

Caracterización Integral de los Mecanismos de Formación, Entrampamiento y Manifestaciones
Superficiales del Hidrógeno Natural

Anthony Ijaji Solarte, Giany Andrea Sánchez Santos

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de petróleos

Director

Manuel Cabarcas Simancas, M.Sc

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de petróleos
Programa Académico
Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A nuestros seres queridos, desde el inicio de nuestro camino académico hasta hoy, siempre han sido nuestra fuente inagotable de apoyo y aliento. Este logro no habría sido posible sin su constante respaldo y amor incondicional. Cada desafío que enfrentamos en la elaboración de esta tesis se volvió más llevadero gracias a sus palabras de aliento y sabios consejos. Queremos dedicarles este trabajo, que simboliza no solo nuestro esfuerzo, sino también el fruto de la guía y enseñanzas que nos han brindado a lo largo de los años.

¡les expresamos nuestro eterno agradecimiento!

Agradecimientos

En primer lugar, un agradecimiento a nuestros padres, por su amor incondicional y su apoyo. Incluso en los momentos más difíciles, han sido el pilar de este logro. También expresamos nuestra gratitud a nuestros hermanos, quienes supieron brindarnos su tiempo para escucharnos y apoyarnos, y a nuestros abuelos, quienes supieron estar cuando más los necesitábamos. Sin ustedes, todo esto no habría sido posible. Su amor y sacrificio han sido la luz que guió nuestros caminos a través de este viaje académico.

Nos gustaría agradecer a la Universidad Industrial de Santander por abrirnos las puertas y brindarnos la oportunidad de avanzar en nuestras carreras profesionales. Su compromiso con la educación superior y su apoyo continuo han sido pilares fundamentales en nuestro camino hacia el logro académico.

Un sincero agradecimiento a todos nuestros amigos y compañeros que estuvieron con nosotros en los momentos de estrés y alegría durante este largo y retador camino. Su apoyo, confianza, soporte y cariño han sido invaluable. Cada uno de ustedes ha contribuido a nuestra fortaleza y ánimo de una manera u otra. Gracias por ser nuestros puntos de apoyo, nuestro equipo de aliento y, lo más importante, la familia que nosotros elegimos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Generalidades de hidrogeno blanco	16
3. Reacciones Químicas en el Subsuelo: Generación de Hidrógeno blanco.....	24
3.1 Serpentinización.....	24
3.2 Radiólisis del Agua	26
3.3 Actividad Biológica	28
3.4 Otras Reacciones de Minerales	30
3.5 Fracturación de rocas	30
3.6 Hidrógeno de origen profundo. – (“Deep-seated hydrogen”).....	32
3.7 Hidrogeno a partir del magma	33
4. Presencia de hidrogeno	39
4.1 Hidrogeno libre	39
4.2 Hidrogeno en inclusiones.....	40
4.3 Hidrogeno disuelto en agua	41
5. Hidrogeno blanco en el subsuelo: Almacenamiento y Entrampamiento	43
5.1 Tipos de Roca y su Importancia en la Generación y Almacenamiento de Hidrógeno	43
5.1.1 Impacto en el Almacenamiento y Movimiento del Hidrógeno.....	44
5.2 Almacenamiento del hidrogeno	46

5.2.1 Cavernas salinas.....	47
5.2.2 Yacimientos de petróleo y gas	49
5.2.3 Acuíferos.....	51
5.2.4 Cuencas carboníferas	55
5.3 Entrampamiento.....	56
5.3.1 Mecanismos de Entrampamiento del Hidrógeno en el Subsuelo.....	56
5.3.1.1 Estructuras Geológicas.....	56
5.3.1.2 Absorción y Adsorción.	57
5.3.1.3 Capas Impermeables.	57
5.3.1.3.1 Dolerita.	57
5.3.1.3.2 Evaporitas.	58
6. Características Superficiales en la Generación de Hidrógeno Natural	59
6.1 Muestreo de Gases en superficie.....	59
6.1.1 Geoquímica de fluido.....	60
6.1.2 Imágenes sísmicas.....	61
6.1.3 Imágenes de satélite	61
6.2 Filtraciones de hidrogeno natural.....	63
6.1.4 Depresiones circulares por hidrogeno.....	63
6.1.5 Círculos de hadas - “ Fairy circles”	65
6.1.6 Cuencas de Carolina - “carolina bays”	66
7. Metodología - Flujo de trabajo propuesto para estudios de Hidrógeno natural.....	68
8. Análisis global: Estado actual de yacimientos a nivel mundial.....	82
8.1 Caso I: Bourakebougou – Malí, Africa.....	83

8.2	Caso II: Australia	84
8.3	Caso III: Un Enfoque en descubrimientos globales.....	86
8.3.1	São Francisco, Brasil	87
8.3.2	Pirineos, Francia	88
8.3.3	Rusia	89
9.	Hidrógeno blanco en Colombia potenciales fuentes y su papel en la transición energética.....	93
9.1	Perspectiva del hidrogeno blanco en Colombia.....	93
9.1.1	Decreto 2235 de 2023	94
9.2	Diversificación Energética en Colombia	96
9.3	Estudios de hidrogeno natural realizados en Colombia.....	97
9.3.1	Prospectiva de H2 en Colombia en la cuenca cauca-patia.....	100
9.3.2.	Prospectiva de h2 en Colombia en la cuenca de llanos orientales.....	103
10.	Conclusiones	106
11.	Recomendaciones	108
	Referencias Bibliográficas	109
	Anexos	119
	Anexo A: Glosario	119

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Síntesis de diferentes procesos de formación de hidrogeno natural</i>	35
Tabla 2. <i>Generalidades de los fenómenos que dan origen al hidrogeno blanco</i>	38
Tabla 3. <i>Presencia de hidrogeno en diferentes lugares de la naturaleza</i>	42
Tabla 4. <i>Aspectos geológicos, técnicos, relevantes de diversas opciones para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno.</i>	54
Tabla 5. <i>Síntesis de métodos indirectos.</i>	60
Tabla 6. <i>Descubrimientos de hidrógeno alrededor del mundo</i>	91
Tabla 7. <i>Posibles elementos identificados de un sistema de generación de hidrogeno natural</i>	104

Lista de figuras

Figura 1 <i>Fuegos eternos este de Turquía</i>	19
Figura 2 <i>Ilustraciones donde se encuentra hidrogeno libre</i>	20
Figura 3 <i>Mapa de detecciones de hidrógeno en diversos entornos en concentraciones >10% vol.</i>	22
Figura 4 <i>Sistema de hidrogeno natural</i>	23
Figura 5 <i>La serpentización como puente hacia la generación de hidrogeno sostenible.</i>	25
Figura 6 <i>Proceso de radiólisis del agua.</i>	27
Figura 7 <i>Hidrogeno generado a partir de actividad biológica</i>	29
Figura 8 <i>Fracturación de roca producida por actividad tectónica</i>	31
Figura 9 <i>Hidrogeno generado en el núcleo o manto terrestre</i>	32
Figura 10 <i>Hidrogeno producido a partir del magma.</i>	34
Figura 11 <i>Origen de hidrogeno en la tierra</i>	37
Figura 12 <i>Permeabilidad y porosidad para almacenamiento de hidrogeno</i>	46
Figura 13 <i>Almacenamiento de hidrogeno Caverna de sal</i>	49
Figura 14 <i>Almacenamiento de hidrogeno en campos de hidrocarburo y gas agotados</i>	51
Figura 15 <i>Almacenamiento de hidrogeno por acuíferos</i>	52
Figura 16 <i>Almacenamiento de hidrogeno por cuencas carboníferas</i>	55
Figura 17 <i>Corte transversal de los pozos de exploración en el campo de gas H₂ de Malí</i>	58
Figura 18 <i>Interpretación sísmica de horizontes y fallas.</i>	61
Figura 19 <i>Concentraciones subterráneas de H₂ en la Bahía Smith</i>	62
Figura 20 <i>Origen de hidrogeno en la tierra</i>	64
Figura 21 <i>Círculo de hadas en Brasil.</i>	66

Figura 22 *Imagen satelital bahías de California, EE.UU* 68

Figura 23 *Fase 1 del Flujo de trabajo propuesto para estudio de hidrogeno natural* 72

Figura 24 *Fase 2 del Flujo de trabajo propuesto para estudio de hidrogeno natural* 78

Figura 25 *Detección de hidrogeno natural de forma global* 82

Figura 26 *Análisis del contenido de hidrógeno en una variedad de entornos*..... 82

Figura 27 *Imagen satelital campo Malí* 84

Figura 28 *Imagen satelital depresiones circulares Australia* 86

Figura 29 *Círculo de Hadas Brasil* 88

Figura 30 *Imágenes satelitales con presencia de depresiones circulares* 90

Figura 31 *Reglamentación sobre hidrógeno blanco en Colombia* 95

Figura 32 *Potenciales puntos de exploración de hidrógeno blanco en Colombia* 99

Figura 33 *Sección transversal demostración estructural características de central parte de Colombia en el nivel de Cali*..... 101

Figura 34 *Sistema esquemático de hidrogeno del valle del Cauca-Patía* 102

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A: Glosario	1197

Resumen

Título: Caracterización Integral de los Mecanismos de Formación, Entrampamiento y Manifestaciones Superficiales del Hidrógeno Natural

Autor: Anthony Ijaji Solarte, Giany Andrea Sánchez Santos

Palabras Clave: hidrogeno, combustibles fosiles, geoquímica.

Descripción: El objetivo de este estudio fue Caracterizar los mecanismos de formación, entrampamiento y manifestaciones superficiales del hidrógeno natural. Durante décadas, los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía a nivel mundial, sin embargo, su uso ha causado importantes problemas ambientales, particularmente en relación con el cambio climático y la contaminación del aire. Ante esta problemática, la demanda de energías limpias y renovables ha llevado a los investigadores a buscar fuentes de energía alternativas, entre ellas el hidrógeno. Para lograr el objetivo del estudio, se realizó un enfoque híbrido que combina el análisis de procesos geoquímicos y geofísicos que generan hidrógeno natural. Las investigaciones demuestran que el uso del hidrógeno podría representar un gran avance en la diversificación energética y la sostenibilidad en Colombia. Existe un creciente interés y compromiso por parte de actores clave de los sectores público y privado para explorar y desarrollar el potencial del hidrógeno como alternativa de energía limpia y renovable en el país. Debido a la diversa geología de Colombia, el país alberga una variedad de formaciones rocosas, entre ellas la ofiolita, una roca marina del período Mesozoico que tiene la capacidad inherente de producir hidrógeno al interactuar con el agua. El estudio concluye que el hidrógeno natural representa una prometedora fuente de energía alternativa para Colombia en su transición hacia un futuro energético más sostenible.

Trabajo de Grado

Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleos.

Director: Manuel Cabarcas Simancas, Magister.

Abstract

Title: Comprehensive Characterization of the Mechanisms of Formation, Trapping and Surface Manifestations of Natural Hydrogen

Author: Anthony Ijaji Solarte, Giany Andrea Sánchez Santos

Keywords: hydrogen, fossil fuels, geochemistry.

Description: The objective of this study was to characterize the mechanisms of formation, trapping, and surface manifestations of natural hydrogen. For decades, fossil fuels have been the world's primary energy source; however, their use has caused significant environmental issues, particularly concerning climate change and air pollution. In response to this problem, the growing demand for clean and renewable energy has led researchers to seek alternative energy sources, including hydrogen. To achieve the study's objective, a hybrid approach was adopted, combining the analysis of geochemical and geophysical processes that generate natural hydrogen. Research indicates that the use of hydrogen could represent a significant advancement in energy diversification and sustainability in Colombia. There is a growing interest and commitment from key public and private sector stakeholders to explore and develop the potential of hydrogen as a clean and renewable energy alternative in the country. Due to its diverse geology, Colombia hosts a variety of rock formations, including ophiolite, a marine rock from the Mesozoic era that has the inherent ability to produce hydrogen when interacting with water. The study concludes that natural hydrogen represents a promising alternative energy source for Colombia in its transition towards a more sustainable energy future.

Bachelor Thesis

Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleos.

Director: Manuel Cabarcas Simancas, Magister.

