

"Hidrógeno Natural: Reacciones químicas, rasgos físicos de las formaciones y su potencial en
Colombia."

Jenifer Garces Ardila

Monografía para optar el título de Especialista en Ingeniería del gas

Director

Manuel Enrique Cabarcas Simancas
Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Especialización en ingeniería del gas
Bucaramanga

2024

Agradecimientos

A la universidad industrial de Santander, en su escuela de ingenieros, por darme la oportunidad de enriquecer los conocimientos en esta área.

A mi familia por hacer posible este proyecto que me permite el crecimiento profesional y personal.

A Dios por darme la valentía y sabiduría para afrontar nuevos retos con gallardía.

A mi director de proyecto por la orientación y por compartir su conocimiento que permite la formación de los nuevos ingenieros al servicio de la sociedad.

Tabla de Contenido

	Pág
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	12
1.1 objetivo General.....	12
1.2 Objetivos Específicos	12
2 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	13
3. GENERALIDADES DEL HIDRÓGENO	16
3.1 Clasificación y Perspectivas de la Producción de Hidrógeno.....	17
3.2 Propiedades Fisicoquímicas del Hidrógeno	20
3.3 El Hidrógeno como Vector Energético	22
3.4 Métodos Convencionales de Generación de Hidrógeno	23
3.5 Hidrógeno Natural: Potencial Geológico	25
4. EL ORIGEN Y OCURRENCIA DEL HIDRÓGENO NATURAL.....	26
4.1 Exploración del Hidrógeno Natural: Procesos Geológicos.....	26
4.1.1 Desgasificación del magma.....	27
4.1.2. Proceso de Serpentinización.....	28
4.1.3 Meteorización de la corteza oceánica y emisiones de hidrógeno	30
4.1.4. Alteración del basalto y la generación de hidrógeno	31
4.1.5 Interacción lava-agua de mar	32
4.1.6 Generación de Hidrógeno por formación de pirita	33

4.1.7 Generación de Hidrógeno a través de la Radiólisis en Entornos Marinos	34
4.1.8 Generación de Hidrógeno a través del Fracturamiento de Rocas durante Eventos Sísmicos	36
4.1.9 Generación de Hidrógeno por termogénesis y fermentación geotérmica.....	37
4.2 Ocurrencia del Hidrógeno Natural	41
4.2.1 Hidrógeno libre	42
4.2.2 Hidrógeno en inclusión y adsorción	43
4.3 Entrampamiento del hidrógeno natural.....	43
4.4 Explotación del hidrógeno natural.....	44
5. CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES EN LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO NATURAL.....	45
5.1 Muestreo de Gases en Superficie.....	46
5.2 Filtraciones de Hidrógeno Natural.	47
5.3 Depresiones sub-circulares por Hidrógeno “Círculos de Hadas”.....	47
5.4 Hidrógeno y Zonas de Falla.	51
6. RESERVAS DE HIDRÓGENO A NIVEL GLOBAL	53
6.1. Yacimientos Asociados a Ofiolíticas.	54
6.2. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados con Zonas de Rift	55
6.3. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Rocas Precámbricas.	56
6.4. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Rocas Ígneas	57
6.5 Hidrógeno en gases de géiseres, fuentes termales, volcanes de lodo y filtraciones independientes.	57
6.6 Descubrimientos de Hidrógeno en Muestras de Agua.	58

6.7 Descubrimientos de Hidrógeno Asociados con Campos de Petróleo y Gas.....	59
6.8. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Cuencas de Carbón.....	61
6.9. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Fallas	61
6.10 Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Rocas Sedimentarias.	62
6.11 Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Depósitos de Sal	63
7. POTENCIAL DE HIDRÓGENO NATURAL EN COLOMBIA	64
7.1. Cuenca del Magdalena.	65
7.2. Llanos Orientales.	65
7.3. Cuenca de Catatumbo.....	65
7.4. Región del Caribe.	66
7.5 Región Andina	66
8. CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Tipos de Hidrógeno.....	19
Tabla 2 Yacimientos asociados a Ofiolíticas	55
Tabla 3 Descubrimientos de hidrógeno asociados con Zonas de Rift.....	56
Tabla 4 Descubrimientos de hidrógeno asociados a rocas precámbricas.....	56
Tabla 5 Descubrimientos de hidrógeno asociados a rocas ígneas	57
Tabla 6 Hidrógeno en gases de géiseres, fuentes termales, volcanes de lodo y filtraciones independientes.....	58
Tabla 7 Descubrimientos de hidrógeno en muestras de agua.	59
Tabla 8 Descubrimientos de hidrógeno asociados con campos de petróleo y gas.	60
Tabla 9 Descubrimientos de hidrógeno asociados a cuencas de carbón	61
Tabla 10 Descubrimientos de hidrógeno asociados a fallas.....	62
Tabla 11 Descubrimientos de hidrógeno asociados a rocas sedimentarias.	62
Tabla 12 Descubrimientos de hidrógeno asociados a depósitos de sal	64

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Consumo proyectado de los combustibles	17
Figura 2 Energía específica y Densidad energética de combustibles convencionales	21
Figura 3 Proceso de fabricación de hidrogeno por reformado.....	23
Figura 4 Proceso de gasificación de biomasa	24

Figura 5 Doral oceánico formada por salida de material	27
Figura 6 Descripción de la disociación del agua.	35
Figura 7 Producción de hidrógeno en moléculas en relación con la energía de fricción.	36
Estudios previos han identificado que, a temperaturas superiores a 80°C, se produce la descomposición de los ácidos mediante reacciones como la descarboxilación, que conlleva a la generación de metano (CH ₄) y dióxido de carbono (CO ₂) debido a la pérdida de un grupo carboxilo (reacción 16). Por otro lado, la oxidación genera dióxido de carbono y agua en presencia de oxígeno, aunque en acuíferos profundos con baja disponibilidad de oxígeno, se cree que el agua en el medio proporciona el oxígeno necesario para este proceso (reacción 18) (Figura 8) (Araujo, 2016).....	38
Figura 8 Esquema de la degradación microbial de la materia orgánica en ambientes anóxicos en la presencia y ausencia de sulfato. Zona (a) ocurre como consecuencia de la presencia de bacterias sulfato reductoras y (b) a bacterias fermentativas o metanogénicas (Araujo, 2016).....	39
Figura 9 Diferentes hipótesis sobre el origen de los depósitos naturales de hidrógeno	42
Figura 10 Círculos de hadas con presencia de filtraciones de hidrogeno natural en diferentes lugares.....	49
Figura 11 Concentración de hidrógeno en el círculo de hadas cerca del lago Beermullah	50
Figura 12 Concentración de hidrógeno alrededor de la falla Darling, Australia occidental....	52
Figura 13 Mapa de detecciones de hidrógeno en diversos ambientes en concentraciones >10% vol	53

Resumen

Título: Hidrógeno Natural: Reacciones químicas, rasgos físicos de las formaciones y su potencial en Colombia. *

Autor: Jenifer Garces Ardila * *

Palabras Clave: Hidrogeno, Reacciones Químicas, Rasgos Físico, Genesis del Hidrógeno

Descripción: El hidrógeno natural, también conocido como hidrógeno blanco, se estudió, como un componente clave en la transición hacia una matriz energética más limpia y Sostenible. La investigación abarca los procesos de formación del hidrógeno natural, sus características geológicas y superficiales, así como su potencial de explotación en el contexto colombiano.

Se destacando las propiedades fisicoquímicas únicas del hidrógeno y su origen natural a través de procesos geológicos y geoquímicos incluyendo reacciones derivadas de procesos biológicos y abióticas, se resalta su atractivo para la sostenibilidad ambiental al no requerir intervención humana ni generar emisiones de carbono. La identificación de técnicas avanzadas de muestreo de gases y análisis geoquímico de fluidos para localizar depósitos de hidrógeno natural es un aspecto fundamental abordado en esta investigación.

Se analizaron las formaciones geológicas que albergan hidrógeno natural, destacando las características específicas que permiten su captura y acumulación, como la presencia de minerales ultramáficos, agua y estructuras tectónicas favorables. A nivel global, se examinaron yacimientos de hidrógeno en diversos contextos geológicos como referencia para la prospección en Colombia.

Esta investigación concluye que Colombia cuenta con condiciones geológicas propicias y un potencial significativo para la exploración y explotación del hidrógeno natural. Su aprovechamiento podría tener un impacto notable en la matriz energética nacional al ofrecer una fuente de energía limpia y sostenible.

* Monografía para optar al título de Especialista en Ingeniería del Gas

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simanca, Magister en Ingeniería Química

Abstract

Title: Natural Hydrogen: Chemical Reactions, Physical Traits of Formations, and Its Potential in Colombia. *

Author(s): Jenifer Garces Ardila * *

Key Words: Hydrogen, Chemical Reactions, Physical Traits, Genesis of Hydrogen

Description: Natural hydrogen, also known as white hydrogen, has been studied as a key component in the transition towards a cleaner and more sustainable energy matrix. The research encompasses the formation processes of natural hydrogen, its geological and surface characteristics, as well as its exploitation potential in the Colombian context.

Highlighting the unique physicochemical properties of hydrogen and its natural origin through geological and geochemical processes, including reactions derived from biological and abiotic processes, its appeal for environmental sustainability is emphasized as it does not require human intervention nor generate carbon emissions. The identification of advanced gas sampling techniques and geochemical fluid analysis to locate natural hydrogen deposits is a fundamental aspect addressed in this research.

Geological formations that harbor natural hydrogen were analyzed, highlighting the specific characteristics that allow its capture and accumulation, such as the presence of ultramafic minerals, water, and favorable tectonic structures. Globally, hydrogen deposits in various geological contexts were examined as a reference for prospecting in Colombia.

This research concludes that Colombia has favorable geological conditions and significant potential for the exploration and exploitation of natural hydrogen. Its utilization could have a notable impact on the national energy matrix by offering a clean and sustainable energy source. _____

* Monography

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simanca, Magister en Ingeniería Química

Introducción

La dependencia de Colombia de los combustibles fósiles ha ocasionado diversos problemas ambientales y de sostenibilidad energética. Ante esta situación, surge el hidrógeno como una alternativa limpia de energía. Mientras que la generación convencional de hidrógeno plantea desafíos en costos y emisiones de gases de efecto invernadero, el hidrógeno natural se perfila como una opción más sostenible que requiere de una mayor exploración. Para asegurar la adecuada explotación de este recurso y garantizar la fiabilidad en su extracción, es imprescindible contar con un sólido conocimiento científico sobre los procesos fisicoquímicos que subyacen a la formación del hidrógeno natural.

Esta investigación se enfoca en analizar las reacciones químicas involucradas en la creación del hidrógeno natural, así como en identificar los factores físicos que determinan su presencia en la superficie terrestre. A pesar de que el hidrógeno natural representa una fuente crucial de energía más limpia y sostenible, aún persisten lagunas significativas en nuestro entendimiento de estos procesos. Por tanto, el objetivo de esta tesis radica en profundizar en el conocimiento científico relacionado con las reacciones químicas que impulsan la formación del hidrógeno natural, con el propósito de determinar sus características fisicoquímicas y las condiciones óptimas para su generación, así como en investigar indicadores físicos en la superficie que puedan revelar la presencia de este recurso.

Asimismo, al identificar las características fisicoquímicas óptimas para la retención del hidrógeno natural, se podrán minimizar las pérdidas durante los procesos de extracción y almacenamiento. La evaluación de los rasgos físicos en la superficie que actúan como indicadores

de la presencia de hidrógeno natural es un componente crítico de esta investigación. Este análisis proporcionará orientación sobre las áreas propicias para contener hidrógeno, reducirá costos al establecer un plan de explotación más eficiente y estratégico, y contribuirá a mitigar y preservar el entorno natural durante las operaciones de extracción.

En última instancia, la evaluación de las zonas prospectas de hidrogeno natural en Colombia, convierte en un elemento esenciales para respaldar esta tesis, especialmente en un contexto donde la búsqueda de alternativas sostenibles es una prioridad. La comprensión del rol que este recurso puede desempeñar en el país adquiere una relevancia incuestionable. Este proyecto busca aportar al desarrollo de conocimientos que fomenten prácticas más sostenibles y eficientes en la utilización del hidrógeno natural en el contexto colombiano.

1. Objetivos

1.1 objetivo General

Investigar de manera integral el Hidrógeno Natural, analizando las reacciones químicas, identificando los rasgos físicos de las formaciones y evaluando su potencial en el contexto colombiano.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las reacciones químicas que involucran la formación de hidrógeno natural, para profundizar en el conocimiento científico sobre estos procesos.
- Conocer los rasgos fisicoquímicos de las formaciones que promueven el atrapamiento del hidrógeno natural.
- Evidenciar los rasgos físicos en superficie relacionados con la presencia de hidrógeno natural, con el fin de brindar una orientación sobre las áreas prospectas donde se podría encontrar dicho hidrógeno para su aprovechamiento.
- Conocer el potencial y las aplicaciones que el hidrógeno natural puede aportar en Colombia.

2 Antecedentes Investigativos

El prejuicio existente de que el hidrógeno libre en la naturaleza es raro, y las descripciones de los pocos descubrimientos conocidos son anecdóticas y por alguna razón reciben muy poca atención. Por lo tanto, si nadie espera encontrar hidrógeno libre, nadie lo busca. Este prejuicio influye en la forma en que se analizan las muestras de gas, pero también en la forma en que se diseñan los sistemas de detección. Es difícil estimar cuántas veces no se ha identificado hidrógeno en muestras ricas en H₂ debido a la falta de una técnica de detección adecuada para medir las concentraciones de hidrógeno (Zgonnik, 2020).

En Turquía, el gas natural rico en hidrógeno sale a la superficie y se quema espontáneamente. Las llamas de esta filtración de gas natural se conocen desde la antigüedad y se cree que son el origen de la primera llama olímpica. Pero, lo que no se había evidenciado es la concentración de hidrógeno, solo después de unos estudios confirman la concentración de hasta 11,3% de hidrógeno. (Hosgörmez et al., 2008; Vacquand, 2011) (Zgonnik, 2020).

Del mismo modo ocurrió con los pozos encontrados en Bourakébougou, Malí en 1978. No se tenía conocimiento del gas que emanaba en el pozo. hasta 2007 un rico hombre de negocios, político y presidente de Petroma, una compañía de petróleo y gas maliense adquirió los derechos de prospección en la región. En 2012, contrató a Chapman Petroleum para determinar qué salía del pozo. Sus técnicos descubrieron que el gas estaba compuesto en un 98% por hidrógeno. El

descubrimiento en Malí es una clara evidencia de una casualidad y no una elección (Alain Prinzhofer, 2018).

