañas activas en las cuencas de Amadeus y Perth.

Estados Unidos

En Estados Unidos, la exploración comercial está en marcha y ya cuenta con pozos dedicados. El interés moderno surge a partir de pozos petroleros perforados en la década de 1980 en Kansas, los cuales revelaron proporciones inusuales de hidrógeno libre (promedios de 29% a 37%). A finales de 2019, la compañía Natural Hydrogen Energy LLC perforó el primer pozo dedicado exclusivamente a la búsqueda de hidrógeno natural en Kansas, alcanzando el basamento precámbrico y encontrando concentraciones de hasta el 91%. También se investigan fugas superficiales masivas en las "Bahías de Carolina".

Brasil

En Brasil, el enfoque se ha centrado en el monitoreo continuo de las filtraciones superficiales, particularmente en la Cuenca de São Francisco (estado de Minas Gerais). Mediante

Exploración de hidrógeno en el mundo

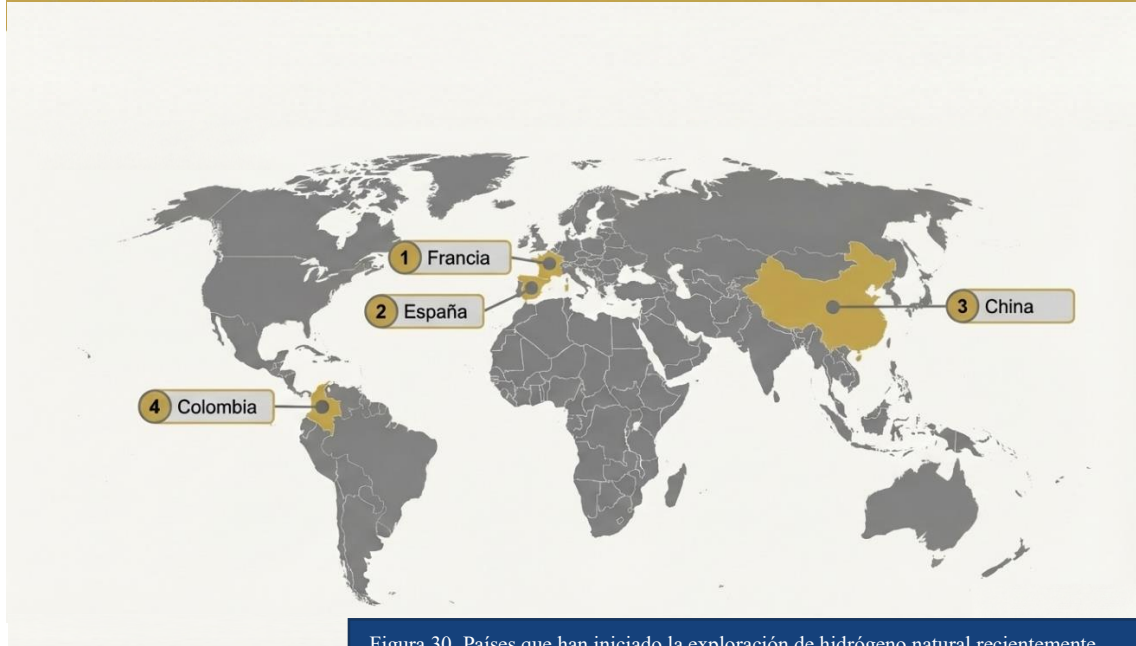


Figura 30. Países que han iniciado la exploración de hidrógeno natural recientemente.

sensores permanentes instalados en depresiones circulares sin vegetación (conocidas como "círculos de hadas"), se ha descubierto que el hidrógeno natural se libera hacia la superficie mediante pulsos intermitentes, estimándose volúmenes muy altos que podrían superar las 140 toneladas diarias emitidas a la atmósfera en la región, lo cual justifica el inicio de exploraciones en el subsuelo.

Francia

Empresas como 45-8 Energy han localizado anomalías de gas con un claro flujo de hidrógeno activo en el Graben de Bresse y el piedemonte de los Pirineos. Se han solicitado licencias formales de exploración para investigar estas reservas ligadas a procesos de serpentinización.

España

La empresa Helios Aragon ha asegurado una licencia que abarca 89,000 hectáreas en el norte de España, donde estudian un pozo histórico que detectó cantidades significativas de hidrógeno a 3,680 metros de profundidad, buscando abrir la puerta al primer centro de hidrógeno natural del país.

China

Aunque aún no se ha realizado una exploración comercial sustancial, sí se han hecho descubrimientos geológicos preliminares. Se han detectado fugas de hidrógeno de origen profundo y radiolítico durante campañas en las cuencas de Shangdu y Qaidam, así como en áreas geotérmicas y fallas sísmicamente activas, estableciendo la viabilidad geológica para futuros proyectos.

Colombia

Colombia está construyendo activamente un marco regulatorio tras la aprobación de un plan de desarrollo que clasifica el hidrógeno natural ("hidrógeno blanco") como fuente de energía renovable no convencional, ofreciendo beneficios fiscales. Se han iniciado investigaciones sobre el terreno mediante mediciones de gases en el suelo en el Valle del Cauca-Patía, identificándose emisiones superficiales de hidrógeno directamente asociadas a la alteración de rocas ofiolíticas y zonas de fallas.

Exploración de hidrógeno 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 (FNCR) 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 hidrógeno 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 31. Pozo Slim Hole para exploración de hidrógeno financiado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos y 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] 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 H₂ field in Mali,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 640–647, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.131.
- [3] A. Prinzhofer, C. Rigollet, N. Lefevre, 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.
- [4] 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.
- [5] M. Sequeira *et al.*, “Natural Hydrogen in Uruguay: Catalog of H₂-Generating Rocks, Prospective Exploration Areas, and Potential Systems,” *Geosciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.3390/geosciences15020054.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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 H₂ 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 H₂ 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 H₂ -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] F. V. Donzé, L. Truche, P. S. Namin, N. Lefevre, and E. F. Bazarkina, “Migration of natural hydrogen from deep-seated sources in the São Francisco basin, Brazil,” *Geosciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 9, pp. 1–16, Sep. 2020, doi: 10.3390/geosciences10090346.

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] C. Patino, D. Piedrahita, E. Colorado, K. Aristizabal, and I. Moretti, “Natural H₂ 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 H₂.
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 serpentinización 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 H₂?
15. La serpentinización 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 H₂ 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 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.

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.

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.