Introducción

Durante décadas, los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía del mundo, sin embargo, su uso conlleva a grandes problemas ambientales, especialmente en términos de cambio climático y contaminación atmosférica (Muhammed et al., 2022). La demanda de energía limpia y renovable ha llevado a investigadores a buscar fuentes de energía alternativas, incluidas, entre otras, la eólica y la solar. Sin embargo, la producción de energía que se genera a partir de estos recursos es muy fluctuante.

A medida que el mundo avanza hacia un futuro con bajas emisiones, el hidrógeno ha sido reconocido como una de las alternativas de energía limpia, debido a su nula huella de carbono. Este gas proporciona una solución energética sostenible y flexible que puede aplicarse a una gama de usos industriales y de transporte, ofreciendo un reemplazo viable para los hidrocarburos (Bendall, 2022). Actualmente, se encuentra en investigación y desarrollo la producción de hidrógeno natural, puesto que aún se encuentra en etapas tempranas.

La producción de hidrogeno natural es importante a partir de la comprensión de los complejos sistemas geológicos y químicos que conducen a la formación y acumulación de hidrógeno. Sin embargo, el mayor desafío para el desarrollo de esta energía se encuentra en la falta de conocimiento sobre su formación, migración, acumulación en el subsuelo y en la identificación de sus manifestaciones en la superficie terrestre.

En este contexto, el presente estudio busca llenar estas lagunas mediante una investigación exhaustiva y multidisciplinaria, es crucial entender las reacciones químicas que dan como resultado la generación del gas como la serpentinización y radiólisis del agua, comprender los rasgos físicos de las formaciones con potencial para generar y almacenar hidrógeno en el subsuelo.

Además, es necesario identificar los principales yacimientos de hidrógeno natural y sus manifestaciones superficiales donde se evidencian constantemente círculos de “hadas” a nivel mundial. Del mismo modo, con el fin de comprender el potencial de producción y las reservas de este recurso energético se estudian en diferentes regiones los yacimientos que tienen alta probabilidad de contener el gas tomando como base el campo de Malí. De acuerdo con lo anterior, se propone una metodología para identificar y caracterizar las manifestaciones del hidrógeno natural tanto en el subsuelo como en la superficie terrestre. Asimismo, se pretende identificar las posibles fuentes de hidrógeno blanco en Colombia y evaluar su impacto en la transición energética del país.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar los mecanismos de formación, entrapamiento y manifestaciones superficiales del hidrógeno natural.

1.2 Objetivos Específicos

1. Conocer las reacciones químicas y los rasgos físicos de formaciones con potencial para generar y almacenar hidrogeno natural en el subsuelo.
2. Identificar los principales yacimientos de hidrógeno natural y sus manifestaciones superficiales a nivel mundial para comprender el potencial de producción y reservas de este recurso energético.
3. Proponer una metodología que permita identificar y caracterizar las manifestaciones del hidrógeno natural tanto en el subsuelo como en la superficie terrestre.
4. Identificar las posibles fuentes de hidrogeno blanco en Colombia y su impacto en la transición energética del país.

2. Generalidades de hidrogeno blanco

El hidrógeno, el elemento más simple y abundante en el universo, tiene un potencial significativo como fuente de energía limpia y sostenible en la Tierra. A diferencia del hidrógeno obtenido a través de procesos industriales, el hidrógeno natural, a menudo denominado "hidrógeno blanco", se forma y acumula en el subsuelo de la Tierra mediante procesos geológicos y químicos naturales.

Analizar esta fuente de energía es de alta importancia para contribuir a la mitigación de los impactos ambientales negativos que amenazan la salud y la estabilidad de los ecosistemas. La transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables, como el hidrógeno, es crucial para contrarrestar los efectos devastadores de la crisis medioambiental.

Según Morita (1999) uno de los procesos fundamentales en la generación de hidrógeno es la serpentinización, un fenómeno metamórfico que ocurre cuando el agua reacciona con minerales ricos en hierro y magnesio, como el olivino, a altas temperaturas y presiones. Esta reacción produce minerales como la serpentina y libera hidrógeno como subproducto. La serpentinización es particularmente relevante en entornos geológicos donde se encuentran rocas ultramáficas, como en zonas de subducción o en dorsales oceánicas.

Por otro lado, la radiólisis del agua es un proceso impulsado por la radiación ionizante de elementos radiactivos presentes en la corteza terrestre, como el potasio, uranio y torio. Esta radiación puede descomponer las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Aunque la radiólisis del agua puede ocurrir a un ritmo lento, puede ser una fuente significativa de hidrógeno en el subsuelo, especialmente en áreas con altas concentraciones de elementos radiactivos.

Además de los procesos geológicos, la actividad biológica también puede contribuir a la generación de hidrógeno en el subsuelo. La descomposición anaeróbica de la materia orgánica, la fermentación y la acción de ciertas bacterias pueden producir hidrógeno como subproducto. Estos procesos biológicos son importantes en entornos donde hay condiciones adecuadas para la actividad microbiana, como en sedimentos marinos o en suelos anóxicos.

La comprensión de estos procesos no solo es crucial para la investigación científica fundamental, sino también para explorar el potencial del hidrógeno como una fuente de energía limpia y renovable. El hidrógeno almacenado en el subsuelo podría servir como una forma de energía almacenada que podría ser utilizada para respaldar la energía renovable intermitente, como la solar y la eólica. Además, la extracción y utilización del hidrógeno en el subsuelo plantea desafíos técnicos y ambientales que deben abordarse de manera integral para garantizar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

Según el Servicio Geológico Colombiano, este tipo de hidrógeno no solo ofrece una alternativa renovable y menos contaminante a los combustibles fósiles, sino que también plantea un interesante campo de estudio en términos de su formación, acumulación y potencial de explotación.

La caracterización integral de los mecanismos de formación, entrapamiento y manifestaciones superficiales del hidrógeno natural se vuelve crucial para comprender su ciclo completo y las condiciones bajo las cuales este recurso puede ser viable para su uso energético. Estos mecanismos implican una serie de reacciones químicas y condiciones físicas específicas que permiten no solo la generación de hidrógeno sino también su almacenamiento en formaciones geológicas adecuadas (Maiga et al., 2023).

El estudio del hidrógeno natural no solo abre nuevas perspectivas para la exploración de fuentes de energía renovables, sino que también desafía nuestra comprensión de los procesos geológicos y las interacciones químicas en el subsuelo. Al avanzar en la caracterización integral de estos mecanismos, estamos un paso más cerca de aprovechar el vasto potencial del hidrógeno natural como parte de nuestro futuro energético sostenible (Scott., 2021).

Anteriormente se creía que el hidrógeno libre en la naturaleza era nulo lo que ha llevado a una falta de búsqueda y detección. Métodos analíticos estándar, como la cromatografía de gases, utilizan hidrógeno como gas portador, lo que hace que la detección del propio hidrógeno sea difícil. Muchos estudios carecen de equipos adecuados para detectar hidrógeno, lo que contribuye a su subestimación. Uno de los ejemplos son los casos donde no se ha medido el hidrogeno aun en concentraciones significativas sin importar una presencia conocida.

El hidrógeno libre se refiere al hidrógeno que puede migrar libremente en los poros o fracturas de las rocas (o formaciones), que es una de las principales formas de hidrógeno natural. Se descubrió por primera vez cerca de la ciudad de Antalya en Turquía, donde la fuga de gas continúa ardiendo y estos respiraderos activos existen desde hace al menos 2500 años [Figura 1] (Hosgörmez H et al., 2008; Zgonnik V, 2020). Hace aproximadamente dos siglos, se encontraron fugas similares en Filipinas, donde el gas ardía con llamas y en un estudio realizado por Vacquand C, 2011, se determinó la concentración de hidrógeno en las muestras de agua utilizando técnicas de muestreo de gases, como tubos de acero inoxidable con válvulas a prueba de helio y tubos de vidrio con septos de goma y el contenido de hidrógeno medido se mantuvo estable entre 41,4% y 44,5% (Vacquand C, 2011).

Figura 1

Fuegos eternos este de Turquía.

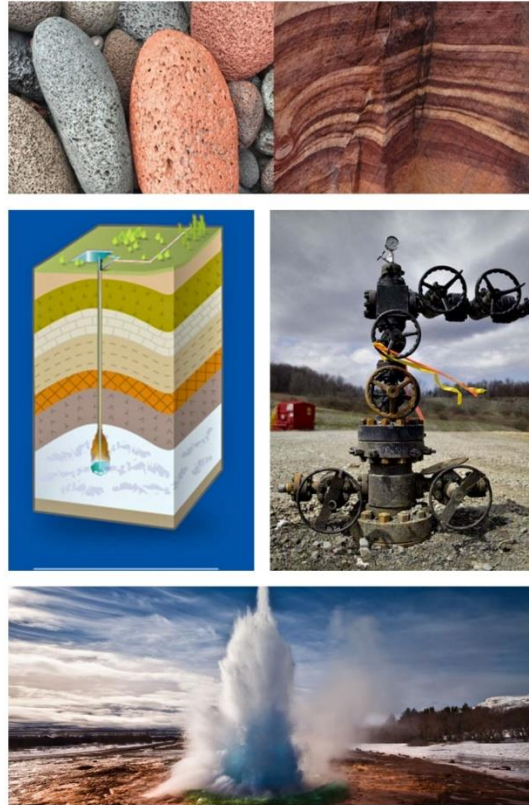


Nota: Filtración gas hidrogeno producido mediante el proceso de serpentinización. Según un estudio realizado por un equipo de científicos publicado en la edición de marzo de 2019 de la revista Applied Geochemistry. Tomado Mysterious fueling fire-breathing mountain in turkey discovered in dozens of locations worldwide, por P. Wright, 2019, The weather Channel.

En la actualidad, los investigadores han monitoreado el hidrógeno natural de ofiolitas, rocas precámbricas, rocas ígneas, gases volcánicos, kimberlitas tubulares, yacimientos minerales, campos de petróleo y gas, cuencas de carbón, rocas sedimentarias, depósitos de sal y sistemas hidrotermales como géiseres y fuentes termales. Se ha descubierto que el contenido de hidrógeno libre varía ampliamente en distintos entornos geológicos, así como en áreas dentro de un mismo entorno y diversas profundidades [Figura 2].

Figura 2

Ilustraciones donde se encuentra hidrogeno libre



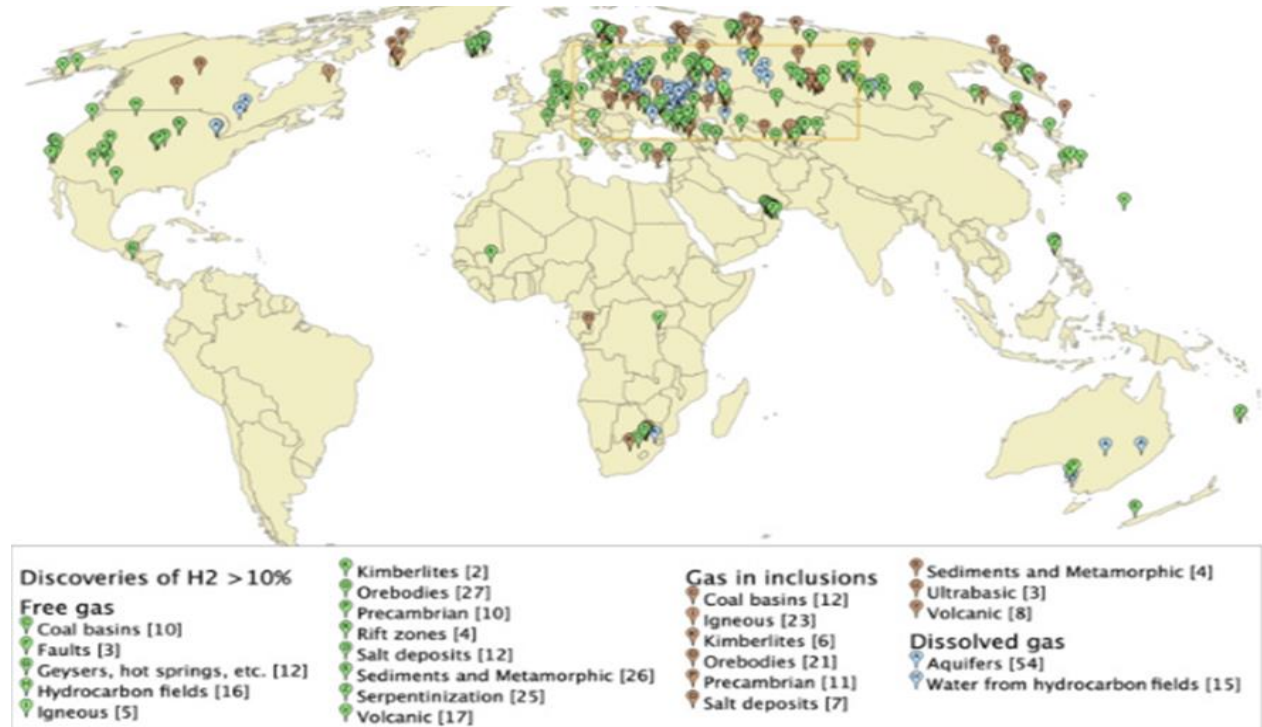
Nota. La imagen representa el hidrogeno libre en diversos entornos. Tomadas de Diferenciador. (2022, 5 octubre). Tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas (con ejemplos). Diferenciador. <https://www.diferenciador.com/tipos-de-rocas/>, Wolfurious. (s. f.). Cabezal del pozo (Arbolito de navidad). <https://larocamadrehg.blogspot.com/2013/03/cabezal-del-pozo-arbolito-de-navidad.html>, Hidrógeno Verde: El Almacenador de otras Energías Renovables. (2022, 6 septiembre). Solarpedia. <https://www.solarpedia.info/hidrogeno-verde/>