Las experiencias similares se repiten en distintas partes del mundo, como por ejemplo en Estados Unidos, donde el primer pozo se perforó en 2019 en la zona de Nebraska. En España, una empresa que trabaja en la futura explotación de un pozo en Aragón sostiene que en el centro de los Pirineos hay rocas marinas ricas en hierro, que se comprimieron y levantaron cuando la Placa Ibérica cerró un océano y se estrelló contra la actual Francia, hace unos 65 millones de años. Al parecer, las fallas profundas canalizan el hidrógeno producido en esas rocas hacia una capa de arenisca porosa, que está cubierta por un esquisto compacto: desde ese lugar podría extraerse hidrógeno natural (Piacente, 2023).

En la década de 1970 se detectó hidrógeno natural que se filtraba en forma de gas desde sistemas hidrotermales en las dorsales oceánicas. Uno de los principales logros del crucero Flores fue el descubrimiento del campo hidrotermal Rainbow alojado en rocas ultramáficas al sur del segmento Amar en la dorsal del Atlántico Medio (MAR), un campo con alto contenido de fluidos hidrotermales. Los fluidos hidrotermales se han utilizado a pequeña escala como fuente de diversas sustancias químicas (Stefán Arnórsson, 2015). En comparación con fluidos recolectados de otros sitios de ventilación a lo largo del MAR. El hidrógeno representa más del 40% del volumen total de gas extraído de los fluidos (.L Charlou, 2002).

Pero lo curioso es que solo se dieron cuenta de las altas concentraciones de hidrógeno hasta que realizaron un análisis de los gases que emanaban de aquellos lugares. Lo que se sabe a ciencia cierta es que, los métodos estándar para determinar la composición de gases son por medio

de cromatografía, en ella se usa como gas portador el hidrógeno, lo que podría generar un error en su detección (Zgonnik, 2020).

En Lorena, Francia se halló un pozo con grandes concentraciones de hidrógeno, y fue posible gracias a la tecnología que usaron en su expedición. Todo ocurrió porque querían evaluar los niveles de gas metano ocultos en el subsuelo de la región. Al analizar los estratos rocosos y depósitos de metano descubrieron una elevada proporción de hidrógeno, con un nivel de concentración que parecía aumentar a medida que se descendía. Para lograr este objetivo, necesitaban desarrollar una nueva tecnología para sondear, in situ y de forma continua, formaciones rocosas del período Carbonífero, de la era geológica de hace 359 a 299 millones de años.

Por medio de la sonda SysMoG, una herramienta que les permitió analizar el gas disuelto en agua en formaciones rocosas de hasta 1.200 m de profundidad. Con esos recursos comprobaron la concentración de hidrógeno (MANO, 2023).

Este recurso, que puede aprovecharse cuando se desgasifica en la superficie terrestre o cuando se extrae mediante perforaciones, ha estado en el radar de los científicos durante algún tiempo. Pero surgió un interés más amplio en el recurso a medida que las naciones del mundo buscaban reemplazar el gas fósil con un combustible de combustión limpia (Messad, 2023).

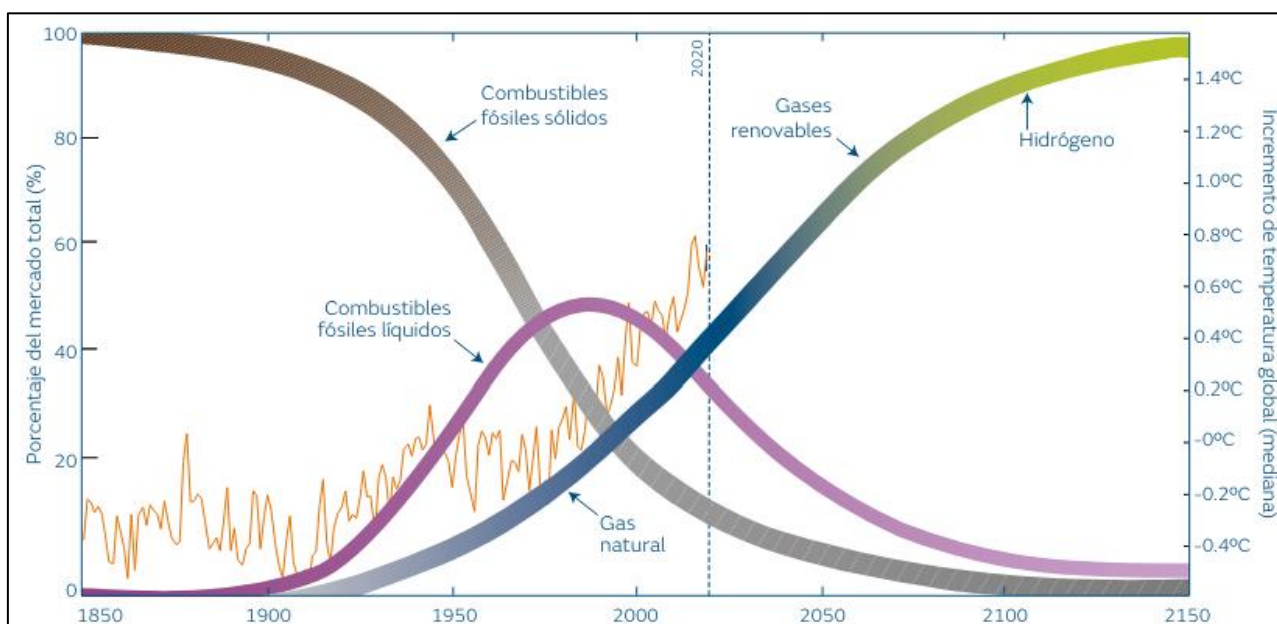
3. Generalidades del Hidrógeno

Según la Agencia Internacional de la Energía, se prevé que el consumo de hidrógeno continúe creciendo de manera significativa para el año 2030. Este elemento se ha consolidado como una pieza clave en la descarbonización y la transición energética, debido a su capacidad para ser un recurso renovable que proporciona energía segura y económicamente competitiva (Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020).

Esta creciente importancia del hidrógeno se refleja claramente en los diferentes sectores industriales que lo utilizan. El sector que más consume hidrógeno es la producción de amoníaco, representando el 61% del total. Se estima que este consumo aumentará en un 17% debido a la creciente demanda de fertilizantes en la agricultura. Por otro lado, los procesos de refinado de petróleo consumen un 23% del hidrógeno, con una previsión de aumento del 7% debido a las nuevas legislaciones que limitan el contenido de azufre en los productos petrolíferos (Ares J. , Leardini, Sánchez, Fernández, & Ferrer, 2019).

Asimismo, la producción de metanol consume un 9% del hidrógeno y se espera un incremento del 4%. El 7% restante se utiliza en diversos procesos industriales (Ares J. , Leardini, Sánchez, Fernández, & Ferrer, 2019). En la **Figura 1**, evidencia la proyección de los combustibles. El mercado del hidrógeno seguirá expandiéndose en los próximos años, independientemente de la incorporación de nuevos mercados como los gases renovables, debido a su importancia en la transición hacia una economía más sostenible (Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020).

Figura 1 Consumo proyectado de los combustibles



(Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020).

3.1 Clasificación y Perspectivas de la Producción de Hidrógeno

La comunidad científica y el sector energético han clasificado las diversas formas de producir hidrógeno utilizando un sistema de colores, como se muestra en la **Tabla 1**. A medida que avanza la investigación y se expande el uso del hidrógeno debido a su abundancia, se busca

una mejor comprensión de sus aplicaciones y beneficios (Ares J. , Leardini, Sánchez, Fernández, & Ferrer, 2019).

Entre las formas más demandadas de producción de hidrógeno se encuentran el hidrógeno gris, producido a partir de combustibles fósiles, y el hidrógeno azul, que utiliza tecnologías de secuestro para gestionar las emisiones de CO₂. Aunque el hidrógeno azul busca reducir las emisiones, estas tecnologías incrementan los costos de producción y su eficacia no garantiza un almacenamiento permanente del carbono en el suelo, sino que solo retrasa su liberación a la atmósfera, lo que podría agravar la crisis climática para las generaciones futuras (Ares J. , Leardini, Sánchez, Fernández, & Ferrer, 2019).

Además del hidrógeno azul, otra alternativa es la producción de hidrógeno mediante pirólisis de metano fósil, lo que resulta en la formación de productos sólidos de carbono que son más fáciles de capturar que el dióxido de carbono. Sin embargo, esta técnica enfrenta importantes retos relacionados con la gestión de residuos (Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020).

Por otro lado, el hidrógeno verde se destaca como una solución prometedora debido a su producción a partir de agua y electricidad renovable, e incluso puede derivarse de otras fuentes sostenibles como la biomasa. Este tipo de hidrógeno es completamente limpio en términos de emisiones. No obstante, sus costos elevados y la lenta velocidad de producción limitan actualmente su implementación a gran escala (Ares, Leardini, & Sánchez, 2019).

Actualmente, la producción de hidrógeno se realiza mayoritariamente a partir de compuestos que contienen carbono. Según las cifras actuales, el 43% proviene de gas natural, el 30% de naftas y el 18% de carbón, mientras que solo el 4% se produce mediante electrólisis del agua. Esta situación refleja una dependencia significativa de fuentes no renovables para la

obtención de hidrógeno, lo cual plantea desafíos en términos de sostenibilidad y reducción de emisiones contaminantes (Ares J. , Leardini, Sánchez, Fernández, & Ferrer, 2019).

Tabla 1 *Tipos de Hidrógeno*

COLOR	FUENTE	MÉTODO	ALCANCE DE GENERACIÓN DE EMISIONES DE GEI
GRIS	Gas natural o petróleo	Reformado de gas metano con vapor. Oxidación parcial.	Generación de emisiones de CO ₂
MARRON	Carbón	Reformado autotérmico. Gasificación de carbón. Gasificación de biomasa.	Altas emisiones de CO ₂ .
AZUL	Gas natural o petróleo	Reformado de gas metano con vapor. Oxidación parcial. Reformado autotérmico. Tecnología de Captura, almacenamiento y uso del carbono.	Bajas emisiones (Captura de CO ₂ no es totalmente activa).
TURQUESA	Fósil (Gas natural)	Pirólisis	Nulas o bajas emisiones de CO ₂ (se obtiene carbono sólido, según la fuente desde la que se impulse el proceso de pirólisis).
VERDE	Electricidad o energía a partir de fuentes renovables	Electrolisis	Emisiones nulas

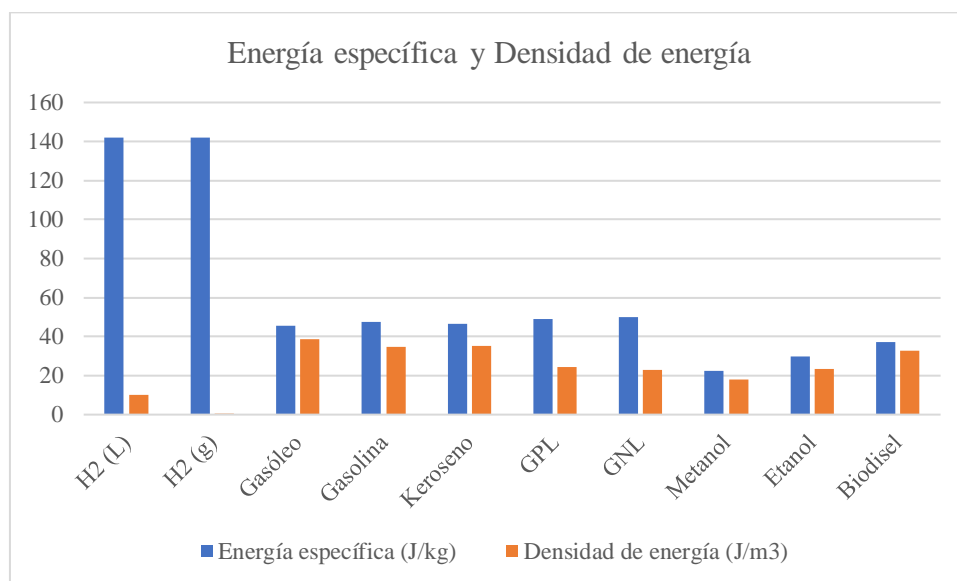
DORADO	Amoniaco, biogás, gas natural	Membranas protónicas. Reformado de gas metano con vapor. Tecnología de Captura, almacenamiento y uso del carbono.	cerámicas Bajas o negativas (si se consideran las capturadas y/o evitadas por la descomposición del biogás)
---------------	-------------------------------	---	--

Tomado de *Hidrógeno en Colombia SI SE HACE MAL, PODRÍA SER PEOR*, por Aldana Rivera, S. E., & León Peñuela, F. A., 2022, Fundación Heinrich Böll.

3.2 Propiedades Físicoquímicas del Hidrógeno

En condiciones estándar, el hidrógeno se presenta como una molécula de gas diatómico, H_2 , que posee una alta Energía específica en comparación con los combustibles convencionales. Sin embargo, su naturaleza ligera dificulta el almacenamiento de grandes cantidades en un espacio reducido. Por lo tanto, para utilizar eficazmente la energía del hidrógeno en aplicaciones como la propulsión vehicular, es imprescindible contar con sistemas de almacenamiento que cumplan con requisitos óptimos de volumen y seguridad. Además, cualquier proceso de compresión, licuefacción o conversión del hidrógeno en otros combustibles implica un consumo adicional de energía que debe ser considerado en el análisis del balance energético (Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020).

La densidad energética del hidrógeno es unas 3.000 veces menor que la de la gasolina, que alcanza los 34,85 J/m³. A pesar de esta baja densidad volumétrica, el hidrógeno tiene un poder calorífico específico casi tres veces mayor que el de la gasolina, con 141,01 J/kg en comparación con los 47,4 J/kg de la gasolina (Aldana Rivera & León Peñuela, 2022). Esta característica destaca el potencial del hidrógeno como un combustible altamente eficiente en términos de energía por unidad de masa.

Figura 2 *Energía específica y Densidad energética de combustibles convencionales*

(Alanís Navarro, 2024)

Estas propiedades únicas subrayan la importancia de abordar los desafíos existentes para establecer una economía basada en hidrógeno renovable. Aunque el hidrógeno no se considera tóxico, su pequeño tamaño molecular y altos coeficientes de difusión aumentan el riesgo de fugas. Además, pueden afectar la resistencia de los materiales utilizados en sus instalaciones, como tuberías de acero, conexiones y sellos (Aldana Rivera & León Peñuela, 2022).

En consecuencia, mientras que el hidrógeno ofrece un potencial significativo como fuente de energía limpia y eficiente, sus propiedades fisicoquímicas presentan desafíos que deben superarse para su adopción a gran escala. La investigación y desarrollo en tecnologías de almacenamiento y manejo seguro del hidrógeno son esenciales para capitalizar plenamente sus beneficios y establecer una economía sostenible basada en este recurso.

3.3 El Hidrógeno como Vector Energético

Los métodos de obtención de energía, como los combustibles fósiles y las energías renovables, se consideran fuentes primarias para la producción de energía eléctrica (Aldana Rivera & León Peñuela, 2022). Actualmente, la mayor parte de la energía eléctrica se almacena mediante hidroeléctricas reversibles. Aunque esta es una fuente de energía renovable, requiere condiciones geológicas específicas, es costosa y tiene un impacto ambiental considerable.