Se ha encontrado que el hidrógeno se presenta principalmente como un gas atrapado en forma de inclusiones o adsorción en diferentes tipos de rocas (Giardini AA et al., 1976 ; Jiang FLJ y Li GR, 1981). Al igual que el hidrógeno libre, el hidrógeno en inclusiones se encuentra en rocas ultrabásicas, rocas precámbricas, rocas ígneas, rocas volcánicas, kimberlitas tubulares, yacimientos minerales, cuencas de carbón, rocas sedimentarias o metamórficas y muestras de halita de más de diez países de todo el mundo. Los resultados muestran una variación en el contenido de hidrogeno en estas inclusiones del 0,2% al 100%.

En muchos casos se ha observado hidrógeno natural como gas disuelto en aguas subterráneas. Por ejemplo, un estudio sobre la presencia de hidrógeno en fluidos subterráneos realizado por investigadores de la antigua Unión Soviética compiló mapas de distribución anómala de hidrógeno basándose en más de 2000 resultados de análisis (Scherbakov AV y Kozlova ND, 1986). A partir de esto se realizaron estudios globales donde se copilaron concentraciones de hidrogeno con una concentración mayor al 10% como se muestra en la figura 3, los cuales se clasificaron en gas libre, gas en inclusión y gas disuelto.

Figura 3

Mapa de detecciones de hidrógeno en diversos entornos en concentraciones >10% vol.



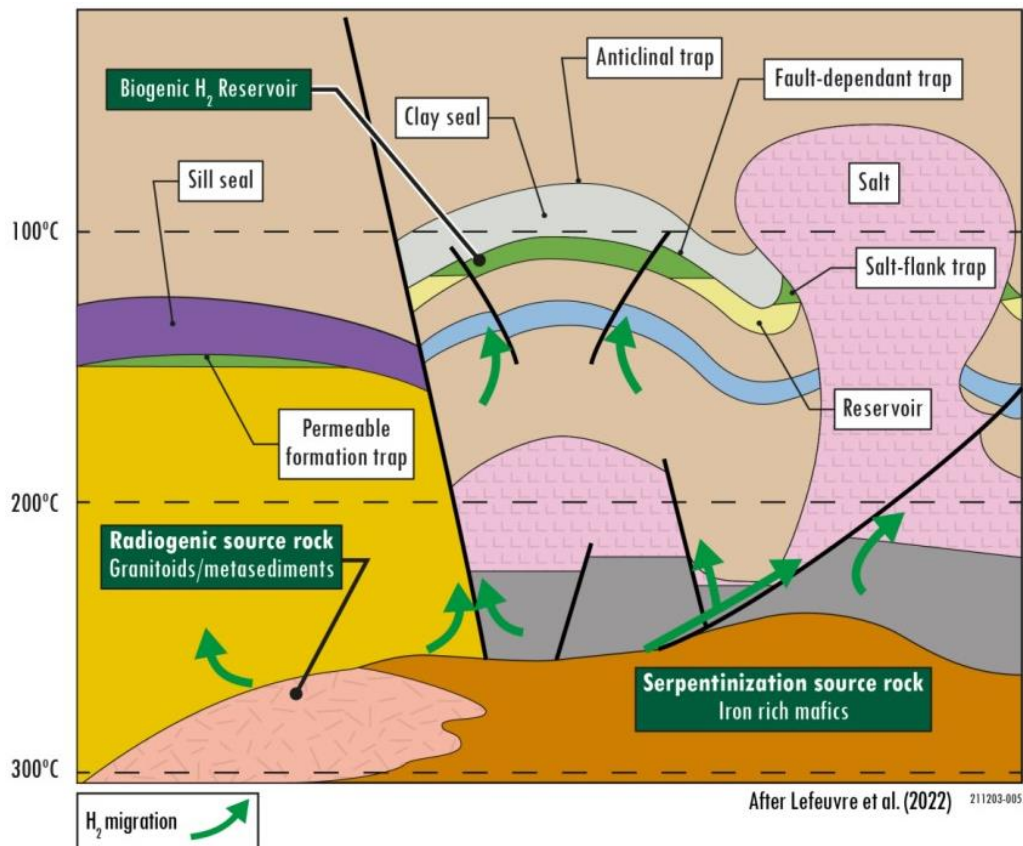
Nota. El gráfico representa el descubrimiento de hidrogeno combinando todos los datos de los países del Este y del Oeste. Además, presenta los datos de los descubrimientos de hidrógeno en una forma sintetizada y fácil de entender. Tomado de e occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, por V. Zgonnik, 2020, *Earth-Science Reviews*.

La actual estrategia de exploración de hidrógeno natural se puede relacionar con el inicio de la industria del petróleo y el gas, ya que el sistema petrolífero y sistema de hidrogeno natural tienen una analogía con sus componentes principales (roca generadora, roca reservorio, roca sello, trampa) como se muestra en la figura 4. La reciente exploración de hidrógeno natural en Australia, Francia, Brasil y otros países tienen como objeto un conjunto de técnicas para la exploración de

hidrógeno natural, evaluar más a fondo la producción, migración y sistema de trampa del hidrógeno natural, delinear el área objetivo de la exploración y establecer las bases para acelerar el desarrollo de nuevas energías.

Figura 4

Sistema de hidrogeno natural



Nota. Sistema de hidrogeno natural, donde se tiene una definición similar al sistema de hidrocarburos con roca madre, ruta de migración, la roca yacimiento, la roca de capa, la trampa y un sello. Tomado de A Mineral Systems Approach to Targeting Natural Hydrogen Deposits, por Villani, G, 2023, *Getech*. <https://getech.com/blog/hydrogen/a-mineral-systems-approach-to-targeting-natural-hydrogen-deposits/>

3. Reacciones Químicas en el Subsuelo: Generación de Hidrógeno blanco

La comprensión de la formación y almacenamiento de hidrógeno natural en el subsuelo requiere un enfoque interdisciplinario que abarque tanto los complejos procesos geológicos como reacciones químicas involucradas. Procesos clave como la serpentización y la radiólisis del agua juegan roles fundamentales en la generación de hidrógeno, influenciados por condiciones ambientales específicas que afectan directamente su concentración, movilidad y accesibilidad para extracción (Rigollet & Prinzhofer., 2022). Este estudio no solo se sumerge en la profundidad de estas dinámicas, destacando las propiedades físicas y químicas de las formaciones que favorecen la producción y retención de hidrógeno, sino que también explora una variedad de teorías y evidencias que apuntan hacia orígenes y mecanismos de formación diversificados y complejos del hidrógeno. Tal enfoque sienta una base sólida para futuras investigaciones, exploración y desarrollo en el emergente y multifacético campo del hidrógeno natural.

3.1 Serpentización

La serpentización es un proceso metamórfico esencial en la dinámica terrestre, caracterizado por la oxidación de rocas ultramáficas (es decir, rocas pobres en sílice) por el agua, especialmente a altas temperaturas. Este proceso ocurre cuando el agua reacciona con minerales ferromagnéticos, como el olivino, resultando en la formación de serpentina ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) (Hand, 2023).

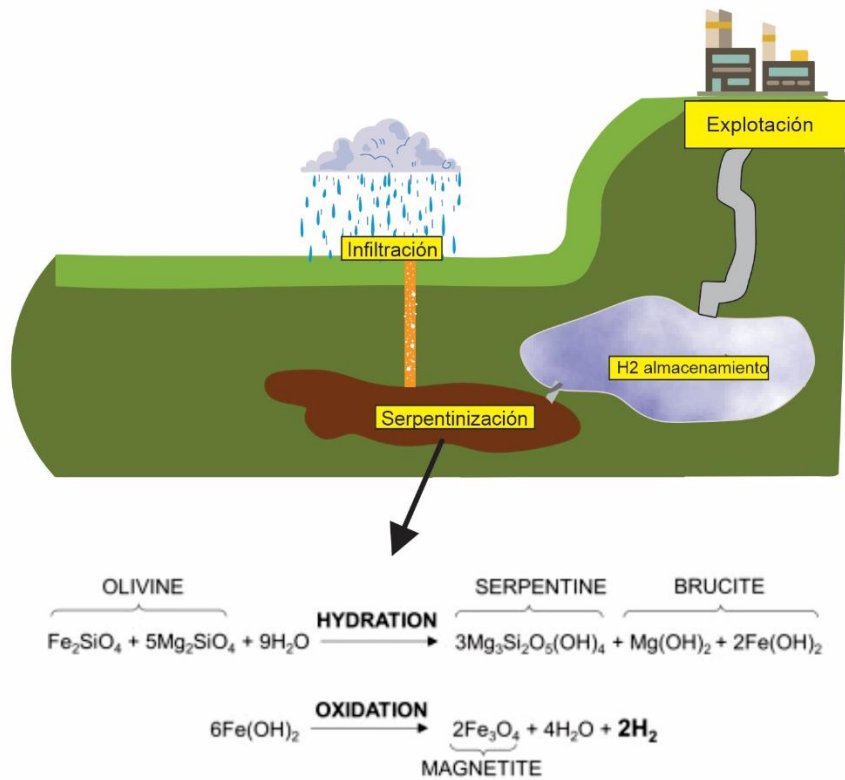
Es así como la figura 5 explica el proceso para la generación del hidrogeno a partir la serpentización del olivino, donde implica dos reacciones principales:

Hidratación: La hidratación del olivino produce nuevos minerales, como la serpentina ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) y la brucita ($Mg(OH)_2$) (Blay-Roger et al., 2024).

Oxidación: El hierro ferroso (Fe^{2+}) presente en la serpentina y brucita sufre un proceso de oxidación en presencia de agua y oxígeno. La oxidación del hierro ferroso da lugar a la formación de magnetita (Fe_3O_4) como producto principal y durante el proceso de oxidación, se libera hidrógeno (H_2) como subproducto (Antony J 2023). La liberación de hidrógeno es una consecuencia de la reacción química que ocurre entre el hierro ferroso y el agua.

Figura 5

La serpentización como puente hacia la generación de hidrogeno sostenible.



Nota. (Ruben, B., et al. (2024). Proceso de formación de hidrogeno a través de serpentización.

Se evidencia la liberación de hidrógeno como consecuencia de la reacción química que ocurre entre

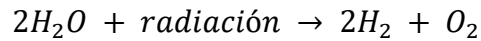
el hierro ferroso y el agua. Recuperado y modificado de Reseñas de energías renovables y sostenibles Volumen 189, Parte A. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113888>

La serpentización está influenciada por tres factores críticos: la temperatura, la presión y la relación masa agua-roca. Se ha observado que el proceso es más activo en un rango de temperatura de 200 a 310°C. Fuera de este rango, la velocidad de reacción se ve significativamente afectada; disminuye a temperaturas más bajas por limitaciones cinéticas y a temperaturas más altas por restricciones termodinámicas (McCollom & Bach, 2009). El agua no solo facilita la movilidad de los compuestos metálicos, sino que también actúa como un catalizador para las reacciones químicas involucradas en este proceso (Blay-Roger et al., 2024).

Este proceso no solo es fundamental para entender la generación de hidrógeno natural, sino que también la capacidad de estas formaciones para almacenar y transportar hidrógeno, ya que, el proceso a su vez afecta la composición química y la estructura física de las rocas involucradas, modificando propiedades clave como la porosidad y la permeabilidad. (Blay-Roger et al., 2024; McCollom & Bach, 2009).

3.2 Radiólisis del Agua

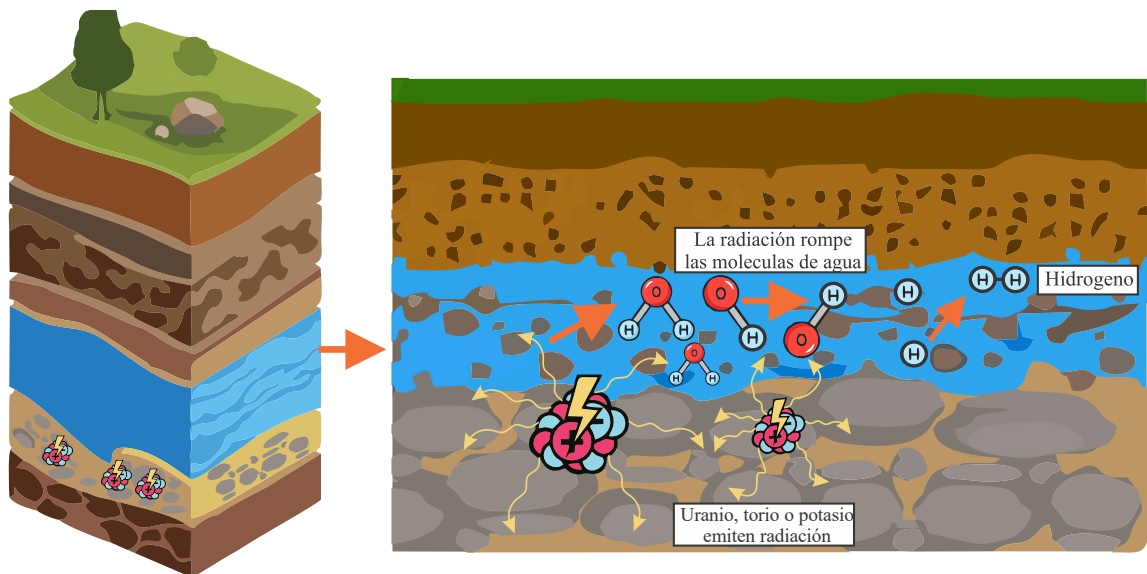
La radiólisis del agua es un proceso mediante el cual la radiación ionizante descompone las moléculas de agua en componentes más simples, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Este fenómeno ha sido reconocido como una fuente significativa de hidrógeno, impulsado por la desintegración radiactiva de elementos presentes en la corteza terrestre, tales como el potasio (K), uranio (U), y torio (Th) [Figura 6]. La conceptualización de la alteración de rocas por radiación ionizante se remonta a la década de 1930, propuesta inicialmente por VI Vernadsky (Vovk, 1982).



La presencia de materiales radiactivos en las rocas es un factor universal, lo que sugiere que la radiólisis puede ocurrir en una amplia gama de entornos geológicos. Donde, la eficacia en la generación de H₂ depende de la coexistencia de sustancias radiactivas con agua. En este sentido, cabe mencionar que se han encontrado altas concentraciones de hidrógeno en depósitos de sal de potasio donde la radiólisis del agua es impulsada por la desintegración de potasio (K) y el rubidio (Rb) (Bobk, 1978; Parnell y Blamey, 2017). Además, en experimentos con salmueras en comparación con agua pura, se han observado mayores rendimientos de hidrógeno, lo que indica que la composición del medio puede influir en la eficiencia de la radiólisis para generar H₂ (Wang et al., 2019).

Figura 6

Proceso de radiólisis del agua.



Nota: Plus, C., & Plus, C. (s. f.). Radiación emitida de núcleos rocosos que pueden romper las moléculas de agua. Tomado de La síntesis radiactiva del hidrógeno puede sostener vida extraterrestre. europapress.es. <https://www.europapress.es/ciencia/astronomia/noticia-sintesis-radiactiva-hidrogeno-puede-sostener-vida-extraterrestre-20170523110258.html>

3.3 Actividad Biológica

La actividad biológica también juega un papel crucial en la generación de hidrógeno natural. Una ilustración de esto se observa en la figura 7 donde la descomposición anaeróbica de la materia orgánica (Morita, 1999), la fermentación (Conrad, 1996), y la acción de bacterias fijadoras de nitrógeno (Conrad y Seiler, 1980) son procesos biológicos conocidos por su capacidad de producir hidrógeno. Estudios como los de Takai et al. (2004) y Gregory, Barnett, Field, & Milodowski (2019) evidencian la existencia de ecosistemas microbianos subterráneos capaces de generar hidrógeno, resaltando la importancia de los procesos bióticos.

Estas perspectivas sobre la generación y almacenamiento de hidrógeno en el subsuelo abren un amplio campo de investigación que abarca desde la geología profunda hasta la microbiología, donde los procesos abióticos y bióticos, junto con las interacciones geológicas a gran escala, juegan roles complementarios en la generación global del hidrógeno.

Los principales mecanismos que conducen a la formación de hidrógeno, involucrando diferentes bacterias, son la fijación y fermentación de nitrógeno. El primero ocurre en algunas bacterias, como las cianobacterias heterocísticas y no heterocísticas, que tienen una enzima especializada, la nitrogenasa, que cataliza la reducción de N_2 a NH_4^+ . Además, estas bacterias tienen otra enzima, la hidrogenasa, que oxida el H_2 liberado como subproducto.

Probablemente debido a los procesos bióticos, por ejemplo, en los hábitats marinos se observó que las concentraciones de hidrógeno estaban sobresaturadas. En todos estos ambientes, las concentraciones más altas se dieron en los primeros metros, disminuyendo hasta la termoclina

y alcanzando las concentraciones más bajas en los océanos profundos. A nivel mundial, los océanos tropicales y subtropicales parecen tener la cantidad más abundante de H_2 , mientras que la menor cantidad está presente en latitudes más altas. Sin embargo, se observó que la liberación de hidrógeno en los océanos depende de la radiación solar, mostrando un cambio diario con el pico máximo al mediodía. La fijación de nitrógeno, realizada por las cianobacterias, conduce a la producción de una molécula de H_2 .

Figura 7

Hidrogeno generado a partir de actividad biológica



Nota. (Teachers Bio. 2019). Esquema de la biosfera. Hidrogeno generado a partir de organismos biológicos Recuperado y modificado de Teachers-Bio.

<https://teachersbio.com.br/produto/combocamadasdaterra/>

3.4 Otras Reacciones de Minerales

Más allá de la radiólisis y la serpentización, diversas hipótesis proponen mecanismos alternativos para la formación de hidrógeno natural. Una de estas sugiere la formación de hidrógeno a partir de la reacción del agua con superficies de rocas a lo largo de zonas de fallas activas, donde la fricción de roca-falla crea nuevas superficies que pueden permitir la reacción del agua con minerales que contienen hierro [Fe] Wakita et al. (1980). Además, se respalda con experimentos que muestran la generación de hidrógeno durante el desplazamiento de rocas a lo largo de fracturas, así como por la combinación de agua con minerales in situ (Молчанов, 1968). Estas investigaciones sugieren la formación de hidrógeno a partir de la reacción entre partículas de hierro y agua.

3.5 Fracturación de rocas

La fracturación de rocas ya sea por actividad tectónica natural o inducida por el hombre, desempeña un papel crucial en la generación de hidrógeno natural. Durante este proceso, la ruptura de la roca rompe los enlaces químicos y genera radicales libres, como $\equiv\text{Si}\cdot$ y $\equiv\text{SiO}\cdot$. Como se muestra en la figura 8 esta reacción ocurre especialmente en áreas asociadas con fallas tectónicas, donde el movimiento de la falla durante la trituración de rocas aumenta la formación de radicales libres, que pueden reaccionar con el agua presente en el subsuelo para formar hidrógeno, de la siguiente forma: $2(\equiv\text{Si}\cdot) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2(\equiv\text{SiOH}) + \text{H}_2$. (Kita, I., Matsuo, S. y Wakita, H. 1982).

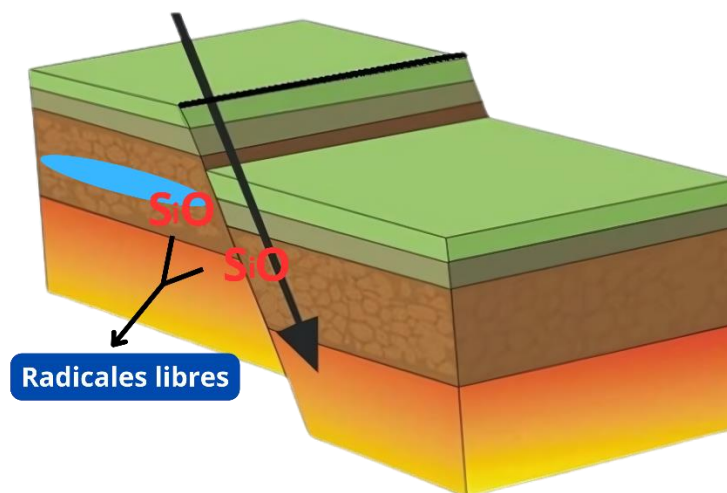
Las fuerzas mecánicas involucradas en la fracturación de rocas disocian los enlaces covalentes en minerales de silicato, produciendo radicales libres en la superficie de la roca. Estos radicales pueden recombinarse para formar enlaces siloxano o reaccionar con el agua para liberar

hidrógeno como subproducto. Este proceso, conocido como generación mecánica o médica de hidrógeno, puede ocurrir no solo en fallas tectónicas, sino también en cualquier lugar donde se trituraren rocas de silicato. (Jon, et al. 2015).

Además de la actividad tectónica, otros procesos que causan la fragmentación de las rocas, como la congelación-descongelación, la expansión térmica y la erosión, también pueden contribuir a la generación de hidrógeno, aunque su eficacia en este sentido aún no está clara.

Figura 8

Fracturación de roca producida por actividad tectónica



Nota. Ramos, Wilmar & Moreno-Murillo, Juan. (2013). Falla producida por una fracturación de roca. Recuperado y modificado de Enseñanza de la Ley de Hooke a partir de la deformación en rocas, asistido con laboratorio convencional-virtual. https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-2-Falla-producida-por-fractura-en-la-roca_fig2_341056569

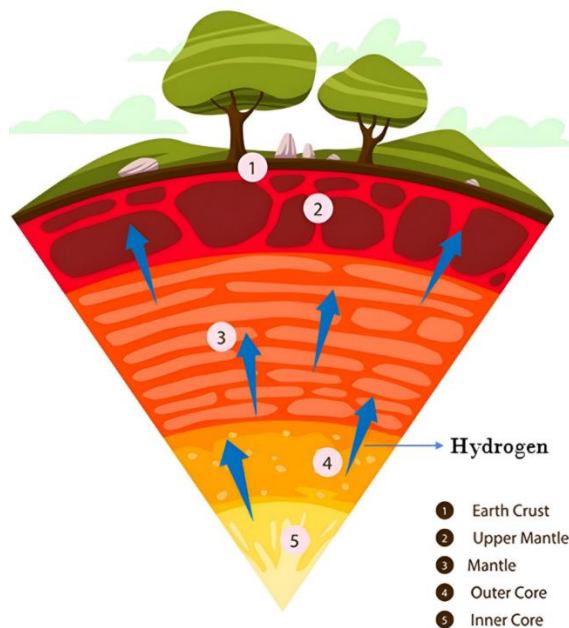
3.6 Hidrógeno de origen profundo. – (“Deep-seated hydrogen”)

El término se emplea para describir el hidrógeno generado en el manto o el núcleo terrestre, respaldado por diversos estudios que confirman la existencia de una fuente de hidrógeno en dichas zonas. Asimismo, esta hipótesis sugiere que el hidrógeno fue acumulado en el subsuelo y luego liberado desde el núcleo hacia el manto inferior como se observa en la figura 9 (Qian N, et al., 2022). En este sentido el hidrógeno derivado de procesos magmáticos y de la desgasificación del manto de la Tierra migra habitualmente a través del subsuelo hasta la superficie de la Tierra (Toulhoat y Zgonnik 2022).