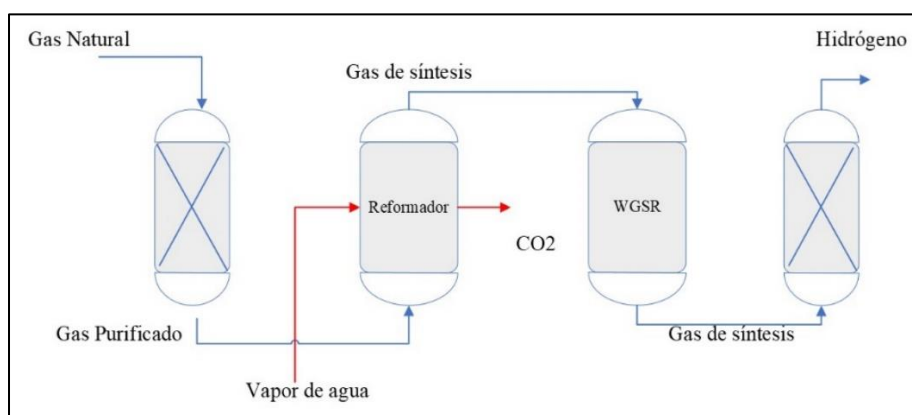
Debido a las complicaciones persistentes en la formación y almacenamiento de energía eléctrica, se está considerando el hidrógeno como un vector energético, es decir, como un medio para almacenar y transportar energía. Sin embargo, su producción normalmente requiere de un proceso químico (Ares, Leardini, & Sánchez, 2019).

El hidrógeno puede aprovecharse cuando se desgasifica en la superficie terrestre o cuando se extrae mediante perforaciones. Aunque los científicos han estado al tanto de este recurso durante algún tiempo, el interés ha crecido a medida que las naciones del mundo buscan reemplazar el gas fósil por un combustible limpio (Messad, 2023).

3.4 Métodos Convencionales de Generación de Hidrógeno

En la **Figura 3** se evidencia el proceso de obtención de hidrógeno mediante el método de reformado. Utiliza el gas natural como principal fuente de hidrógeno. Durante este procedimiento, el metano se descompone para producir hidrógeno y óxidos de carbono. Antes de iniciar esta operación, es esencial desulfurar el gas natural para eliminar las impurezas de azufre presentes. Una vez purificado, el gas natural se mezcla con vapor de agua y se introduce en un lecho catalítico. Posteriormente, se lleva a cabo una etapa de desplazamiento para convertir el monóxido de carbono (CO) en dióxido de carbono (CO₂), aumentando así la cantidad final de hidrógeno. Para obtener hidrógeno puro, es imprescindible realizar una etapa final de purificación para separar los demás compuestos presentes en el gas de síntesis (Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020).

Figura 3 *Proceso de fabricación de hidrógeno por reformado*

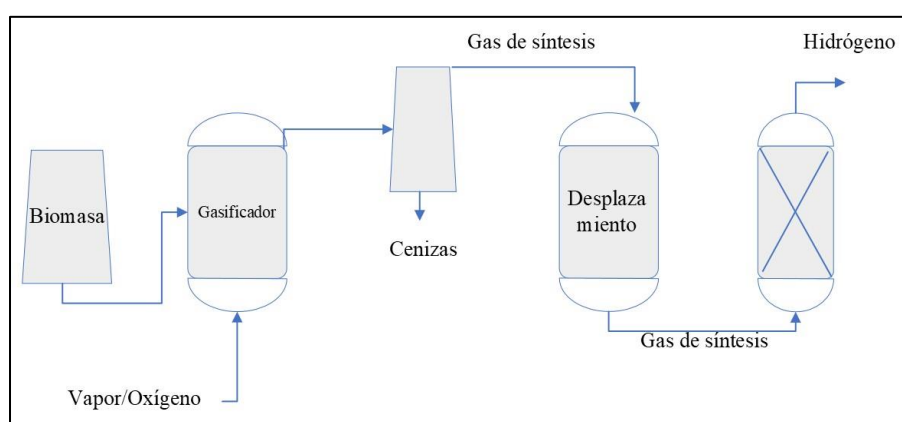


(Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020)

Además del método por reformado, existe una opción para la producción de hidrógeno renovable a través de la gasificación de fuentes renovables sólidas, como la biomasa. Dado que la biomasa absorbe dióxido de carbono durante su crecimiento, las emisiones netas durante su quema

se reducen significativamente. La tecnología de gasificación de biomasa consiste en exponerla a altas temperaturas en presencia de oxígeno por debajo del nivel estequiométrico o con vapor de agua. Este proceso lleva a la oxidación parcial de las partículas de biomasa, resultando en la producción de gas de síntesis y otros subproductos sólidos (Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020).

Figura 4 *Proceso de gasificación de biomasa*



(Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020)

Asimismo, el gas de síntesis obtenido tanto del reformado de gas natural como de la gasificación de biomasa requiere procesos complejos de purificación y optimización para maximizar la eficiencia y minimizar las emisiones contaminantes. En el caso del reformado de gas natural, la purificación final es crucial para separar los demás compuestos presentes en el gas de síntesis y obtener hidrógeno puro. Por otro lado, en la gasificación de biomasa, la oxidación parcial de las partículas de biomasa y la producción de subproductos sólidos demandan tecnologías avanzadas para garantizar una producción eficiente y sostenible de hidrógeno.

Ambas tecnologías representan enfoques complementarios en la transición hacia una economía energética más limpia y sostenible, subrayando la necesidad de continuar invirtiendo en

investigación y desarrollo para superar los desafíos técnicos y económicos asociados con la producción y purificación de hidrógeno.

3.5 Hidrógeno Natural: Potencial Geológico

El hidrógeno natural, también conocido como hidrógeno nativo, se genera mediante procesos geológicos y se han registrado emisiones de hidrógeno en varios lugares. Aunque actualmente la extracción directa de depósitos subsuperficiales de hidrógeno es poco común, se está considerando cada vez más como una fuente abundante, sostenible y rentable de H₂ (Moretti, 2019).

Históricamente, el descubrimiento y la utilización de recursos naturales han sido impulsados tanto por la necesidad como por accidentes fortuitos. El hidrógeno es uno de esos accidentes que han contribuido a la evolución de los elementos químicos conocidos en la naturaleza. Sin embargo, existe un prejuicio que limita la búsqueda activa de hidrógeno libre en la naturaleza, ya que se considera raro y anecdótico. Este prejuicio influye tanto en la forma en que se analizan las muestras de gas como en el diseño de los sistemas de detección. Es difícil estimar cuántas veces no se ha identificado hidrógeno en muestras ricas en H₂ debido a la falta de una técnica de detección adecuada (Zgonnik, 2020).

En la actualidad, la percepción sobre el hidrógeno natural está cambiando. La inversión en tecnologías avanzadas y en la exploración geológica está revelando el potencial significativo del hidrógeno nativo como una fuente viable de energía sostenible. Por ejemplo, la National Renewable Energy Laboratory (NREL) ha sido seleccionada como parte de un proyecto financiado por la ARPA-E del Departamento de Energía de EE.UU. para explorar el potencial del hidrógeno geológico. Este proyecto tiene como objetivo aumentar la producción de hidrógeno a partir de

rocas ricas en hierro utilizando procesos químicos, mecánicos y biológicos. La investigación también busca determinar la viabilidad económica y la capacidad de producción a gran escala del hidrógeno geológico, lo que podría transformar el sector energético al proporcionar una vía sostenible para el hidrógeno (Bersine, 2024).

4. El Origen y Ocurrencia del Hidrógeno Natural

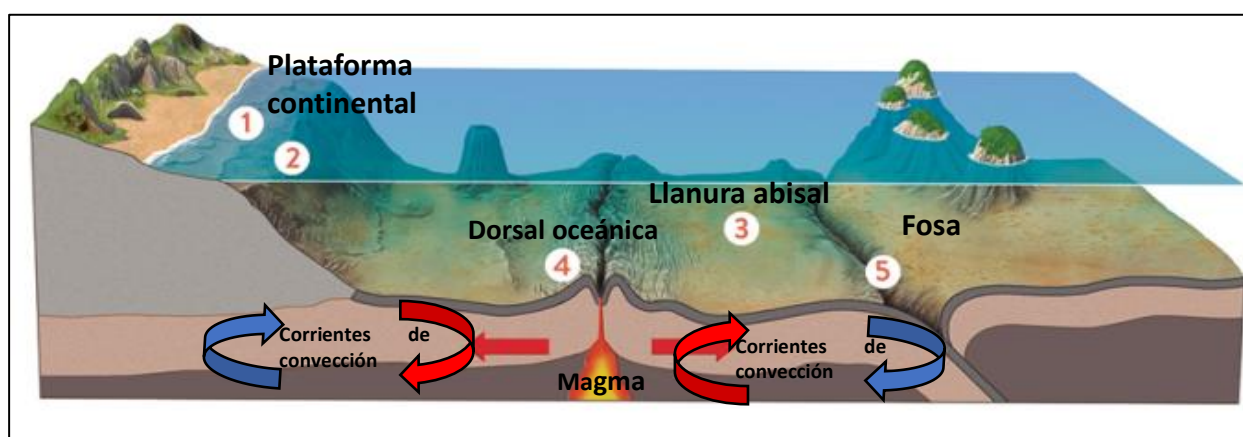
4.1 Exploración del Hidrógeno Natural: Procesos Geológicos

Investigaciones recientes sobre depósitos naturales de hidrógeno han cambiado la percepción sobre este elemento y han abierto nuevas posibilidades para su obtención a gran escala de manera limpia y natural a través de procesos geológicos. Estos hallazgos sugieren que el hidrógeno podría ser extraído de forma más eficiente de lo que se creía, lo que podría tener un impacto significativo en su uso como fuente de energía (Solé, 2020).

La primera evidencia confiable de hidrógeno natural debajo de la superficie se descubrió en la década de 1990 en la Cordillera Atlántica. En esta región, se encontró una emanación de agua caliente geotérmicamente cargada de minerales, conocidos como fluidos hidrotermales. Estos fluidos se generan principalmente a partir de fuentes magmáticas de calor. Las rocas fundidas en el interior de la Tierra, conocidas como magma, intentan salir a altas temperaturas, elevando la temperatura del agua y generando movimientos convectivos en el manto como se muestra en la
¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. (Pantojo Alor & Gómez Caballero, 2004).

Durante las expediciones de exploración, se recogieron fragmentos de roca, los cuales contenían 0,881 ml/g de gas combustible, con un 26,7% de hidrógeno. Este hallazgo inicial en un ambiente marino profundo sugiere que el hidrógeno puede estar presente en cantidades significativas en ciertos contextos geológicos (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

Figura 5 Dorsal oceánica formada por salida de material



La investigación continua en este campo es crucial para entender mejor los mecanismos de formación y liberación del hidrógeno, lo que podría abrir nuevas vías para su explotación sostenible y a gran escala.

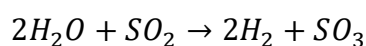
4.1.1 Desgasificación del magma.

El primer descubrimiento llevó a los científicos a considerar la posibilidad de que los volcanes submarinos y terrestres puedan emitir hidrógeno durante ciertos procesos de desgasificación. En particular, se plantea la hipótesis de que el hidrógeno podría ser liberado cuando el dióxido de azufre (SO_2) se desgasifica a baja presión y altas temperaturas, alrededor de

1200°C. Esto sugiere que el hidrógeno podría ser un componente del magma, liberado durante la actividad volcánica (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

La relación entre la desgasificación del SO₂ y la emisión de hidrógeno es un área de investigación activa. El dióxido de azufre es un gas comúnmente liberado durante erupciones volcánicas y posee un papel crucial en la química de los gases volcánicos. A temperaturas extremadamente altas, como las encontradas en el magma (~1200°C), el SO₂ puede descomponerse parcialmente en oxígeno y azufre, liberando energía en el proceso. En condiciones de baja presión, típicas de la desgasificación volcánica, esta reacción puede facilitar la ruptura de los enlaces entre los compuestos de hidrógeno presentes en el magma, liberando hidrógeno libre en el ambiente (H. Shinohara, 2008).

Este mecanismo se puede representar por la siguiente reacción simplificada:



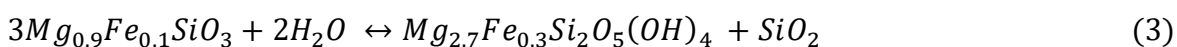
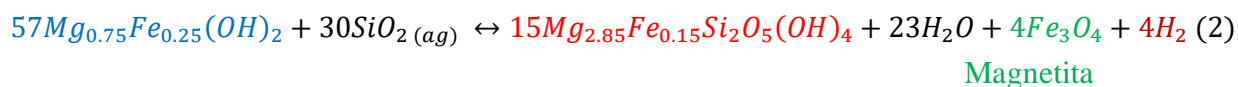
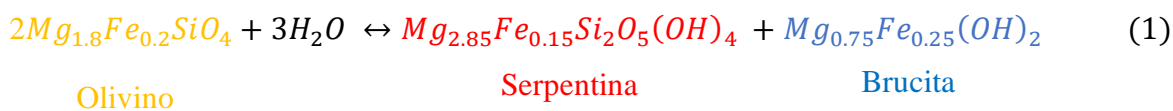
El vapor de agua (H₂O) puede reaccionar con el dióxido de azufre (SO₂) presente en los gases volcánicos, resultando en la producción de hidrógeno (H₂) y trióxido de azufre (SO₃). (Bo Long, 2023).

4.1.2. Proceso de Serpentinización.

Los investigadores han determinado que las fuentes de hidrógeno en las dorsales oceánicas, incluyen las alteraciones de rocas con Fe (II) **Figura 5**. La serpentinización es un proceso biológico que ocurre cuando el agua reacciona con rocas ultramáficas, las cuales se caracterizan por tener bajos niveles de sílice (SiO₂ <45%) y altas concentraciones de minerales como hierro y magnesio. Estas rocas son más comunes en áreas con escasa presencia de magma y se encuentran principalmente en la corteza terrestre y las litosferas de planetas similares a la Tierra. El

componente principal de estas rocas ultramáficas es el olivino, que se vuelve inestable en condiciones hidrotermales. Los olivinos, con una fórmula química general de $(Mg,Fe)_2SiO_4$, forman una mezcla isomorfa donde compuestos como la fayalita (Fe_2SiO_4) y la forsterita (Mg_2SiO_4) tienen distintas composiciones químicas pero comparten la misma estructura cristalina (Guzmán Marmolejo, 2014).

La serpentinización es un fenómeno multifacético que se detalla en las reacciones 1, 2 y 3, centrándose en la hidratación y oxidación-reducción del olivino. Estas transformaciones pueden ocurrir en un amplio espectro de presiones, que varían desde 1 bar hasta 5 kbares, y temperaturas que oscilan entre los $0^\circ C$ y los $500^\circ C$ teniendo en cuenta que los rangos pueden afectar la velocidad de la reacción y la estabilidad del olivino (Guzmán Marmolejo, 2014). Según investigaciones, han observado que la reacción tiene una mejor estabilidad y rendimiento en rangos de temperaturas de $200^\circ C$ y $310^\circ C$. A temperaturas muy bajas, la velocidad de reacción puede llegar a ser muy limitada y a temperaturas muy altas, la velocidad de reacción sería alta y la formación de H_2 puede consumir el FeO más rápido de lo que se forma (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020).



En la reacción 1, se da la hidratación del olivino que produce nuevos minerales, como la serpentina ($Mg_3Si_2OH_5(OH)_4$) y brucita ($Mg(OH)_2$) (BLay-Roger, Bach, Bobadilla, & Ramírez Reina, 2024).

Durante el proceso de generación de H_2 , en la superficie mineral hay presencia de sílice acuoso que permite la oxidación del hierro (ión Fe^{+2}) y formar magnetita (Fe_3O_4) junto con el hidrógeno, como se indica en la Reacción 2. Para que esta reacción sea sostenible a lo largo del tiempo, el proceso de serpentinización debe incorporar cantidades mínimas de sílice, ya que un exceso de este mineral podría dar lugar a la formación de minerales que contienen el ion Fe^{+2} en lugar de oxidarlo a Fe^{+3} (Reacción 2), lo cual resultaría en una menor producción de H_2 (BLay-Roger, Bach, Bobadilla, & Ramírez Reina, 2024). Por lo tanto, es necesario reducir nuevamente el ion Fe^{+3} para mantener la sostenibilidad del proceso (Guzmán Marmolejo, 2014).

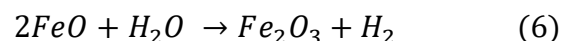
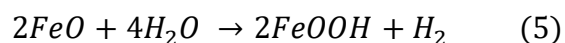
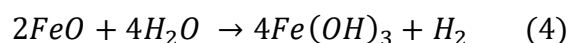
La sostenibilidad de la reacción no solo está determinada por la cantidad de sílice presente en la roca, sino que también depende de la velocidad de reacción. Como es sabido, la velocidad de reacción está influenciada por la concentración de los reactivos, en este caso el FeO . Por lo tanto, existe la posibilidad de que la reacción consuma el FeO a un ritmo más rápido de lo que la corteza terrestre puede regenerarlo. Por ello, es crucial mantener un equilibrio en el consumo para garantizar la continuidad de la reacción (Guzmán Marmolejo, 2014).

4.1.3 Meteorización de la corteza oceánica y emisiones de hidrógeno

Este fenómeno ocurre principalmente debido a la solidificación del magma y al enfriamiento de la roca a temperaturas menores a $250^\circ C$, lo cual es común en la capa superior de la corteza oceánica. La presencia de temperaturas bajas en esta capa se debe a la circulación de aguas marinas causada por la erosión de los fondos marinos. Estudios en rocas alteradas en la corteza oceánica indican que el Fe^{+2} aumenta como consecuencia del enfriamiento y

Cristalización. Este fenómeno, facilita la interacción del agua con las rocas que contienen Fe^{2+} , favoreciendo así la formación de compuestos secundarios y la liberación de hidrógeno.

De esta forma, la oxidación del Fe^{2+} y el proceso de meteorización de la corteza están estrechamente relacionados, ya que la erosión y la circulación del agua son fundamentales para mantener las condiciones necesarias de las siguientes reacciones que se forman a bajas temperaturas (BACH & EDWARDS, 2003).



De acuerdo con investigaciones, estas reacciones se consideran una segunda etapa de la oxidación del Fe^{+2} después de que se ha consumido el oxígeno disuelto en el agua. Se ha afirmado que la cantidad de hidrógeno liberado en esta etapa 300 mol H_2/m^3 (BACH & EDWARDS, 2003).

4.1.4. Alteración del basalto y la generación de hidrógeno

A diferencia de los procesos de meteorización de la corteza, la teoría de la alteración del basalto sugiere que las altas temperaturas (350-400°C) en la corteza oceánica transforman los silicatos ferrosos en minerales de hierro. Este proceso no solo produce minerales de hierro, sino que también permite la formación de hidrógeno, como se muestra en la reacción siguiente:



Este fenómeno es conocido como la alteración del basalto por altas temperaturas. Aunque se desconoce la profundidad exacta a la que los fluidos hidrotermales pueden llegar, investigaciones recientes sugieren que la interacción entre basalto y agua subterránea no genera cantidades significativas de hidrógeno debido a la rápida desactivación de las superficies de contacto entre el agua y el mineral (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

La alteración del basalto es un proceso complejo que involucra condiciones específicas de temperatura y presión en la corteza oceánica. A temperaturas elevadas, los silicatos ferrosos en el basalto reaccionan con el agua, produciendo óxidos de hierro y liberando hidrógeno en el proceso. Sin embargo, la efectividad de este proceso puede ser limitada por la formación de productos de reacción que inhiben la interacción continua entre el agua y los minerales del basalto. Esta interacción limitada puede explicar por qué la generación de hidrógeno en estos entornos no es tan significativa como se esperaba (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

4.1.5 Interacción lava-agua de mar

En 2008, se informó el descubrimiento de columnas de eventos asociados a una erupción en el Centro de Extensión Lau del Noreste. Durante estas observaciones, se encontraron altas concentraciones de H₂, alcanzando hasta 9123 nM. Se determinó que estas columnas de eventos no mostraban indicios de interacción significativa entre agua y roca. En consecuencia, se concluyó que solamente entre el 0,08% y el 0,02% de la lava tuvo que reaccionar con el agua de mar para producir la reserva de H₂ observada en estas columnas de lava (Panadero, Lupton, & Resing, 2011).

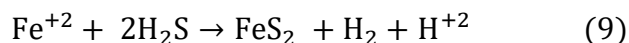


Esta reacción química representa cómo el FeO presente en el magma puede reaccionar con el agua de mar, produciendo óxido de hierro (Fe₂O₃) y liberando hidrógeno (H₂) en el proceso.

Las investigaciones indican que, a pesar de la baja proporción de lava que reacciona con el agua de mar, la cantidad de hidrógeno generada puede ser considerable. Esto se debe a la eficiencia de la reacción y las condiciones favorables durante estos eventos volcánicos (Panadero, Lupton, & Resing, 2011).

4.1.6 Generación de Hidrógeno por formación de pirita

La generación de hidrógeno (H₂) en entornos geológicos está significativamente influenciada por la formación de pirita y otros minerales de sulfuro. Durante las erupciones de magma o cuando los fluidos hidrotermales calientes, ricos en sustancias químicas, entran en contacto con el agua fría del mar, se produce un gradiente de temperatura que promueve la precipitación de minerales en el fondo marino. Este fenómeno puede ser descrito por la siguiente reacción química (RM galante, 2006).



Esta reacción muestra cómo el hierro en su estado ferroso (Fe²⁺) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S) pueden reaccionar para formar pirita (FeS₂), liberando hidrógeno (H₂) y protones (H⁺) en el proceso.

Adicionalmente, estudios sugieren que pequeñas cantidades de bornita de sulfuro de cobre y hierro (Cu-Fe) también precipitan bajo las condiciones del fondo marino. La calcopirita (CuFeS₂), un sulfuro de Cu-Fe comúnmente encontrado en el revestimiento de las chimeneas

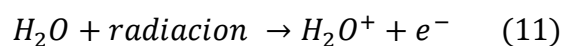
hidrotermales, puede producir hidrógeno como resultado de estas reacciones de precipitación de minerales de sulfuro metálico. La siguiente reacción química ilustra este proceso (RM galante, 2006).



4.1.7 Generación de Hidrógeno a través de la Radiólisis en Entornos Marinos

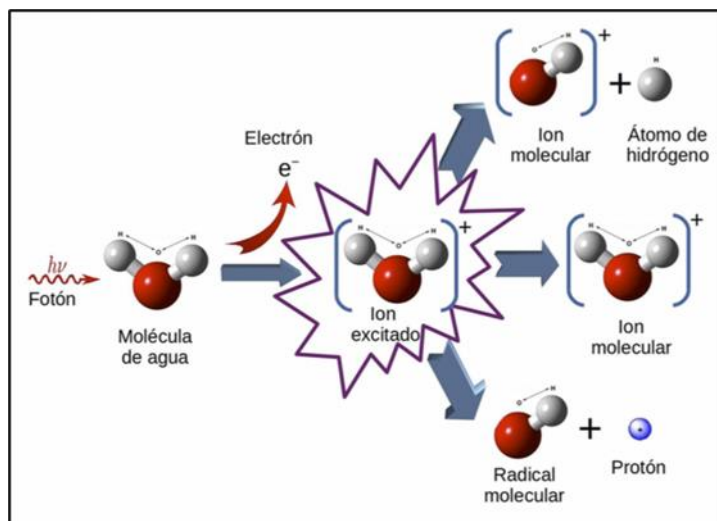
La radiólisis es otro proceso geológico significativo que participa en la producción de hidrógeno (H_2). Este fenómeno ocurre cuando la radiación generada por la descomposición de elementos radioactivos, tales como uranio, torio y potasio, provoca la separación de las moléculas de agua. La radiación ioniza el agua en entornos marinos, creando radicales libres que contribuyen a la formación de hidrógeno. Los elementos radioactivos se encuentran mayormente en rocas basálticas, y la radiólisis puede tener lugar en condiciones de temperatura y presión estables donde el agua está presente (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

La radiólisis del agua consta de varias etapas. En primer lugar, se produce una ionización inicial cuando la radiación impacta las moléculas de agua, generando especies altamente reactivas. Estas especies se excitan a un estado energético superior y, finalmente, las moléculas excitadas se disocian para dar lugar a la formación de radicales de hidrógeno y radicales hidroxilos, como se ilustra en las siguientes reacciones (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).



La generación de hidrógeno a través de la radiólisis está influenciada por varios factores críticos. La cantidad de hidrógeno producida está directamente vinculada a la concentración de elementos radiactivos presentes en las rocas, como uranio, torio y potasio. Una mayor concentración de estos elementos aumenta la intensidad de la radiación, lo que favorece la ocurrencia de más reacciones de radiólisis. Además, la composición química del agua desempeña un papel crucial, ya que los fluidos con altos niveles de aniones (como cloruros) y cationes (como sodio y potasio) pueden influir en las reacciones de radiólisis, estimulando la formación de radicales libres y, por tanto, la producción de hidrógeno (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

Figura 6 Descripción de la disociación del agua.

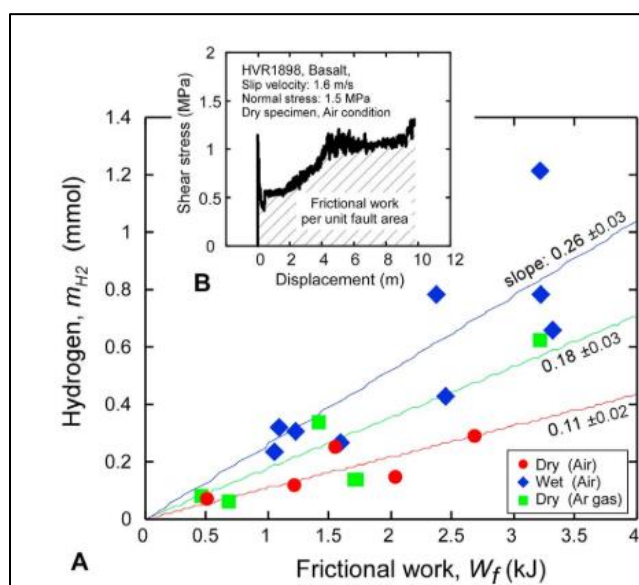


(Wang, Zhijun, & Chen, 2023)

4.1.8 Generación de Hidrógeno a través del Fracturamiento de Rocas durante Eventos Sísmicos

Investigaciones previas han demostrado que la trituración de rocas o los movimientos mecánicos en presencia de agua pueden producir hidrógeno durante eventos sísmicos. Como se muestra en la **Figura 7** (Hirose, Kawagucci, & Suzuki, 2011).

Figura 7 Producción de hidrógeno en moléculas en relación con la energía de fricción.



(Morante, Andreu, García, Guilera, & Tarancón, 2020)

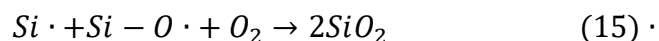
El experimento se evaluó con alta velocidad de fricción en muestras de basalto secas y húmedas, deslizándose a 1,6 m/s recorriendo 10 m bajo atmósferas de aire o gas argón (Hirose, Kawagucci, & Suzuki, 2011).

Durante el proceso de fricción, los minerales con enlaces Si-O se dispersan, resultando en la formación de radicales Si• y Si-O•. Este experimento se realizó en un entorno con aire húmedo, lo que permitió que el vapor de agua y el oxígeno reaccionaran con los radicales generados por la fricción para formar SiOH y SiO₂, como se ilustra en la **Figura 7**. En este proceso de formación de compuestos, también se generan simultáneamente radicales H•. La combinación de dos

radicales $H\cdot$ puede dar lugar a la producción de hidrógeno molecular (H_2). Esta reacción se genera en un rango de temperatura inferior aproximadamente de $200^\circ C$ (Hirose, Kawagucci, & Suzuki, 2011).

La generación de hidrógeno a partir del fracturamiento de rocas está íntimamente ligada a varios factores:

Se ha calculado que solo el 1% de la energía total producida por la desintegración radiactiva es captada por el agua que se encuentra en los poros. La otra parte de esta energía es capturada por la estructura mineral y se transforma en calor. Por lo tanto, la generación de H_2 está íntimamente ligada a la cantidad de agua presente en los poros de la roca. Sin embargo, la eficacia de estos procesos para generar hidrógeno no está clara (KITA & MATSUO , 1982) (Wang, Zhijun, & Chen, 2023). Este proceso de reacción tiene la capacidad de generar elementos oxidados como el oxígeno y el peróxido al mismo tiempo, sin embargo, no se discute qué sucede con el exceso de oxígeno que se produce cuando el agua reacciona con los radicales (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).



4.1.9 Generación de Hidrógeno por termogénesis y fermentación geotérmica

Se plantea la hipótesis de que la generación de hidrógeno podría estar relacionada con procesos orgánicos, surgiendo como un subproducto de reacciones por termogénesis. (Hanson & Hanson, 2024) Este fenómeno se explica en el contexto del método convencional de generación de

hidrocarburos, donde se postula que el hidrógeno se produce durante la diagénesis a través de la acción microbiana. Este proceso implica la maduración térmica de la materia orgánica a temperaturas cercanas a 200 °C y presiones que oscilan entre 1 y 2000 bares, lo que corresponde a profundidades de entre 0 y 10 km (Araujo, 2016).