Además, el H₂ se detecta con mayor frecuencia y en concentraciones más altas en gases provenientes de mayores profundidades. (Viacheslav Z., 2020).

Figura 9

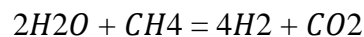
Hidrogeno generado en el núcleo o manto terrestre



Nota. (Anton. 2022). Estructura capas de la tierra. Recuperado y modificado de shutterstock.
<https://www.shutterstock.com/es/image-vector/earth-layers-structure-geography-infographic-planet-2113460159>

3.7 Hidrogeno a partir del magma

La desgasificación del magma es un proceso crucial que contribuye a la formación de hidrógeno natural en la corteza terrestre. En los sistemas de magma, el hidrógeno se genera mediante la reacción del agua y el metano, lo que da como resultado la producción de hidrógeno y dióxido de carbono. Esta reacción es particularmente significativa en sistemas de magma carbono-oxígeno-hidrógeno (COH), donde las altas temperaturas (1200 °C) favorecen el desplazamiento del equilibrio hacia la derecha, promoviendo la producción de hidrógeno.



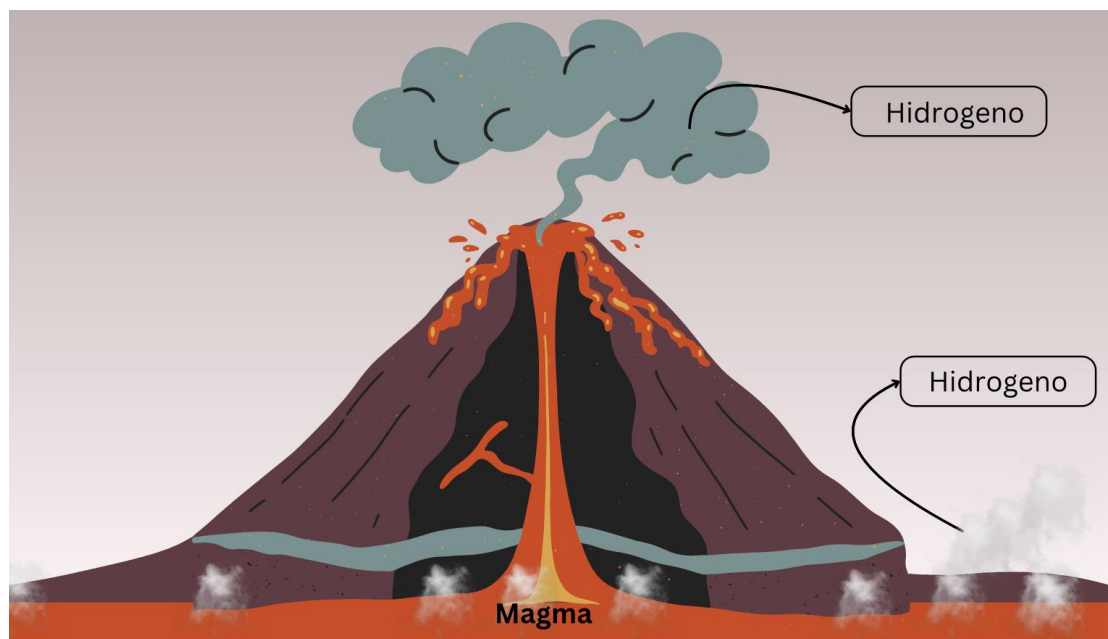
El hidrógeno se encuentra en el magma como un gas disuelto, y su concentración aumenta con la profundidad y la temperatura. En la figura 10 se muestra como durante el ascenso del magma a la superficie, el hidrógeno se libera gradualmente como burbujas de gas, la concentración de hidrógeno en el magma puede variar considerablemente dependiendo de la composición del magma y las condiciones de enfriamiento. El hidrógeno en el magma se origina principalmente a partir de la descomposición de agua y otros compuestos hidratados durante la fusión de las rocas. La presencia de agua en el magma es crucial para la formación de hidrógeno, ya que el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno a altas temperaturas y presiones. Además, el hidrógeno también puede formarse a partir de la reducción de compuestos ricos en oxígeno, como los silicatos y los óxidos de hierro, durante la fusión de las rocas.

La concentración de hidrógeno en el magma puede tener importantes implicaciones geológicas y geofísicas. Por ejemplo, la liberación de hidrógeno durante la erupción volcánica puede influir en la dinámica del flujo de magma y la formación de depósitos minerales. Además, la presencia de hidrógeno en el magma puede afectar la composición y la estructura de los minerales que se forman durante el enfriamiento y la solidificación del magma.

La actividad volcánica se clasifica en función del grado de explosividad y está controlada por la cantidad de gas presente en el magma; a medida que aumenta es mayor la explosividad resultante. El magma contiene gases disueltos con una proporción en peso que puede llegar al 5%; en algunos casos puede incorporar agua procedente del mar o de acuíferos, que se traduce en un incremento del gas disponible. Los componentes principales del gas volcánico son: agua (H_2O , casi el 80% del total), dióxido de carbono (CO_2), anhídrido sulfuroso (SO_2), y ácido sulfhídrico (H_2S) y ya en mucha menor proporción hidrógeno (H_2), cloro (Cl), flúor (F), etc.

Figura 10

Hidrogeno producido a partir del magma.



Nota. (Josefina B., 2022). Esquema de volcán. Se observa como a partir del magma es producido el hidrogeno. Recuperado y modificado de ecología verde.

<https://www.ecologiaverde.com/diferencia-entre-magma-y-lava-3635.html>

Para entender mejor estos procesos, se ha elaborado la tabla 1 "Síntesis de diferentes procesos de formación de hidrógeno natural" ofrece un resumen de cómo se generan estos fenómenos presentes en la naturaleza y se da un ejemplo de la reacción química de la misma, basándose en una revisión exhaustiva de la literatura científica. Asimismo para un apoyo visual sobre la tabla 1 se ilustra los procesos principales en la figura 11 "Origen de hidrógeno en la Tierra" de la formación de hidrógeno en el subsuelo mediante radiólisis, serpentinización y orígenes profundamente arraigados. Asimismo, para dar un resumen de las Generalidades de los fenómenos que dan origen al hidrogeno blanco se plantea la tabla 2 donde se detalla la composición de la roca, rangos de temperatura y concentración de hidrógeno blanco generado de cada fenómeno. Estas herramientas, combinadas, ofrecen una comprensión integral de los procesos de formación de hidrógeno natural, facilitando su estudio y posible aprovechamiento en aplicaciones industriales y energéticas.

Tabla 1

Síntesis de diferentes procesos de formación de hidrogeno natural

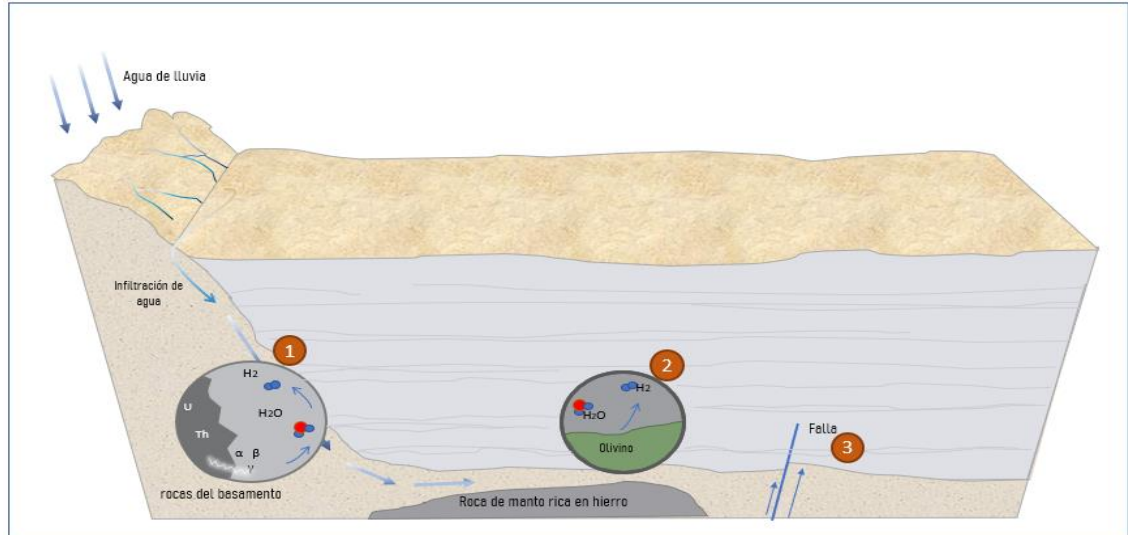
Fenómeno	Descripción	Reacción química
Serpentinización	El agua reacciona con las rocas ricas en hierro a altas temperaturas para producir hidrógeno. Este proceso ocurre cuando el agua interactúa con minerales ferromagnéticos, dando como resultado a la formación de la serpentina, produciendo hidrogeno en el proceso	$3\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

Radiólisis del agua	Las rocas con elementos radiactivos como el potasio (K), uranio (U), y torio (Th) emiten radiación que puede dividir el agua en hidrógeno (H ₂) y oxígeno (O ₂). Las rocas antiguas tienen más probabilidades de generar hidrógeno debido a que el proceso es lento.	$2H_2O + \text{radiación} \rightarrow 2H_2 + O_2$
Actividad biológica	La descomposición anaeróbica de la materia orgánica, la fermentación, y la acción de bacterias fijadoras de nitrógeno son procesos biológicos conocidos por su capacidad de producir hidrógeno.	$N_2 + 16ATP + 8e^- + 8H^+ \rightarrow 2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16P_i$
Reacciones de minerales	La interacción del agua con superficies de rocas a lo largo de zonas de fallas activas	$Fe + H_2O \rightarrow FeO + H_2$
Fracturación de rocas	La fracturación de rocas, tanto por actividad tectónica como inducida, genera radicales libres que reaccionan con el agua para producir hidrógeno natural. Este proceso, ocurre especialmente en áreas de fallas tectónicas activas	$2(\equiv Si\cdot) + 2H_2O \rightarrow 2(\equiv SiOH) + H_2$
Origen profundo	Hidrógeno generado a altas temperaturas en el manto o el núcleo terrestre, liberándose hacia la superficie	
Desgasificación de magma	El hidrógeno se encuentra en el magma como un gas disuelto, y su concentración aumenta con la profundidad y la temperatura. Durante la ascensión del magma a la superficie, el hidrógeno se libera gradualmente como burbujas de gas.	$2H_2O + CH_4 \rightarrow 4H_2 + CO_2$

Nota. Esta tabla resume los distintos procesos de formación de hidrógeno natural presentes en la naturaleza. La información se basa en una revisión exhaustiva de la literatura científica actualizada hasta el 2024.

Figura 11

Origen de hidrogeno en la tierra



1. Radiólisis, 2. Serpentinización 3. Profundamente arraigado

Nota. El gráfico representa la formación del hidrogeno en el subsuelo a través de la radiólisis, serpentinización y profundamente arraigado. Tomado y modificado de *Hidden Hydrogen*, por Eric Hand, 2023, Science. doi: [10.1126/science.adh1460](https://doi.org/10.1126/science.adh1460).