Investigaciones relevantes sugieren que se lleva a cabo una reacción de fermentación en la que las bacterias utilizan la forma oxidada de la materia orgánica, principalmente los carbohidratos, como fuente de energía. Este proceso puede ser catalizado por bacterias o por sulfato-reducción, generando ácido acético, así como otros productos como H₂, CO₂ y CH₄ (Araujo, 2016).

Estudios previos han identificado que, a temperaturas superiores a 80°C, se produce la descomposición de los ácidos mediante reacciones como la descarboxilación, que conlleva a la generación de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) debido a la pérdida de un grupo carboxilo (reacción 16). Por otro lado, la oxidación genera dióxido de carbono y agua en presencia de oxígeno, aunque en acuíferos profundos con baja disponibilidad de oxígeno, se cree que el agua en el medio proporciona el oxígeno necesario para este proceso (reacción 18) (**Figura 8**) (Araujo, 2016).

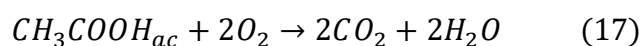
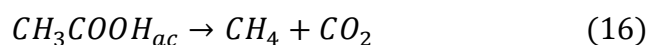
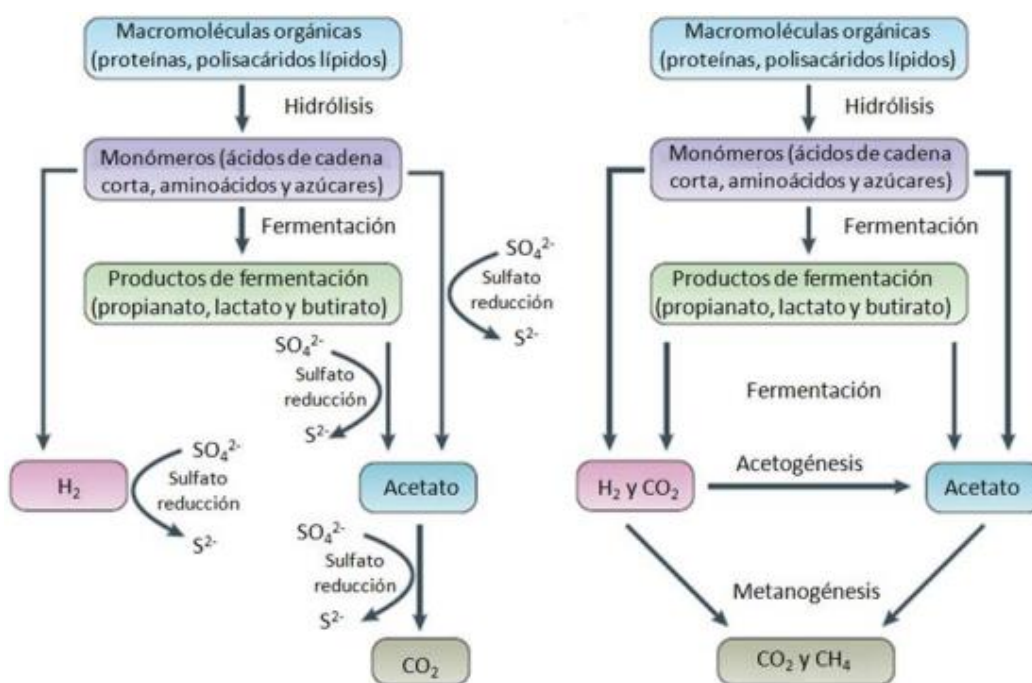


Figura 9 Esquema de la degradación microbiana de la materia orgánica en ambientes anóxicos en la presencia y ausencia de sulfato. Zona (a) ocurre como consecuencia de la presencia de bacterias sulfato reductoras y (b) a bacterias fermentativas o metanogénicas (Araujo, 2016)

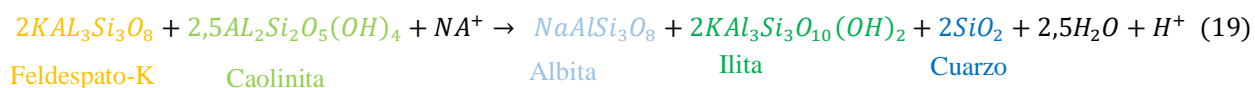


La reducción microbiana del sulfato implica el uso del oxígeno del sulfato para reducir el azufre a S²⁻ en condiciones anaeróbicas. Este proceso, generalmente ocurre en la interfaz agua-sedimento (Araujo, 2016).

La reducción microbiana del sulfato es más común a temperaturas bajas, inferiores a los 80°C, lo que favorece el desarrollo bacteriano. Es importante destacar que la mayor parte del H₂S generado por esta reducción durante la deposición de los sedimentos o en etapas diagenéticas

tempranas se convierte rápidamente en otras formas de azufre. Esto puede ser producto de la reacción con la materia orgánica o con metales para formar sulfuros, como la pirita (FeS₂) (Araujo, 2016).

el del hidrógeno también se observa en la descomposición temprana de kerógenos inestables de cadena larga, creando ácidos húmicos y fúlvicos que protonan las aguas de los poros y reducen el pH. El hidrógeno presente en esta etapa se encuentra en forma de varios tipos de complejos de hidronio. Por ejemplo, BjØrlykke (1998) y Franks y Zwingmann (2010) señalan que la diagénesis del feldespato potásico en los yacimientos de arenisca causada por el aumento de la temperatura por soterramiento, promueve un proceso conocido como illitización, en el cual dicho mineral es transformado en caolinita y luego a illita, siendo la primera arcilla un producto inestable formado durante la diagénesis temprana, que será convertido posteriormente en illita, Estos autores, describen el proceso anterior mediante la reacción 19 estas reacciones se favorecen en los yacimientos de areniscas a profundidades cercanas a los 4 Km correspondientes a un intervalo de temperatura entre 120- 140°C (Araujo, 2016) (Marfil & Caja, 2010).



La reacción, es catalizada por arcillas durante la conversión a illita. Aquí se cree que el hidronio se expulsa de la red mineral arcillosa durante el reordenamiento cristalino

. La protonación de los fluidos de los poros inicia el proceso al aumentar el desarrollo de iones carbono entre las capas minerales arcillosas. Este mecanismo se propaga en una reacción en cadena

y termina con la liberación del ion hidronio nuevamente al fluido del poro (Hanson & Hanson, 2024).

La estructura de nanoporos de las arcillas combinada con los complejos de hidronio actúan para almacenar hidrógeno libre e hidrocarburos de cadena más corta en pequeños volúmenes (Hanson & Hanson, 2024).

. El hidrógeno libre, al ser diatómico, tiene una baja reactividad con los minerales de roca, cemento y agua presentes a esas profundidades de generación. Se espera que la concentración de hidrógeno aumente gradualmente mientras que los volúmenes de gases secos disminuyan a medida que se incrementa la temperatura y se produce más hidrógeno. Aún no se sabe si el hidrógeno y el metano se separarán en fracciones en lugar de permanecer mezclados, ya que el hidrógeno es soluble en hidrocarburos (Hanson & Hanson, 2024).

4.2 Ocurrencia del Hidrógeno Natural

La génesis del hidrógeno natural es un proceso complejo que puede involucrar múltiples mecanismos. Los procesos biológicos, como la división de materia orgánica y los procesos fermentativos, pueden contribuir a la producción de hidrógeno natural. Por otro lado, los procesos abióticos también juegan un papel importante en la formación de este gas.

En cuanto a las filtraciones superficiales de hidrógeno, estas suelen ocurrir en zonas donde el subsuelo es muy antiguo y contiene una alta concentración de metales. Estas condiciones geológicas favorecen la liberación y acumulación de hidrógeno en la superficie.

Es fundamental comprender que el hidrógeno natural no se trata de un recurso fósil acumulado, sino más bien de un flujo continuo de H_2 que puede ser generado por diversos procesos geológicos. La combinación de factores biológicos y abióticos en entornos geológicos específicos

puede dar lugar a la formación y presencia de hidrógeno natural en la naturaleza (Roger, Bach, & Bobadilla, 2024).

Figura 10 *Diferentes hipótesis sobre el origen de los depósitos naturales de hidrógeno*



(Roger, Bach, & Bobadilla, 2024)

4.2.1 Hidrógeno libre

El hidrógeno natural se encuentra en diversas formas en la Tierra, una de ellas es el hidrógeno libre que se desplaza a través de los poros o grietas de las rocas. Este hidrógeno puede ser liberado por las fracturas causadas por sismos o terremotos. La cantidad de hidrógeno libre presente puede variar en función de los entornos geológicos, las áreas de generación y las profundidades de detección. Se han registrado niveles de hidrógeno libre que van desde valores mínimos de un solo dígito hasta concentraciones superiores al 95%, como en el caso del pozo al

norte de Bamako, donde se encontró un 98% de H₂. Otro ejemplo es el gas de ventilación, que contiene entre un 7,5% y un 11,3% de hidrógeno (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

4.2.2 Hidrógeno en inclusión y adsorción

El hidrógeno natural puede quedar retenido en diferentes tipos de rocas, ya sea como inclusiones o producto de adsorción. Los minerales de la zona del rift contienen inclusiones de gas con un alto contenido de hidrógeno del 21,4%. Este fenómeno también se ha observado en diversas investigaciones, donde se ha encontrado que una fracción del hidrógeno generado por radiolisis ha sido capturada por minerales como la arcilla en depósitos geológicos. Un ejemplo de esto es un depósito de uranio al norte de Saskatchewan, Canadá, donde la clorita es el principal mineral responsable de la adsorción del hidrógeno. Además, se ha estudiado que la porosidad de la roca en un medio acuoso juega un papel importante en la liberación del hidrógeno (Wang, Zhijun, & Chen, 2023).

4.3 Entrampamiento del hidrógeno natural.

Las propiedades químicas y de difusión del hidrogeno es una limitación para su hallazgo en la superficie terrestre. al ser el elemento más ligero de todos los gases, se difunde rápidamente en el aire, pero también en diferentes materiales. Por lo tanto, abandona rápidamente el lugar de su generación y no puede ser retenido en trampas geológicas por largos períodos de tiempo.

Numerosos estudios han confirmado que el hidrógeno se desplaza a través de la corteza terrestre hasta alcanzar la superficie. Estos estudios también han revelado que el flujo de hidrógeno a través de medios porosos saturados de agua marina disminuye en un factor de diez en comparación con su flujo a través de agua pura. Este retraso en la difusión del hidrógeno en sedimentos saturados de agua podría estar relacionado con los radios de Vander Waals, que

determinan la distancia a la cual las fuerzas intermoleculares se vuelven efectivas (Roger, Bach, & Bobadilla, 2024). Los investigadores señalan que el hidrógeno molecular y ciertos gases nobles comparten radios similares, lo que resulta en propiedades de migración similares en medios porosos. Por lo tanto, la migración del hidrógeno podría verse obstaculizada por trampas y acuíferos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el radio de Vander Waals de la molécula de hidrógeno varía según la presión y la presencia de otras moléculas (Roger, Bach, & Bobadilla, 2024).

De hecho, estudios afirman que, La interacción del hidrógeno con las rocas puede generar porosidad, ya que los productos de estas reacciones, como el agua y compuestos solubles móviles, tienden a desplazarse lejos de la zona de reacción. La porosidad originada por el flujo de hidrógeno a través de la roca mejorada promoverá la formación de más porosidad en forma de un canal preferencial para la migración del hidrógeno. En resumen, a mayor cantidad de hidrógeno, mayor porosidad se creará. Esto resultará en una concentración del flujo inicialmente difundido en "corrientes" o penachos verticales. De ahí, la filtración del hidrogeno (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020).

4.4 Explotación del hidrógeno natural.

A pesar del potencial demostrado del hidrógeno natural, todavía existen limitaciones y desconocimiento en cuanto a la disponibilidad de tecnologías para extraer hidrógeno geológico a gran escala. Esto se debe a que el hidrógeno es una molécula extremadamente reactiva y pequeña, lo que puede provocar migración y fugas durante la perforación del pozo. Sin embargo, estudios recientes sugieren que la extracción de hidrógeno natural podría lograrse mediante tecnologías adaptables que usan en la extracción de gas natural, como el uso de plataformas de perforación

para penetrar las capas de roca y tuberías para facilitar el proceso. Estos estudios también recomiendan el uso de lodo circulante para controlar la presión y temperatura durante la perforación. Para abordar las implicaciones relacionadas con la migración del gas, se ha propuesto recubrir las tuberías con concreto para evitar fugas y garantizar la integridad del sistema (BLay-Roger, Bach, Bobadilla, & Ramírez Reina, 2024).

Eric Gaucher, un geoquímico de la Universidad de Berna, opina que los investigadores de hidrógeno natural deberían enfocarse en las acumulaciones poco profundas que se encuentran debajo de capas impermeables a menos de un kilómetro o dos de la superficie. Gaucher propone que, si las rocas generadoras son accesibles, sería factible extraer hidrógeno directamente de ellas, siguiendo un proceso similar a la extracción de petróleo del esquisto fracturado. Asimismo, plantea la opción de inyectar agua en las rocas ricas en hierro para estimular la producción de hidrógeno (Yacimientos de hidrógeno natural y renovable.).

El pozo hallado en Mali estuvo en operación durante 4 años sin registrar ninguna disminución en la presión desde su nivel inicial de alrededor de 4 bares. En ese instante, se realizó un estudio con los sensores de hidrógeno en la superficie por lo cual, no detecto fugas, lo que lleva a la conclusión de que, a pesar de las expectativas basadas en el tamaño y la reactividad química del hidrógeno, existen rocas sellantes que posibilitan la acumulación de este gas. Esto sugiere que el hidrógeno puede mantenerse en estado gaseoso bajo la capa terrestre (Moretti, 2019).

5. Características Superficiales en la Generación de Hidrógeno Natural.

5.1 Muestreo de Gases en Superficie

La selección de sitios estratégicos para el muestreo de gases en la superficie se basa en datos geológicos y geoquímicos que indican la posible migración de gases desde el subsuelo. La movilidad del hidrógeno y su potencial migración vertical pueden resultar en filtraciones en la superficie, detectables de forma directa o indirecta, a veces manifestándose en rasgos topográficos como fracturas, fallas, o depresiones circulares.

Para evaluar con precisión la emanación de hidrógeno, es esencial tomar muestras de estratos debajo de cualquier zona de actividad biológica elevada, que generalmente se concentran en la capa superior del suelo, con el fin de que las muestras no sean contaminadas por el ambiente exterior (Langhi & Strand, 2023).

Una técnica convencional para el muestreo puntual de gases en el suelo implica la perforación del suelo, donde algunos expertos recomiendan el uso de la perforación por percusión en lugar de la rotatoria para evitar la generación de hidrógeno por calentamiento y craqueo de la materia orgánica. Posteriormente, se conecta un analizador de gas portátil para medir el hidrógeno a una profundidad de entre 80 y 120 cm. Aunque, Se han realizado mediciones de campo exitosas de la concentración de hidrógeno en suelos a profundidades de 10 hasta 240 cm (Langhi & Strand, 2023).

Un estudio realizado en una cuenca brasileña, se evaluó el contenido puntual de hidrógeno utilizando un analizador de gas portátil (GA5000© de Geotech Comp). Los análisis se llevaron a cabo en una cuadrícula dispersa, cruzando la depresión, en suelos muestreados a una profundidad de 1 m mediante un tubo de cobre insertado en el suelo y bombeando aire a través del analizador durante ciclos de 1 minuto (Prinzhofer, Moretti, & Francolin, 2018).

5.2 Filtraciones de Hidrógeno Natural.

El estudio de las filtraciones de hidrógeno en el subsuelo plantea interrogantes sobre la posibilidad de retener este gas en formaciones geológicas por largos periodos de tiempo. Las rocas, como las evaporitas, pueden capturar volúmenes de hidrógeno en el subsuelo, pero la alta difusividad y reactividad del hidrógeno hacen que su preservación en rocas sea problemática en escalas geológicas. A pesar de esto, se ha manifestado la presencia de hidrógeno y filtraciones continuas en superficies que se caracterizan por la formación de "círculos de hadas" brillantes a gran escala. Estas manifestaciones se han observado en diversas ubicaciones geográficas, como Rusia, Mali y Estados Unidos, donde se han detectado concentraciones significativas de hidrógeno en suelos (Prinzhofer, Moretti, & Francolin, 2018).

5.3 Depresiones sub-circulares por Hidrógeno “Círculos de Hadas”

En medio de la vasta extensión de la tierra, se encuentran fenómenos misteriosos y sorprendentes que desafían nuestra comprensión. Uno de estos enigmas fascinantes son los círculos de hadas, formaciones sub-circulares que han capturado la atención de la comunidad científica, generando intensos debates e investigaciones.

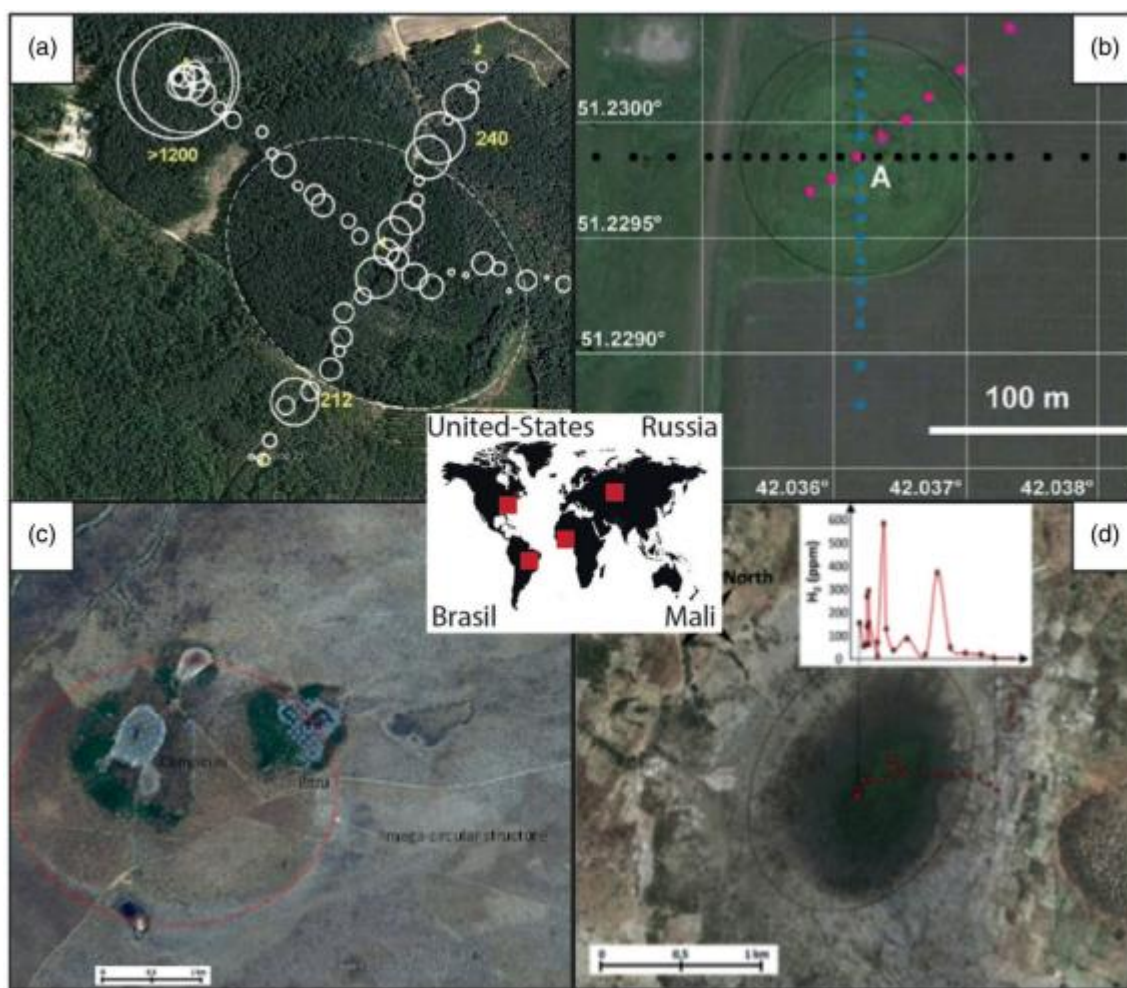
Estos misteriosos círculos de hadas, caracterizados por depresiones en la superficie con forma sub-circular, han revelado secretos ocultos bajo la tierra como la presencia de hidrógeno emanando de estas misteriosas formaciones. Se postula que la génesis de las depresiones en la pueden formarse debido a colapsos causados por cambios en las rocas a lo largo de las rutas por donde se desplaza el hidrógeno. Cuando el hidrógeno interactúa con las rocas, puede producir

ácido que las disuelve mientras se mueve hacia arriba a través del gas. Esto crea un camino vertical preferido para que el gas se desplace, lo que puede contribuir a la formación de depresiones en la superficie terrestre (Langhi & Strand, 2023).

La existencia de estas depresiones está relacionada con alteraciones en la vegetación y el suelo que las rodea. En ocasiones, la vegetación es escasa o incluso inexistente dentro de la depresión, y el suelo puede presentar decoloración debido a las emisiones de hidrógeno. En los bordes de las depresiones, es posible observar áreas con una vegetación más densa o alta, lo que crea un contraste notable en el paisaje circundante (Langhi & Strand, 2023).

Los enigmáticos círculos de hadas varían en su formación y tamaño, desde unos pocos metros hasta varios kilómetros de diámetro. Estudios de modelado han demostrado que el tamaño de la estructura está vinculado al tiempo que el hidrógeno permanece en el suelo, lo cual depende de factores como la permeabilidad del suelo, la profundidad del punto de fuga del gas y la presión de la burbuja (Langhi & Strand, 2023).

Figura 11 *Círculos de hadas con presencia de filtraciones de hidrogeno natural en diferentes lugares*

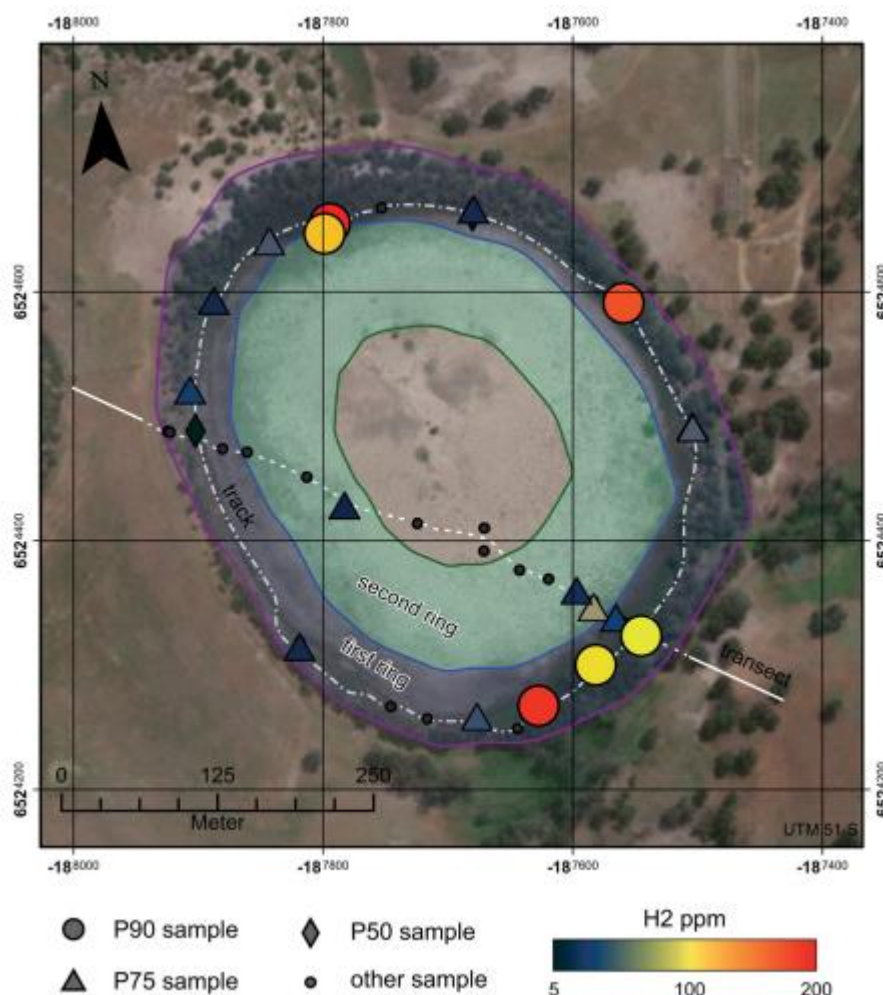


(Langhi & Strand, 2023).

Se ha observado que la distribución de la concentración de hidrógeno dentro de las estructuras circulares no es uniforme, con concentraciones más altas en las regiones del borde y concentraciones cercanas a cero en el centro. Esta variación espacial en la concentración de hidrógeno se atribuye al aumento del flujo de hidrógeno en áreas de alta permeabilidad. Un estudio de gases en el suelo realizado en un círculo de hadas encontrado en el lago Beermullah analizó las concentraciones de hidrógeno. Los resultados mostraron que las muestras P90, que presentaban

los valores más altos de concentración de hidrógeno, estaban principalmente ubicados cerca del borde de la depresión, en el primer anillo (como se muestra en la **Figura 12**). Por otro lado, las muestras P75 y P50, con valores de concentración de hidrógeno superiores al 75% y 50% de la población de la muestra respectivamente, se encontraban tanto en el primer como en el segundo anillo (Langhi & Strand, 2023).

Figura 12 Concentración de hidrógeno en el círculo de hadas cerca del lago Beermullah



(Langhi & Strand, 2023).

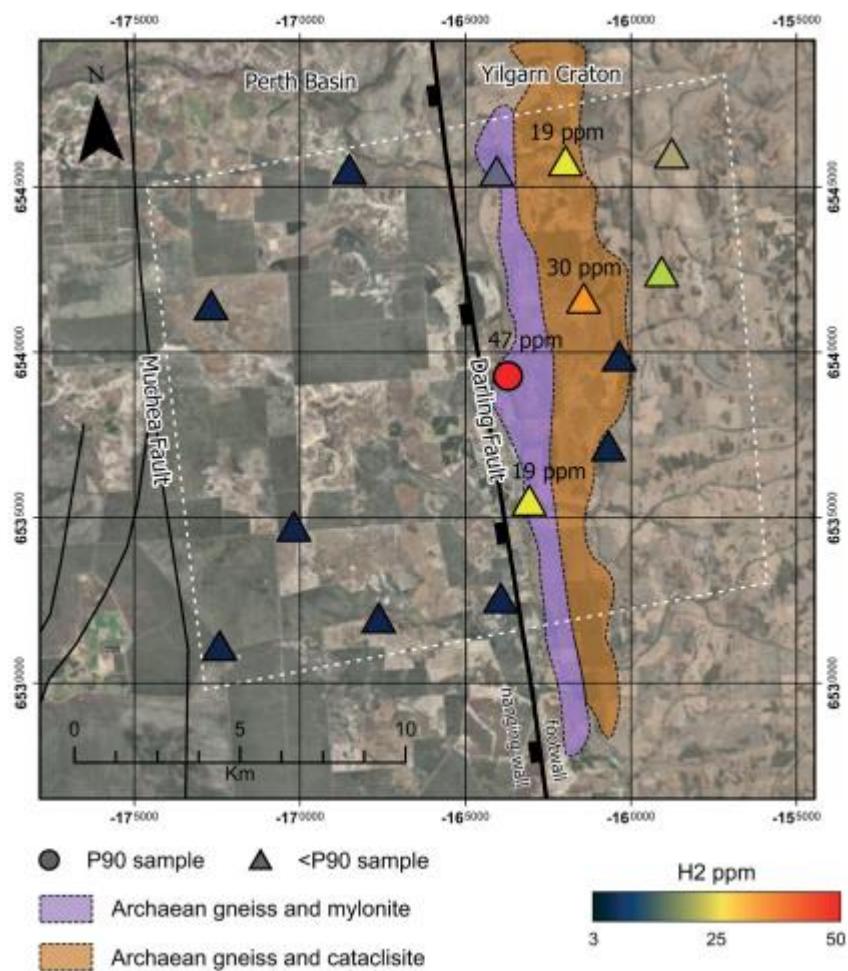
5.4 Hidrógeno y Zonas de Falla.

Las zonas de falla, conocidas por su papel en la geodinámica terrestre, también desempeñan un papel crucial en la migración y concentración de gas hidrógeno. Los datos disponibles sugieren que las zonas de falla pueden actuar como vías para la migración de hidrógeno desde fuentes profundas o a través de reacciones in situ en la propia zona de falla (Langhi & Strand, 2023).

Se ha registrado la presencia de hidrógeno en áreas de fallas geológicas en diferentes partes del mundo, como Australia Occidental, el Rift de África Oriental y los Pirineos. Las investigaciones han evidenciado que las concentraciones de hidrógeno están vinculadas con la presencia y actividad de las fallas, siendo más altas en aquellas que han mostrado actividad histórica en comparación con las inactivas. Experimentos de laboratorio han demostrado que la interacción entre el agua y las superficies minerales expuestas durante las fallas puede generar hidrógeno (Langhi & Strand, 2023).

Al igual que en el círculo de hadas cerca del lago Beermullah. Se realizó un estudio similar en una zona de falla en Australia occidental para evaluar la distribución del hidrógeno y determinar el potencial de filtración natural. Los datos muestran que la concentración más alta de hidrógeno (P90, 47 ppm) se encontró en muestras ubicadas cerca del núcleo de la falla (<1000 m) (Langhi & Strand, 2023).