Tabla 2

Generalidades de los fenómenos que dan origen al hidrogeno blanco

Fenómeno	Temperaturas	Composición de roca	Concentración de H2
Serpentinización	150°C - 300°C	Minerales ferromagnesianos	15,7% – 97 % Promedio de 52.5 %
Radiólisis del agua	Esta ocurre en un rango de temperaturas desde 0°C hasta temperaturas superiores a 100°C, dependiendo de las condiciones del entorno y la presencia de material radiactivo.	Rocas con elementos radiactivos que incluyan isótopos de uranio, torio, potasio, entre otros.	3.3 % - 21% Promedio de 13.02 %
Actividad biológica	Puede ocurrir en una amplia gama de temperaturas, desde condiciones moderadas hasta extremadamente calientes, dependiendo de los microorganismos involucrados y las condiciones del entorno.	Rocas sedimentarias orgánicas, como lutitas y esquistos, que contienen materia orgánica en descomposición.	0.1% - 30% Promedio de 15.05%
Reacciones de minerales	Esta reacción puede ocurrir a temperaturas, generalmente entre 200°C y 400°C	Minerales ferromagnesianos, basaltos, Peridotitas	10.8 % - 68.6% Promedio de 27.9 %
Fracturación de rocas	Dependiendo de las formaciones geológicas, la fracturación puede ocurrir a temperaturas entre 50°C y 150°C. En sistemas volcánicos activos, estas temperaturas pueden superar los 300°C.	Rocas ígneas: Como las volcánicas con minerales como feldespatos, piroxenos y hornblenda. Rocas sedimentarias: ricas en materia orgánica o minerales como la pirita. Rocas ultramáficas: Como las peridotitas, o ricas en minerales ferromagnesianos.	0.05% - 13.3% Promedio de 7.6%
Origen profundo	Estos procesos pueden ocurrir a temperaturas superiores a 200°C.	Rocas ígneas ricas en minerales ferromagnesianos como el olivino, las peridotitas.	7.3 % - 34.7% Promedio de 23,7 %
Desgasificación de magma	Puede comenzar alrededor de 600°C y alcanzar temperaturas superiores a	Las rocas ígneas como basaltos, andesitas o riolitas,	6% - 82.6% Promedio de

1200°C, dependiendo de factores relacionados de la actividad volcánica.	dependiendo del tipo de volcán y las condiciones geológicas.	35.8 %
-------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------	--------

Nota. Esta tabla reúne las generalidades como temperatura, composición de roca y concentración de hidrogeno de los fenómenos que generan el hidrógeno natural. La información se basa en una revisión exhaustiva de la literatura científica actualizada hasta el 2024.

4. Presencia de hidrogeno

Esta revisión aborda la clasificación y analiza los descubrimientos de hidrógeno natural basándonos en tres categorías principales: hidrógeno como gas libre, hidrógeno como inclusiones e hidrógeno como gas disuelto en agua. Esta categorización se elaboró en la tabla 3 para proporcionar un enfoque sistemático y comprensible para el estudio de diferentes formas en las que el hidrógeno aparece en la naturaleza, lo que ayuda a delinear patrones y características comunes entre los distintos hallazgos.

4.1 Hidrogeno libre

El hidrógeno libre se produce en la naturaleza a través de diversos procesos, incluyendo la descomposición de agua y otros compuestos hidratados durante la fusión de las rocas, la reducción de compuestos ricos en oxígeno durante la fusión de las rocas y la actividad microbiana (Viacheslav Z., 2020). El hidrógeno libre también se produce en procesos geológicos, como la serpentinización, en la que las rocas ricas en agua y minerales reaccionan con el magma y producen hidrógeno.

El hidrógeno libre tiene importantes implicaciones geológicas y geofísicas, ya que puede influir en la dinámica del flujo de magma y la formación de depósitos minerales. Además, el

hidrógeno libre puede afectar la composición y la estructura de los minerales que se forman durante el enfriamiento y la solidificación del magma (Qian N, et al., 2022). El hidrógeno libre también puede ser una fuente de energía renovable importante en el futuro, ya que puede ser producido a partir de agua y energía solar o eólica.

Además, el hidrógeno libre también puede ser gran fuente de energía, ya que es altamente inflamable y explosivo en concentraciones elevadas. Por lo tanto, es importante tener protocolos al manejar hidrógeno libre y garantizar que se almacene y transporte de manera segura.

4.2 Hidrogeno en inclusiones

Las inclusiones de fluidos naturales en minerales, especialmente en cuarzo, ofrecen valiosa información sobre los sistemas de drenaje geológico. En diversos entornos geológicos, se han identificado inclusiones fluidas que contienen hidrógeno (Lu Wang et al., 2023). Este elemento se ha encontrado en inclusiones de muestras de kimberlita tubular, provenientes de rocas ultrabásicas, precámbricas, ígneas y volcánicas, así como en cuerpos minerales, cuencas de carbón, rocas sedimentarias y metamórficas, y depósitos de sal. Los análisis muestran que las concentraciones de hidrógeno en estas inclusiones pueden variar considerablemente, desde un mínimo del 0,2% hasta el 100% (Viacheslav Z., 2020).

Smith y sus colegas examinaron inclusiones minerales en grandes diamantes, encontrando astillas de metal de hierro rodeadas de gases reductores, lo que sugiere que estos diamantes se formaron a partir de metal líquido en el manto terrestre. Estas inclusiones proporcionan evidencia directa de una reacción de precipitación de metales que ha sido sospechada durante mucho tiempo y que indica un manto más reductor (Viacheslav Z., 2020). En otras muestras, se detectó hidrógeno

junto con señales intensas de CH₄, y el análisis de los mapas Raman reveló que estos gases se concentraban en el núcleo de las inclusiones.

Además, un estudio realizado en el macizo de peridotita de Lanzo en los Alpes italianos identificó inclusiones fluidas de CH₄ y H₂ atrapadas en un cristal de calcita (Lu Wang et al., 2023). En la zona del rift, los minerales también contienen inclusiones de gas con un alto contenido de hidrógeno. En el rift oceánico, se encontró que la concentración promedio de hidrógeno en estas inclusiones era del 21,4%, con más detecciones en inclusiones presentes en rocas de edad precámbrica (Lu Wang et al., 2023).

4.3 Hidrogeno disuelto en agua

El hidrógeno disuelto en el agua subterránea se refiere a la presencia de gas hidrógeno (H₂) en el agua que llena los poros y fracturas de las rocas del subsuelo. El hidrógeno se puede disolver en el agua subterránea debido a diversos procesos naturales, como las interacciones agua-roca, la actividad microbiana y las actividades geológicas (Viacheslav Z., 2020).

La presencia de hidrógeno en aguas subterráneas se ha observado en diferentes entornos geológicos, incluidas áreas asociadas con actividad tectónica reciente, fallas profundas y áreas de rift. Se han encontrado concentraciones más altas de hidrógeno en el agua subterránea en áreas con actividad tectónica reciente, donde se observa gas hidrógeno libre en los pozos de monitoreo de agua subterránea (Lu Wang et al., 2023).

Las concentraciones de hidrógeno en el agua subterránea pueden variar desde cantidades traza hasta decenas de un por ciento, y hay un claro aumento en el número de casos en que las concentraciones de hidrógeno aumentan con la profundidad del muestreo (Viacheslav Z., 2020). La concentración de hidrógeno en el agua subterránea se mide utilizando diversas técnicas

analíticas, como la cromatografía de gases y la espectrometría de masas. Estas técnicas permiten medir la concentración de hidrógeno en forma de gas disuelto en el agua subterránea (Viacheslav Z., 2020).

Tabla 3

Presencia de hidrogeno en diferentes lugares de la naturaleza

Forma de hidrógeno	Lugar de hallazgo
Gas libre	Gas volcánico
	Yacimientos
	Aguas termales
	Fallas
	Campos de petróleo y gas
En inclusiones	En rocas precámbricas
	En rocas ultra básicas
	En rocas ígneas
	En rocas volcánicas
Gas disuelto en agua	Campos de hidrocarburos
	Agua subterránea
	En aguas de rocas fracturadas

Nota. Esta tabla evidencia la aparición de diferentes tipos de hidrogeno albergado en la naturaleza. Tomado y modificado de The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen, por Lu Wang et al., 2023.

5. Hidrogeno blanco en el subsuelo: Almacenamiento y Entrampamiento

Las características físicas de las formaciones subterráneas, incluyendo los tipos de roca y sus propiedades específicas, juegan un papel fundamental en la generación, almacenamiento y movilidad del hidrógeno natural. Estas características determinan no solo la capacidad de las formaciones para producir hidrógeno sino también su eficiencia en retenerlo y permitir su flujo hacia lugares accesibles para su extracción.

El almacenamiento de hidrógeno en el subsuelo se centra en la capacidad de ciertas formaciones geológicas para actuar como reservorios o trampas para el gas. La porosidad y la permeabilidad son factores cruciales que determinan la cantidad de hidrógeno que puede ser almacenada y cómo se mueve dentro de estos reservorios. Los lugares con alta porosidad y baja permeabilidad pueden retener grandes volúmenes de hidrógeno (Zgonnik, 2020).

5.1 Tipos de Roca y su Importancia en la Generación y Almacenamiento de Hidrógeno

La roca serpentinizada, se forma a partir de rocas ígneas ultramáficas a través del proceso de serpentización que involucra reacciones químicas que transforman los minerales originales (olivino y piroxenos) en minerales del grupo de la serpentina y otros como la magnetita y cromita que actúan como catalizadores, acelerando las reacciones y aumentando la producción de hidrógeno y con una composición química general rica en Magnesio (Mg), Silicio (Si), Oxígeno (O), Agua (H₂O). Además, la porosidad y la textura de las rocas serpentinizadas facilitan el almacenamiento y la movilidad del hidrógeno, convirtiéndolas en reservorios potenciales de este gas (Charlou et al., 2010).

Asimismo, Las rocas ígneas como los basaltos pueden albergar hidrógeno producido biogénicamente o a través de la radiólisis del agua (Lin et al., 2005), las rocas que producen

hidrógeno a través de la radiólisis suelen contener minerales radiactivos, como el uranio, el torio y el potasio-40 que emiten radiación alfa, beta y gamma, que pueden inducir la radiólisis. La radiación emitida por estos elementos ioniza el agua presente en las rocas, lo que provoca la ruptura de las moléculas de agua y la liberación de hidrógeno y oxígeno. Su estructura porosa y fracturas naturales ofrecen caminos para la circulación y almacenamiento del hidrógeno.

Entre las estructuras geológicas adecuadas para el almacenamiento de hidrógeno, las cavernas salinas han demostrado ser una opción viable debido a su capacidad de sellado y estabilidad (Gonzales, 2024; Tarkowski, 2019). También se consideran los yacimientos agotados de petróleo y gas, así como los acuíferos y las cuencas carboníferas, que pueden ofrecer ventajas por su infraestructura existente y geología favorable.

El entrapamiento del hidrógeno en el subsuelo, por otro lado, implica mecanismos geológicos que mantienen el gas confinado. Estructuras como anticlinales y fallas, la absorción y adsorción en rocas, y la presencia de capas impermeables contribuyen a la retención del hidrógeno en el subsuelo (Levshounova, 1991). Un ejemplo de lo anterior se observa en estructuras anticlinales que actúan como trampas naturales para el hidrógeno. Al igual que el agua busca el nivel más bajo, el hidrógeno tiende a migrar hacia arriba a través de las capas porosas de la roca. Sin embargo, cuando encuentra una capa impermeable por encima como la dolerita roca sello que se evidencia en la litología del yacimiento de malí, queda atrapado en la parte convexa del anticlinal, formando una acumulación. El estudio de estos mecanismos es esencial para diseñar estrategias eficaces de explotación y almacenamiento del hidrógeno blanco.

5.1.1 Impacto en el Almacenamiento y Movimiento del Hidrógeno

La porosidad permite que las formaciones subterráneas actúen como reservorios de hidrógeno, mientras que la permeabilidad determina la movilidad del hidrógeno dentro de estos

reservorios y hacia la superficie o hacia pozos de extracción. Formaciones con alta porosidad, pero baja permeabilidad puede contener grandes cantidades de hidrógeno, pero serán menos eficaces para su extracción. Idealmente, las formaciones destinadas al almacenamiento y extracción de hidrógeno deben tener alta porosidad y permeabilidad (Молчанов, 1981). La Figura 12 ilustra esta relación entre porosidad y permeabilidad, mostrando cómo la estructura porosa de una roca influye en su capacidad para almacenar y permitir el flujo de hidrógeno.

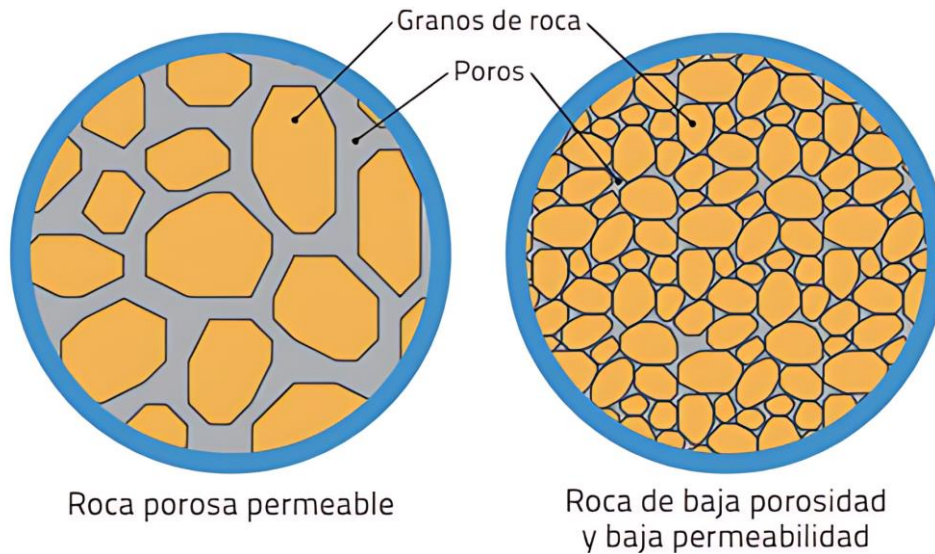
Por último, en la literatura se han informado algunos casos de hidrogeno en rocas sedimentarias, ya que estas rocas tienen en su mayor parte una alta porosidad y permeabilidad. Sin embargo, algunos experimentos de laboratorio sobre la saturación de hidrogeno en rocas clásticas y carbonatadas muestran que la roca puede absorber cantidades muy grandes de hidrógeno y no liberarlo durante días. (Zgonnik, 2020)

En un estudio reciente, se expusieron areniscas a H₂ puro para evaluar sus propiedades como posible roca reservorio para el almacenamiento subterráneo de hidrogeno. Las Areniscas y Calizas pueden ser importantes para almacenar por su porosidad y permeabilidad. Aunque no generan hidrógeno directamente, su estructura permite acumular el hidrógeno migrado desde otras fuentes (Levshounova, 1991).

Cada tipo de roca contribuye de manera única al ciclo del hidrógeno en el subsuelo. Mientras que algunas rocas son fuentes primarias de hidrógeno debido a sus propiedades químicas y reacciones específicas, otras sirven como almacenes o conductos a través de los cuales el hidrógeno puede fluir o ser retenido. La identificación y comprensión de estas rocas y sus propiedades es crucial para el desarrollo de estrategias para la explotación del hidrógeno natural como recurso energético.

Figura 12

Permeabilidad y porosidad para almacenamiento de hidrogeno



Nota. La ilustración muestra cómo la porosidad (espacios vacíos) y la permeabilidad (conectividad entre los espacios vacíos) influyen en la capacidad de una roca para almacenar y permitir el flujo de fluidos, como el hidrógeno. Recuperado y modificado de Perfoblogger <https://perfoblogger.wordpress.com/2020/03/28/porosidad-de-las-rocas-en-los-yacimientos-no-convencionales/>

5.2 Almacenamiento del hidrogeno

En la actualidad, se consideran como las opciones más destacadas para el almacenamiento de hidrógeno: las cavernas salinas, los yacimientos agotados de petróleo y gas, así como las cuencas carboníferas.

5.2.1 Cavernas salinas

Las cavernas de sal (cámaras artificiales creadas en depósitos de sal) son adecuadas para almacenar diversas sustancias, especialmente gases a alta presión. El gas se almacena en cámaras lixiviadas en sal: un lecho de sal o un domo de sal.

Los especialistas han indicado que el almacenamiento de hidrógeno en cavernas de sal es comparable al de gas natural, petróleo y otros compuestos químicos. La considerable profundidad de estos depósitos de sal permite la creación de instalaciones subterráneas con gran capacidad de almacenamiento. Las características intrínsecas de la sal aseguran la estabilidad a largo plazo y la estanqueidad del almacenamiento, ya que poseen un excelente sellado y baja permeabilidad, lo que impide la filtración de gases y líquidos, como se ilustra en la figura 13 (Ini, 2022).

Además, la sal presenta propiedades mecánicas notables, incluyendo plasticidad y fluencia. La plasticidad permite que la sal se deforme lentamente bajo presión sin sufrir fracturas, mientras que la fluencia se refiere a una deformación continua bajo carga constante. Estas propiedades son cruciales, ya que permiten que la sal se "selle" sobre sí misma en caso de pequeñas fracturas o deformaciones, garantizando así la estanqueidad y el almacenamiento seguro del gas (Vázquez, 1997).

Por otro lado, la sal es químicamente inerte en relación con el hidrógeno, lo que significa que no reacciona con él ni con otros compuestos presentes en la caverna, asegurando que el hidrógeno se mantenga puro y libre de contaminantes. Esto la convierte en un medio ideal para el almacenamiento de hidrógeno, contribuyendo a la viabilidad de su uso como fuente de energía renovable en el futuro (Roca, 2019).

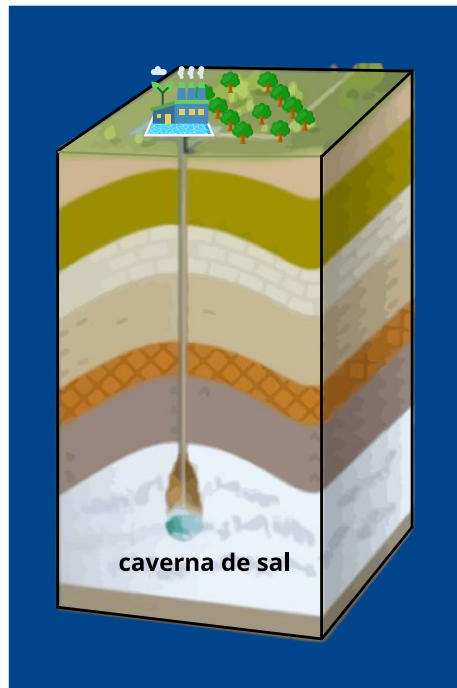
Los investigadores para indicar el éxito de una caverna salina tienen en cuenta: capacidad de almacenamiento que es el volumen de hidrógeno que puede almacenarse en la caverna, pureza

del hidrogeno que es el monitoreo de contaminantes que puede tener el gas almacenado, perdida por fuga que es miden las pérdidas de hidrógeno a través de las paredes de la caverna o por otras vías para evaluar la estanqueidad del almacenamiento, ciclos de carga y descarga que es el número de ciclos de carga y descarga que la caverna puede soportar sin una pérdida significativa de capacidad o un deterioro de su integridad estructural.

En la elección de un sitio para el almacenamiento subterráneo de depósitos de sal, varios factores son cruciales. Primero, se considera la forma y profundidad del lugar, así como el espesor de los lechos de sal y la distribución de las rocas en el depósito. Es fundamental que estas rocas sean adecuadas en composición y distribución para garantizar la seguridad y la estabilidad del almacenamiento. Además, se evalúa la solubilidad de las rocas, ya que intercalaciones de rocas no salinas o sales altamente solubles de potasio y magnesio podrían comprometer la estanqueidad del sitio, facilitando la migración del gas almacenado.

La profundidad del sitio también es un factor determinante. La profundidad adecuada para almacenar hidrógeno en cavernas de sal varía entre 500 y 1500 metros (Bellini, 2020), un rango considerado óptimo por varias razones. A estas profundidades, la presión es suficiente para una densidad adecuada del hidrógeno, la temperatura se mantiene en niveles manejables y la integridad de la caverna se preserva gracias a las propiedades de autosellado y plasticidad de la sal. Además, los costos de perforación y mantenimiento son razonables, y se minimizan las interferencias con otras actividades subterráneas, garantizando la seguridad del almacenamiento.

las cavernas de sal son la opción más comúnmente utilizada para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno debido a su alta capacidad de sellado. Sin embargo, otros entornos geológicos, como acuíferos salinos y rocas porosas, también pueden ser útiles con las medidas adecuadas de seguridad y contención.

Figura 13*Almacenamiento de hidrogeno Caverna de sal*

Nota. (Solarpedia. (s.f). Ilustración de almacenamiento de hidrogeno por medio de caverna de sal, donde se aprovechan las formaciones geológicas naturales de sal, que ofrecen una estructura estable y sellada. Recuperado y modificado de Hidrógeno verde. https://www.solarpedia.info/hidrogeno-verde/#Almacenamiento_geologico

5.2.2 Yacimientos de petróleo y gas

Los yacimientos agotados de gas natural, después de haber cumplido su función inicial como fuentes de energía, se presentan como una alternativa prometedora para el almacenamiento a gran escala de hidrógeno (H_2). Así como se ilustra en la figura 14, estos yacimientos suelen contar con infraestructura el subsuelo, como las perforaciones individuales (pozos) que permiten

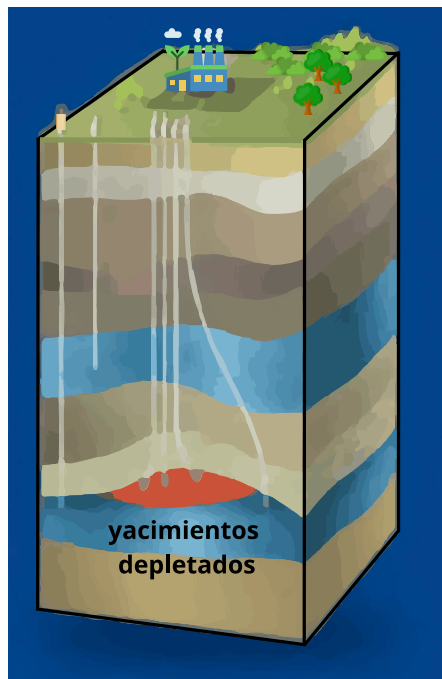
alcanzar en el subsuelo petróleo y gas y las tuberías que conectan los pozos entre sí y transportan los fluidos extraídos a la superficie. De acuerdo con lo anterior, los convierte en candidatos ideales para la adaptación a instalaciones de almacenamiento de hidrógeno (Muhammed, y otros, 2022).

Sin embargo, su viabilidad como sitios de almacenamiento de hidrógeno está condicionada por criterios geológicos que deben satisfacerse. Entre estos criterios se incluyen aspectos como la porosidad y permeabilidad del yacimiento, que determinan su capacidad para contener y liberar el H₂ de manera eficiente. Además, se deben considerar la integridad estructural del depósito, la presencia de capas impermeables que eviten la fuga de gas (Tarkowski, 2019).

Para garantizar la seguridad y eficacia del almacenamiento de hidrógeno en yacimientos agotados de gas natural, se requiere un análisis exhaustivo de la geología del sitio, así como la implementación de tecnologías y prácticas adecuadas de gestión y monitoreo. Estas medidas son esenciales para mitigar los riesgos asociados con el almacenamiento de un gas altamente inflamable y contribuir al desarrollo sostenible de la industria del hidrógeno como una fuente clave de energía limpia en el futuro (zgonnik, 2020).

Figura 14

Almacenamiento de hidrogeno en campos de hidrocarburo y gas agotados



Nota. (Solarpedia. (s.f.). Se ilustra como un campo de hidrocarburo y gas agotado que cuentan con infraestructura como pozos y tubería puede ser utilizado para el almacenamiento de hidrogeno. Recuperado y modificado de Hidrógeno verde.

https://www.solarpedia.info/hidrogeno-erde/#Almacenamiento_geologico

5.2.3 Acuíferos

Los acuíferos son formaciones rocosas porosas y permeables que contienen agua dulce o salina (a mayores profundidades). Son comunes en todas las cuencas sedimentarias del mundo y ofrecen una alternativa viable para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno en áreas donde no existen depósitos de hidrocarburos agotados o cavernas de sal disponibles. (Tarkowski, 2019)

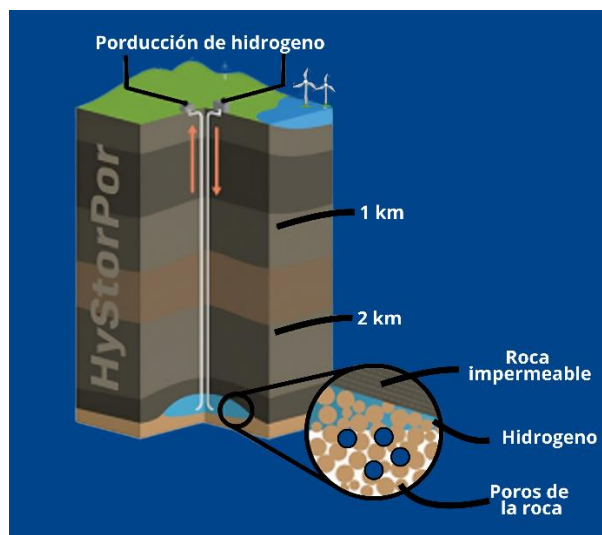
El almacenamiento de hidrógeno en acuíferos profundos es similar al de los depósitos agotados de petróleo y gas. Para establecer una instalación de almacenamiento subterráneo, es

crucial cumplir con condiciones geológicas fundamentales: las rocas seleccionadas para almacenar el hidrogeno deben tener buenas características de yacimiento como la heterogeneidad que ayuda a mejorar la capacidad de almacenamiento, y deben estar cubiertas por capas de roca impermeable que eviten la migración del gas almacenado. (Muhammed, y otros, 2022).