Figura 13 Concentración de hidrógeno alrededor de la falla Darling, Australia occidental

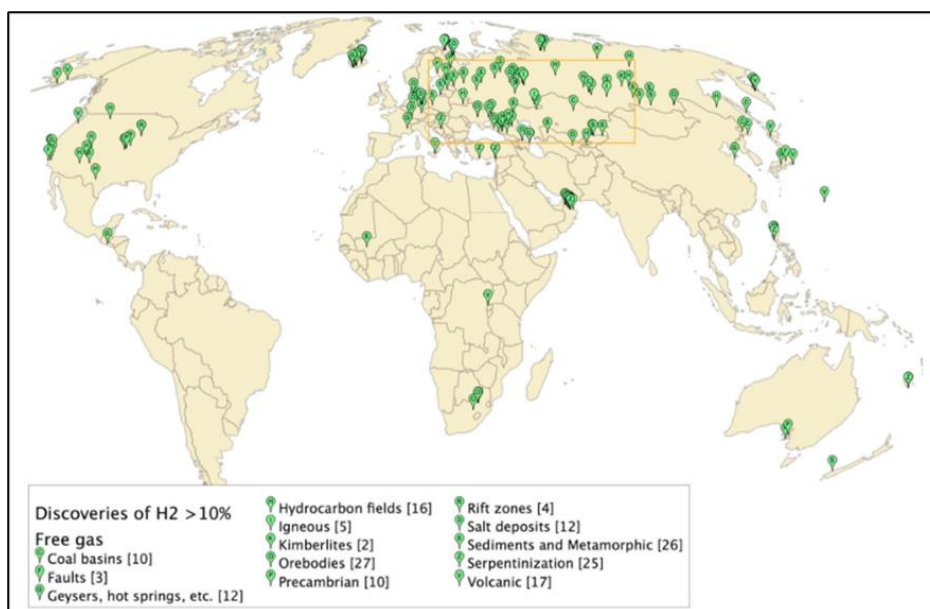


(Langhi & Strand, 2023).

6. Reservas de hidrógeno a nivel global

Durante años, el hidrógeno ha sido subestimado debido a su baja concentración y a las limitaciones tecnológicas para su detección. Sin embargo, la abundancia de estudios e investigaciones publicadas sugiere que los hallazgos de hidrógeno son más significativos de lo que se creía inicialmente. Estas bases de datos desempeñan un papel crucial como herramienta diagnóstica en la comprensión de los procesos geológicos. A nivel mundial, existen bases de datos que registran más de 103.000 muestras de gas, aunque solo una fracción de ellas muestra concentraciones superiores al 10% de hidrógeno natural. **Figura 14** **Figura 14** ilustra la ubicación de los hallazgos de hidrógeno libre con concentraciones mayores al 10% (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

Figura 14 *Mapa de detecciones de hidrógeno en diversos ambientes en concentraciones >10%vol*



(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020)

6.1. Yacimientos Asociados a Ofiolíticas.

Las ofiolíticas, son complejos de rocas que se forman en el fondo del océano a partir del enfriamiento y solidificación del magma, son una asociación de las rocas ultramáficas, maficas y maficos. Las ofiolitas han recibido mucha atención por parte de los científicos porque el hidrógeno de estos lugares se atribuye al proceso de serpentización (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020).

El manto se acerca a la superficie en las zonas de rift, pero éstas se encuentran principalmente debajo de los océanos. Lugares raros, pero más accesibles, son los cinturones de ofiolitas, donde la corteza oceánica con el manto subyacente se eleva y queda expuesta sobre el nivel del mar. la **Tabla 2** resume las ubicaciones documentadas de filtraciones de gas rico en hidrógeno asociadas con afloramientos ofiolíticos (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

Tabla 2 Yacimientos asociados a Ofiolíticas

% H ₂	Pozo	País
7,5–11,3	Quimera, 11.3	Pavo
15,7	EE.UU	Austin Creek, 15,7
35,1	Filipinas	Mangatarem, 35,1
26,8–36,1	Nueva Caledonia	Kaoris, 32,9; Carenaje, 36,1
34–39,2	EE.UU	Barnes Primavera, 39,2
41,4–44,5	Filipinas	Los Fuegos Eternos,
41,4–45,6	Filipinas	monte Lanat
48,3	bosnia y herzegovina	Vaiceva voda
50,9	EE.UU	Campamento Primavera
58,5	Filipinas	Nagsasa
37,1–60,5	Pavo	Kurtbagi, Tahtakopru,
39–69	Omán	Howqain, 69 años
85,9	Omán	Hawasina
87,3	Omán	Magniyat
81–97	Omán	Bahala
22–99	Omán	Nizwa, 99 años

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020)

6.2. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados con Zonas de Rift

Los científicos han dirigido su atención hacia áreas como las zonas de rift, que son regiones de la corteza terrestre donde se forman grietas o fallas debido a la interacción de dos placas tectónicas. Estas áreas suelen contener gases reducidos que pueden reaccionar con el oxígeno. Se ha observado que los minerales presentes en estas zonas contienen inclusiones de gas con un alto contenido de hidrógeno. En la **Tabla 3** se presentan los hallazgos de hidrógeno asociados con zonas de rift (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

Tabla 3 Descubrimientos de hidrógeno asociados con Zonas de Rift

% H2	País	Pozo
33,7	Willey #1	EE.UU
57,3	Geotérmico en Namafjall	Islandia
64,0	Namaskard	Islandia
96,3	Hofmann #3	EE.UU

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020)

6.3. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Rocas Precámbricas.

Numerosos hallazgos de hidrógeno se han vinculado con rocas que datan de la era precámbrica como se muestra en la **Tabla 4**. Durante la perforación de un pozo en el sur de Australia, se detectó una de las concentraciones más elevadas de hidrógeno (84%) en gases liberados extraídos de muestras de rocas precámbricas profundas (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020).

Tabla 4 Descubrimientos de hidrógeno asociados a rocas precámbricas.

% H2	Pozo	País
12,8	Juuka	Finlandia
17,2	Pozo Wilson	EE.UU
3,9–27,3	Pechengskaya, 27,3	ruso
30,4	Porí, 30,4	Finlandia
34,9	Pechenegskaya, 34,9	ruso
56	Scott bien, 56	EE.UU
84	Penneshaw, 68,6	Australia
91,8	Está bien, 80	EE.UU

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020)

6.4. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Rocas Ígneas

El descubrimiento de hidrógeno en los pozos superprofundos de Kola y Ural ha sido un hallazgo significativo en el campo de la geología. Estos pozos, que alcanzan profundidades extremas en la corteza terrestre, han revelado la presencia de hidrógeno en asociación con rocas ígneas.

Los investigadores responsables de estos estudios han propuesto que los bajos niveles de hidrógeno encontrados podrían estar relacionados con la alta permeabilidad en las capas profundas. La capacidad de la roca para permitir el paso de fluidos a través de él es bajo debido a los acuíferos y en este caso, podría influir en la distribución y concentración del hidrógeno en las rocas subterráneas. En la **Tabla 5** se evidencian la concentración de hidrógeno asociados con las rocas subterráneas ígneas (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020).

Tabla 5 Descubrimientos de hidrógeno asociados a rocas ígneas

% H ₂	Pozo	País
20,6	Kola superprofunda, 20.6	Federación Rusa
35,1–38,2	Tubinsky	Federación Rusa
50	Ural superprofundo, >50	Federación Rusa
80,4	Iriklinskoe, 80,4	Federación Rusa
80,5	Nizhni Taguil, 80,5	Federación Rusa

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020)

6.5 Hidrógeno en gases de géiseres, fuentes termales, volcanes de lodo y filtraciones independientes.

En Islandia, el hidrógeno es un elemento principal en todas las muestras de gas natural y se encuentra en altas concentraciones en géiseres y sistemas hidrotermales asociados con la

actividad volcánica. El hidrógeno es una de las emisiones volcánicas más comunes, solo superado por el agua y el CO₂. La explicación actual sobre su presencia se basa en la composición de la lava, ya que los gases presentes están en equilibrio térmico con la roca fundida. Se espera que una concentración del 1% de H₂ se alcance a temperaturas de equilibrio cercanas a los 500 °C.

No obstante, tal como se evidencia en los datos presentados en las **Tablas 6**, las cantidades de hidrógeno presentes en los gases volcánicos y en los sistemas hidrotermales pueden superar significativamente las concentraciones teóricas de equilibrio del agua. Esto puede ser porque puede haber otras fuentes de generación (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020).

Tabla 6 *Hidrógeno en gases de géiseres, fuentes termales, volcanes de lodo y filtraciones independientes.*

% H ₂	Pozo	País
2,4–12,5	Termas de Jimo	Porcelana
14,1	Les Tiogaux	Francia
14,7	Sonoma	California, EE.UU
15,4	Baladzhary,	Azerbaiyán
22,2	Torfajökull,	Islandia
24,1	Namafjall, 24.1	Islandia
9–36	Kerlingarfjöll, 36	Islandia
10–40	Ahuachapán, 40	El Salvador
46,4	Nesjavellir, 46,4	Islandia
51,4	Arima, 51,4	Japón

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020)

6.6 Descubrimientos de Hidrógeno en Muestras de Agua.

Las mediciones de hidrógeno disuelto en aguas subterráneas se proponen como una herramienta efectiva para monitorear la contaminación de acuíferos poco profundos por

vertederos, disolventes y combustible para aviones. El hidrógeno funciona como un indicador redox y muestra una compensación positiva con las zonas contaminadas. En la **Tabla 7** se exhiben los resultados de las detecciones de hidrógeno en muestras de agua. Dos estudios indican que el agua subterránea cercana a campos petrolíferos presenta niveles más elevados de hidrógeno. que el agua subterránea muestreada cerca de depósitos de gas natural (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

Tabla 7 Descubrimientos de hidrógeno en muestras de agua.

% H ₂	Pozos	País
0,05–10,3	Driefontein, 10.3	Sudáfrica
3,3–11,5	Mponeng, 11,5	Sudáfrica
15,73	Petrushinskaya, 15,7	Federación Rusa
2–17	Pochep, 17 años	Federación Rusa
23,3-25	Sokolovaya Gora, 25 años	Federación Rusa
36,3	Sahaidakske, 36 años	Ucrania
1,7–37,7	Henicheska, 37,7	Ucrania
34,7	Furmanóvskaya, 34,7	Federación Rusa
47,5	Sherbakovskaya, 47,5	Federación Rusa
41,5	Zhirnovskaya, 49,1	Federación Rusa

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020)

6.7 Descubrimientos de Hidrógeno Asociados con Campos de Petróleo y Gas.

El hidrógeno es un gas natural que se encuentra comúnmente en la exploración de petróleo y gas natural. Se ha observado que está presente en toda la sección sedimentaria, con valores máximos que suelen correlacionarse con los picos máximos de hidrocarburos. Esta relación entre

el hidrógeno y los hidrocarburos sugiere una posible asociación en la formación y acumulación de estos recursos energéticos (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

El estudio muestra que el agua subterránea cerca de los campos de petróleo y gas tiene más hidrógeno disuelto que la que está directamente en contacto con estos campos. Esto sugiere que el hidrógeno reacciona con material que contiene carbono, lo que explica por qué las concentraciones de hidrógeno disminuyen cerca de los depósitos de petróleo y gas. En presencia de compuestos que contienen carbono, el hidrógeno los reducirá y los convertirá en hidrocarburos. En la **Tabla 8** se muestran los yacimientos de hidrogeno asociados con petróleo y gas (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

Tabla 8 Descubrimientos de hidrógeno asociados con campos de petróleo y gas.

% H ₂	Pozo	País
"6-10"	Lenno-Viluisk, 10	Federación Rusa
11	Moiseevskaya, 11 años	Federación Rusa
11,5	Navajo, 11,5	EE.UU
12,7	Shor-Su, 12,7	Uzbekistán
14,7	Abseron, 14.7	Azerbaiyán
17,9	Jeffers, 17,9	EE.UU
19,5	Cascada, 19,5	EE.UU
20,4	Hortenstein, 20,4	EE.UU
20,8	Koksher, 20,8	Estonia
26,3	Punto de caballo, 26,3	EE.UU
27,3	Stávropol, 27,3	Federación Rusa
27,3	Verhne-Bureinsk, 27,3	Federación Rusa
30	Iki Burul, 30 años	Federación Rusa
40	Márkovskoe, 40 años	Federación Rusa
47,3	Severnaya, 47,3	Federación Rusa
52,5–95,2	Yélskaya, 95,2	Bielorrusia

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020)

6.8. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Cuencas de Carbón

Además de encontrarse asociado a campos de petróleo y gas, el hidrógeno también se ha detectado en cantidades significativas en las cuencas de carbón en numerosos sitios mineros donde se han realizado exploraciones de hierro, oro, uranio, mercurio, níquel, cobre y minerales polimetálicos como niobio-tantalio y tungsteno-molibdeno, se han reportado casos de presencia de hidrógeno de origen natural. Aunque el volumen de gas muestreado ha variado hasta en 7 órdenes de magnitud, las concentraciones promedio han mostrado ser muy similares (Zgonnik, *The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review*, 2020).

Tabla 9 *Descubrimientos de hidrógeno asociados a cuencas de carbón*

% H ₂	Pozo	País
10	Karagandinsky, 10	Kazajstán
18,4	Kuznetski, 18,4	Federación Rusa
20	Leninsk-Kuznetsky, 20	Federación Rusa
10,9–21	Luganska, 23	Ucrania
21.2–27	Uglovski, 27 a	Federación Rusa
40	Donetsky, 40	Ucrania
87,2	Berzassk, 87	Federación Rusa
95,4	Kayerkán, 95,4	Federación Rusa

(Zgonnik, *The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review*, 2020)

6.9. Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Fallas

Diversas investigaciones han evidenciado la relación del hidrógeno con las fallas geológicas, ya que estas representan una vía natural para los fluidos. En Japón, se llevaron a cabo los primeros experimentos que demostraron una fuerte correlación entre las concentraciones de hidrógeno y la actividad de las fallas. El muestreo geoquímico se ha utilizado para mapear fallas

asociadas con depósitos minerales en los sistemas de fallas Trans-Challis de Idaho y la tendencia Carlin en Nevada. También, Se ha utilizado el monitoreo tanto del hidrógeno como del radón para detectar eventos geodinámicos a escala planetaria. En la **Tabla 10** se muestran algunos (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

Tabla 10 *Descubrimientos de hidrógeno asociados a fallas*

% H2	Pozo	País
9,4	Átera, 9,4	Japón
13,3	SAFOD, 13.3	EE.UU
70	burro, 70	EE.UU

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020)

6.10 Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Rocas Sedimentarias.

Se han reportado varios descubrimientos de hidrógeno en rocas sedimentarias, lo cual no es sorprendente considerando que las cuencas sedimentarias cubren aproximadamente la mitad de la superficie terrestre y han sido investigadas minuciosamente en busca de hidrocarburos. Se ha sugerido que el hidrógeno está presente en casi todas las muestras de gas provenientes de sedimentos; sin embargo, se requieren circunstancias especiales para que se acumule y alcance niveles altos. Algunos ejemplos se muestran en la **Tabla 11** (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive, 2020).

Tabla 11 *Descubrimientos de hidrógeno asociados a rocas sedimentarias.*

% H2	Pozo	País
4.2–10.7	Novo-Usensk, 10,7	Ruso
13,6	Sukhoi Hrebet, 13,6	Federación
16,6	Frunzenskaya, 16,6	Ruso

18,6	Mamáyka, 18,6	Kirguistán
18,9	Bernalillo, 18,9	EE.UU
20	Serafímovskaya, 20 años	Kirguistán
7.3–21.2	Alambek, 21,2	Uzbekistán
26,7	Bauská, 26,7	Letoni
13,8–28,1	Aralsor superprofundo, 28.1	Kazajstán
37,5	Kaliningrado, 37,5	Ruso
42,3; 11.3	Ivánovka, 42,3	Ruso
42,3	Loknovskaya, 42,3	Letoni
31,7–43,5	42,3 Nukuty, 43,5	Ruso
20–50	Prikumskoe, 50 años	Ruso
56,9	Lubimskaya, 56,9	Ruso
57,6	Anybskaya, 57,6	Ruso
57,7	Planta de bombeo O'Neil, 57,7	EE.UU
73.1	Lubina, 73,1	Polonia
76,9,	Oparínskaya, 76,9	Ruso
80	Barguzín, 80 años	Ruso
80	Tunka, 80	Ruso
86,6	Povarovskaya, 86,6	Ruso
90,5	Krestetskaya, 90,5	Ruso
78–95	Selenga, 95	Ruso
98	Bourakebougou, 98	Malí

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020)

6.11 Descubrimientos de Hidrógeno Asociados a Depósitos de Sal

Se debaten los orígenes del hidrógeno descubierto en depósitos de sal. Se ha sugerido que las elevadas concentraciones de hidrógeno en los depósitos de sal podrían atribuirse a la efectiva retención del hidrógeno entre capas alternas de arcilla y sal. Un ejemplo de este es en los depósitos de potasio. En este proceso se genera calcio que reacciona fácilmente con el agua, produciendo hidrogeno molecular. Información de yacimientos de sal en la Tabla 12 (Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020).

Tabla 12 Descubrimientos de hidrógeno asociados a depósitos de sal

% H ₂	Pozo	País
11,3	Salzmünde, 11,3	Alemania
12–12,9	Rössleben, 12,9	Alemania
8.4–13.3	Sigfrido-Giesen, 13,3	Alemania
17,4	Chusovskie Gorodki	Ruso
22,1	Eristgal, 22.	Alemania
24,6	Burbach, 24,6	Alemania
32,9	Solikamsk, 32,9	Ruso
50	Wittelsheim, >50	Francia
54,3	Verhnekamsk, 54,3	Ruso
51,5	Mühlhausen, 61,5	Alemania
82,3–93	Stassfurt, 93	Alemania

(Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, 2020)

7. Potencial de hidrógeno natural en Colombia

Colombia es un país privilegiado en términos de recursos naturales, lo que le otorga un enorme potencial para la exploración y explotación de hidrógeno blanco. La riqueza geológica del país incluye extensas reservas de hidrocarburos, minas y una topografía variada, que son factores esenciales para la formación y almacenamiento de hidrógeno natural en el subsuelo.

El territorio colombiano presenta características geológicas favorables, tales como formaciones sedimentarias y cuencas petrolíferas, que son áreas propensas a la acumulación de hidrógeno natural. Regiones como la Cuenca del Magdalena, los Llanos Orientales y la Cuenca de Catatumbo son ejemplos de zonas con una alta concentración de recursos energéticos, lo que sugiere un potencial significativo para la presencia de hidrógeno blanco (Sánchez, Caracterización geológica y potencial de hidrógeno blanco en Colombia., 2021).

Además, la ubicación geográfica de Colombia, en la convergencia de placas tectónicas, puede resultar en la liberación de hidrógeno desde el manto terrestre hacia reservorios accesibles. La interacción de procesos geológicos, como la actividad volcánica y la tectónica de placas, podría facilitar la generación y captura de hidrógeno natural en el subsuelo.

Algunas de las principales áreas de interés incluyen:

7.1. Cuenca del Magdalena.

La Cuenca del Magdalena es una de las principales regiones petroleras de Colombia y presenta condiciones geológicas propicias para la acumulación de hidrógeno blanco. Se han identificado múltiples puntos de interés en esta zona, y se están llevando a cabo estudios para evaluar su potencial (Ramírez, 2020).

7.2. Llanos Orientales.

Esta región es conocida por sus vastos recursos energéticos y su geología favorable. Los Llanos Orientales han sido objeto de investigaciones preliminares que sugieren la presencia de reservorios de hidrógeno natural. La infraestructura existente en la región también facilita la exploración y producción (Gómez, 2021).

7.3. Cuenca de Catatumbo.

La Cuenca de Catatumbo, ubicada en el noreste de Colombia, es otra área con un alto potencial para la exploración de hidrógeno blanco. La región se caracteriza por su actividad geológica y la presencia de hidrocarburos, lo que la convierte en un candidato ideal para la

exploración de hidrógeno natural (Sánchez, "Exploración de hidrógeno blanco en la Cuenca de Catatumbo: Perspectivas geológicas y energéticas, 2019).

7.4. Región del Caribe.

Las costas del Caribe colombiano también han mostrado indicios de la presencia de hidrógeno natural por su cercanía a fuentes de agua salina y la existencia de infraestructura portuaria (Gómez & Pérez, 2019). Estudios geológicos están en curso para determinar la viabilidad de la explotación en esta región, que podría convertirse en un importante centro de producción de hidrógeno blanco (López, 2020).

7.5 Región Andina

La región andina de Colombia, caracterizada por su alta radiación solar y disponibilidad de agua, se presenta como una zona clave para la exploración de hidrogeno a partir de fuentes renovables (Rodríguez et al., 2020).

8. Conclusiones

El hidrógeno natural es un recurso geológico que puede ser encontrado en diferentes formas en la Tierra, como hidrógeno libre, en inclusión y adsorción en rocas. A pesar de su potencial como fuente limpia y renovable de energía, la extracción a gran escala aún presenta desafíos tecnológicos debido a la reactividad y migración del hidrógeno. Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que es factible extraer hidrógeno natural mediante tecnologías adaptables y enfoques innovadores, lo que podría abrir nuevas oportunidades para su explotación sostenible en el futuro.

La generación de hidrógeno natural se puede detectar en la superficie mediante el muestreo de gases. Este gas puede filtrarse a través de depresiones circulares y zonas de falla en el subsuelo. Las concentraciones de hidrógeno pueden variar dependiendo de la ubicación y la actividad geológica. Es importante realizar estudios detallados para comprender mejor este fenómeno y su potencial impacto en el medio ambiente.

Colombia tiene un gran potencial para la exploración y explotación de hidrógeno natural, gracias a su riqueza geológica y ubicación estratégica. Regiones como la Cuenca del Magdalena, los Llanos Orientales, la Cuenca de Catatumbo, el Caribe y la región Andina presentan condiciones favorables para la acumulación y producción de hidrógeno blanco. Estudios geológicos están en curso para evaluar el potencial de estas zonas como importantes centros de producción de hidrógeno natural en el país.

Referencias Bibliográficas

- Aldana Rivera, S. E., & León Peñuela, F. A. (2022). *Hidrógeno en Colombia SI SE HACE MAL, PODRÍA SER PEOR*. Bogotá: Fundación Heinrich Böll.
- BACH, W., & EDWARDS, K. (2003). Iron and sulfide oxidation within the basaltic ocean crust: Implications for chemolithoautotrophic microbial biomass production. *Geochimica et Cosmochimica*.
- Hanson, J., & Hanson, H. (2024). La génesis orgánica del hidrógeno. *Unconventional Resources*.
- Hirose, T., Kawagucci, S., & Suzuki, K. (2011). Mecanoradical H₂ Generación durante fallas simuladas: implicaciones. *Unión Geofísica Estadounidense*.
- Langhi, L., & Strand, J. (2023). Exploring natural hydrogen hotspots: a review and soil-gas survey design for identifying seepage. *Geoenergy*.
- Leardini, F., Ares, j., & Fernández, J. (2019). *EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO*.
- Marfil, R., & Caja, M. (2010). Diagénesis de rocas detríticas. *Sedimentología Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*.
- Morante, J., Andreu, T., García, G., Guilera, J., & Tarancón, A. (2020). *Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada*. Madrid: Fundación Naturgy.
- Panadero, E., Lupton, J., & Resing, J. (2011). Plumas de evento únicas de una erupción de 2008 en el Centro de Extensión de Lau del Noreste. *Unión Geofísica Americana*.
- Prinzhofer, A., Moretti, I., & Francolin, J. (2018). Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure. *ScienceDirect*.

Yordán, E. (5 de Agosto de 2022). Qué son las fuentes hidrotermales: teoría y cómo se forman.

Ecología Verde.

Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive.

ELSEVIER.

.L Charlou, J. D.-B. (2002). Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR),. *Chemical Geology.*

Alain Prinzhofer, C. S. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *nternational Journal of Hydrogen Energy.*

Alanís Navarro. (2024). *slideshare*. Obtenido de Producción de hidrógeno mediante combustibles fósiles: <https://es.slideshare.net/slideshow/produccion-de-hidrogeno-mediante-combustibles-fsilespdf/266200207#33>

Araujo, Y. d. (Febrero de 2016). “*INFLUENCIA DEL ÁCIDO ACÉTICO Y DEL H₂S EN LOS PROCESOS DE DIAGÉNESIS DEL FELDESPATO POTÁSICO, SIMULANDO LAS CONDICIONES DE PRESIÓN Y ATO POTÁSICO, SIMULANDO LAS CONDICIONES DE PRESIÓN Y* Obtenido de UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA: <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/15076/1/Tesis%20Yulimar%20De%20Araujo.pdf>

Ares, J., Leardini, F., Sánchez, C., Fernández, J., & Ferrer, I. (2019). EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO: MUCHO HECHO PERO CASI TODO POR HACER. *Universidad Autónoma de Madrid*, 10.

Ares, J., Leardini, F., & Sánchez, C. (Agosto de 2019). *EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO: MUCHO HECHO PERO CASI TODO POR HACER*. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/688504/EM_62_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Asensio, P. (2007). *Hidrógeno y pila de combustible*. Obtenido de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-paratodos-hidrogeno-y-pila-de-combustible>.
- Bersine, A. (30 de Abril de 2024). El NREL fue seleccionado como parte de un financiamiento federal de \$1,6 millones para explorar el potencial del hidrógeno geológico. *NREL*.
- B Lay-Roger, R., Bach, W., Bobadilla, L., & Ramírez Reina, T. (2024). Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas. *ScienceDirect*, 9.
- Bo Long, Y. X.-Q. (2023). Cinética de la reacción del trióxido de azufre con vapor de agua para formar ácido sulfúrico atmosférico. *Revista de la Sociedad Química Estadounidense*.
- Gomez caballero, J. A., & Pantoja-Alor, J. (2003). El origen de la vida desde un punto de vista geológico. *Boletín de la sociedad ecológica Mexicana*.
- Gómez, L. &. (2021). Potencial de hidrógeno blanco en los Llanos Orientales de Colombia: Evaluación geológica y tecnológica. *Revista de Ingeniería Petrolera*.
- Guzmán Marmolejo, A. (2014). *Producción de metano abiótico en planetas habitables*. México: Universidad nacional autónoma de México.
- H. Shinohara, A. A. (2008). Variación de las relaciones H₂O / CO₂ y CO₂ / SO₂ de los gases volcánicos emitidos por la desgasificación continua del volcán Etna, Italia. *Journal of geophysical research*.
- KITA, I., & MATSUO, S. (1982). H₂ Generation by Reaction Between H₂O and Crushed Rock: An Experimental Study on H₂ Degassing From the Active Fault Zone. *Revista de investigación geofísica: Tierra sólida*.
- López, J. (2020). "Potencial de hidrógeno blanco en la Región del Caribe de Colombia: Estudio geológico y perspectivas de producción. *Revista de Ciencias Ambientales*.

- MANO, E. (1 de febrero de 2023). HIDRÓGENO OCULTO. *Science custom publishing* .
- Messad, P. (2023). CRECE LA EMOCIÓN POR EL “HIDRÓGENO NATURAL” A MEDIDA QUE SE ENCUENTRAN ENORMES RESERVAS EN FRANCIA. *EURACTIV*.
- Moretti, I. (2019). *HIDRÓGENO NATURAL ? UNA CURIOSIDAD GEOLÓGICA O FUENTE DE ENERGIA PRIMARIA PARA UN FUTURO BAJO EN CARBONO*.
- Pantojo Alor, J., & Gómez Caballero, J. A. (2004). Los sistemas hidrotermales y el origen de la vida. *Instituto de Geología* , 22.
- Piacente, P. J. (02 de Febrero de 2023). La Tierra podría tener grandes reservas de hidrógeno, un combustible renovable y sin carbono.
- Pichel, J. (1 de Marzo de 2023). El primer pozo de hidrógeno europeo está en Aragón y puede cambiar el sector energético.
- Ramírez, C. (2020). Potencial de hidrógeno blanco en la Cuenca del Magdalena: Estudio geológico preliminar. *Revista de Geología Aplicada*.
- RM galante, K. V. (2006). Controles geoquímicos de fluidos hidrotermales de los campos Kairei y Edmond Vent, 23°–25°S, Central Indian Ridge. *Unión Geofísica Americana*.
- Roger, R., Bach, W., & Bobadilla, L. (2024). Hidrógeno natural en la transición energética: fundamentos, promesas. *elsevier*.
- Sánchez, P. (2019). "Exploración de hidrógeno blanco en la Cuenca de Catatumbo: Perspectivas geológicas y energéticas. *Revista de Energías Renovables*.
- Sánchez, P. (2021). Caracterización geológica y potencial de hidrógeno blanco en Colombia. *Revista de Geociencias*.
- Solé, J. E. (15 de julio de 2020). EL HIDRÓGENO VERDE ¿SERÁ GEOLÓGICO? *Ilustre Colegio Oficial de Geólogos*.

Stefán Arnórsson, S. T. (2015). Utilization of Geothermal Resources. *The Encyclopedia of Volcanoes*.

Wang, L., Zhijun, J., & Chen, X. (2023). El origen y aparición del hidrógeno natural. *Energías. Yacimientos de hidrógeno natural y renovable*. (s.f.). Obtenido de AvatarEnergia:
<https://avatarenergia.com/yacimientos-de-hidrogeno-natural-y-renovable/>

Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*.