La figura 15 representa una simplificación de cómo se almacena el hidrógeno en un acuífero subterráneo donde ilustra el Acuífero: una formación geológica subterránea compuesta de rocas con espacios vacíos, capas impermeables: capas superiores de roca impermeable como la arcilla o la sal. Estas capas actúan como una barrera, evitando que el hidrógeno se escape hacia la superficie, pozos: perforaciones verticales que atraviesan las capas para la extracción del gas cuando se necesite y el hidrogeno: burbujas dentro del acuífero que simbolizan el hidrogeno almacenado.

Figura 15

Almacenamiento de hidrogeno por acuíferos



Nota. (Mosquera, 2021). Almacenamiento de hidrogeno por medio de acuíferos. Recuperado y modificado de Energías renovables. <https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/el-almacenamiento-subterraneo-de-hidrogeno-a-20210129>

La siguiente tabla 4 presenta una comparación detallada de las opciones más prometedoras para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno: acuíferos profundos, campos de petróleo y gas agotados y cavernas de sal. Cada opción se evalúa en función de criterios geológicos y técnicos clave, como la prevalencia en diversas cuencas sedimentarias, la profundidad óptima de los depósitos, la litología requerida y la capacidad de almacenamiento. Además, se considera la experiencia existente en cada tipo de almacenamiento y la disponibilidad de infraestructuras asociadas. Esta información es fundamental para seleccionar el método de almacenamiento más adecuado en función de las características geológicas de una región específica y los requerimientos de una determinada aplicación. Además, ofrece un análisis comparativo de las principales opciones para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno.

Tabla 4

Aspectos geológicos, técnicos, relevantes de diversas opciones para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno.

<i>Ocurrencia</i>	<i>Acuíferos profundos</i>	<i>Campos de petróleo y gas agotados</i>	<i>Cavernas de sal</i>
<i>La profundidad de los depósitos.</i>	Prevalencia en todas las cuencas sedimentarias	Trampas que acumulan hidrocarburos	Prevalencia en muchas cuencas sedimentarias
<i>Litología del sitio de almacenamiento y caprock.</i>	Varias profundidades, óptimamente hasta 2000 m	Varias profundidades, óptimamente hasta 2000 m	Varias profundidades, óptimamente hasta 1500 m
<i>Capacidad de almacenamiento</i>	Rocas de yacimiento con alta porosidad y alta permeabilidad, rocas de techo que proporcionan sello, no agrietadas	Rocas de yacimiento con alta porosidad y alta permeabilidad, rocas de techo que proporcionan sello, no agrietadas	Depósitos de sal espesos; Los lechos de sal parecen más apropiados
<i>Experiencia reciente en todo el mundo</i>	Muy alto y alto	Alto y muy alto. Cerca de la cantidad de gas explotado	Alto. Correspondiente al volumen de una caverna o de un grupo de cavernas.
<i>Disponibilidad de estructuras geológicas e infraestructura existente.</i>	No hay experiencia con el almacenamiento de hidrógeno puro. Numerosos depósitos subterráneos de gas natural funcionan con éxito	No hay experiencia con el almacenamiento de hidrógeno puro. Numerosos depósitos subterráneos de gas natural funcionan con éxito	Experiencia positiva con el almacenamiento de hidrógeno y otros gases.
	Disponibilidad de acuífero profundo con condiciones geológicas favorables suficientemente reconocidas, normalmente cerca de los usuarios finales. Sin infraestructura en depósitos.	Disponibilidad de yacimientos (trampas geológicas naturales) con reconocidas condiciones geológicas y mineras favorables. La infraestructura existente en un depósito podría adaptarse para el almacenamiento de gas	Disponibilidad de yacimientos de sal con condiciones geológicas y mineras favorables suficientemente reconocidas. Sin infraestructura en depósitos.

Nota. (Tarkowski, 2019). Aspectos geológicos, técnicos, relevantes de diversas opciones para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno. Recuperado y modificado de Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.rser.2019.01.051>

5.2.4 Cuencas carboníferas

Además de la asociación con campos de petróleo y gas, las cuencas de carbón son otro lugar común donde se han observado cantidades significativas de hidrógeno. En las cuencas carboníferas, las capas de carbón están intercaladas con otras capas de rocas sedimentarias como areniscas, arcillas, conglomerados y, en algunos casos, rocas metamórficas como esquistos y pizarras. Esta estructura geológica, representada en la Figura 16, proporciona un entorno adecuado para la acumulación y almacenamiento de hidrógeno.

Figura 16

Almacenamiento de hidrogeno por cuencas carboníferas



Nota. (Servicio Geológico MX, n.d.). Ilustración de almacenamiento de hidrogeno por cuencas carboníferas, donde se muestra un esquema simplificado de cómo el hidrógeno puede quedar atrapado en las capas de carbón y otras rocas sedimentarias. Recuperado y modificado de Gobierno

de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157798/Que-es-el-carbon-mineral.pdf>

Directores de investigación han realizado trabajos que han permitido demostrar que los fluidos de las formaciones carboníferas de cuencas mineras están enriquecidos en hidrógeno.

El primer descubrimiento de hidrógeno natural se realizó en el gas de una mina de carbón en Ucrania (Менделеев, 1888).

Gracias al hallazgo en la cuenca carbonífera lorena en el este de Francia, Philippe de Donato y Jacques Pironon investigadores del laboratorio GeoRessources de la Universidad de Lorraine. El proyecto tiene como meta proporcionar energías limpias, explorar el hidrógeno natural y profundizar en los estudios sobre la formación de hidrógeno blanco en el contexto geológico (De Aragon, 2023).

5.3 Entrampamiento

El entendimiento del entrampamiento del hidrógeno en el subsuelo es fundamental para la exploración y explotación del hidrógeno natural. Este aspecto nos permite reconocer la presencia de hidrógeno subterráneo y diseñar métodos eficientes para su extracción (Ravaux et al., 2023).

5.3.1 Mecanismos de Entrampamiento del Hidrógeno en el Subsuelo

El hidrógeno puede quedar atrapado en el subsuelo a través de varios mecanismos, incluyendo:

5.3.1.1 Estructuras Geológicas. Formaciones rocosas como anticlinales, fallas y trampas salinas pueden actuar como barreras impermeables que confinan el hidrógeno en estructuras subterráneas específicas.

5.3.1.2 Absorción y Adsorción. El hidrógeno puede ser absorbido dentro de la matriz mineral de ciertas rocas o adsorbido en sus superficies, quedando efectivamente atrapado en el subsuelo.

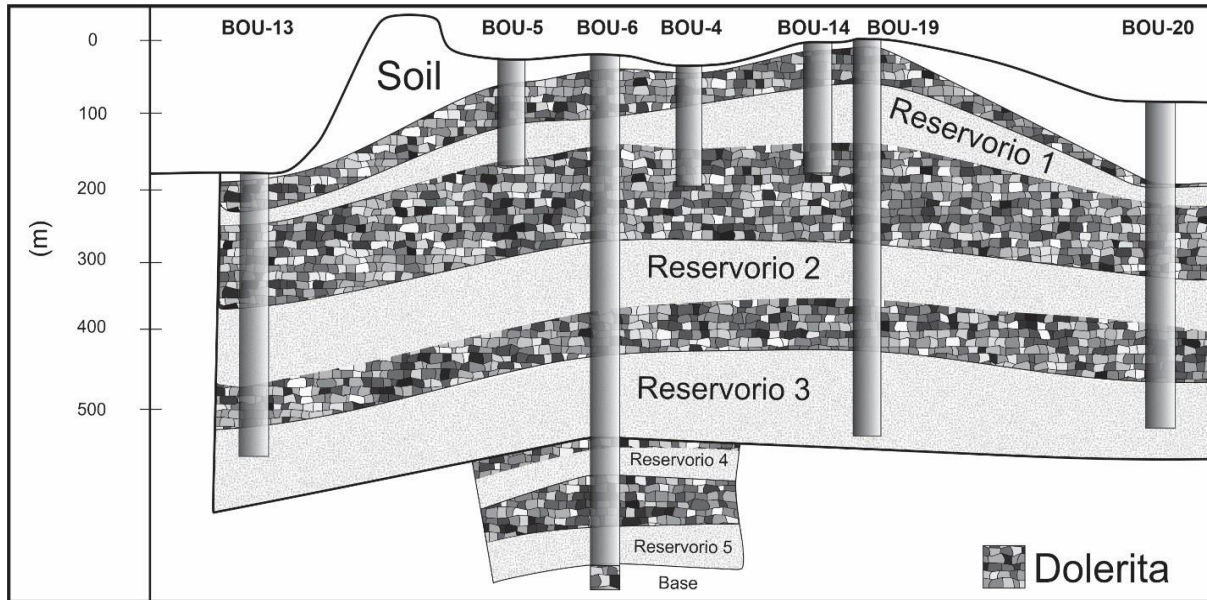
5.3.1.3 Capas Impermeables. La presencia de estratos de rocas con baja permeabilidad, como arcillas y lutitas, puede crear barreras que limitan el movimiento del hidrógeno, favoreciendo su acumulación en zonas confinadas.

5.3.1.3.1 Dolerita. Las formaciones geológicas asociadas y la efectividad de diferentes tipos de rocas como sellos para retener el hidrógeno se evidencian en el estudio geológico de yacimientos realizado por Omar Maiga y colaboradores en 2023. Se examinaron diversas formaciones asociadas con la presencia de hidrógeno. Se identificaron litologías de formaciones arcillosas seguidas de doleritas en Mali como se muestra en la figura 17, estas últimas se caracterizan por ser cristalinas y sin porosidad, lo que las hace efectivas como sellos para retener el hidrógeno.

La dolerita puede tener porosidad y permeabilidad variables, lo que significa que puede contener espacios vacíos (poros) y tener la capacidad de permitir que los fluidos, como el hidrógeno, se muevan a través de la roca. Si la dolerita tiene una porosidad significativa y una permeabilidad adecuada, podría retener cantidades variables de hidrógeno natural en sus espacios porosos.

Figura 17

Corte transversal de los pozos de exploración en el campo de gas H2 de Malí



Nota. Liu et al. (2023). Figura que muestra el entrapamiento de H2 con roca dolerita en malí.

[Figura]. Recuperado de Diario Petrovietnam , 12 , 4 - 14.

5.3.1.3.2 Evaporitas. Unas de las principales capas impermeables son las evaporitas estas se forman principalmente mediante procesos químicos, con una composición que incluye minerales como yeso, anhidrita, halita, y otros menos comunes que adquieren relevancia por las condiciones específicas en las que se desarrollan, como salinidad y temperatura. Estas rocas se generan a partir de la evaporación de salmueras, aguas con altas concentraciones de sales que se concentran hasta llegar a un punto de saturación y precipitar los minerales evaporíticos. (Alonso, 2003)

Estas evaporitas desempeñan un papel importante en el almacenamiento de hidrógeno, ya que los procesos de formación generan trampas estructurales. Cuando las evaporitas se encuentran

en la parte superior de una estructura, actúan como una cubierta impermeable, sellando numerosos yacimientos de series carbonatadas.

Para identificar estas estructuras sellantes, se considera la presencia de formaciones salinas estratificadas que contengan al menos un 95% de halita, así como la existencia de capas de rocas evaporíticas o estructuras compuestas por sales, donde se identifiquen facies de halita. (Alonso, 2003).

6. Características Superficiales en la Generación de Hidrógeno Natural

En este contexto, las manifestaciones superficiales del hidrógeno natural comprenden una variedad de fenómenos visibles en la superficie terrestre que indican la presencia o actividad de depósitos de hidrógeno subterráneos. Estas manifestaciones pueden incluir desde emanaciones gaseosas hasta alteraciones geológicas específicas. Este análisis detallado aborda la tipología, distribución y características clave de estas manifestaciones, proporcionando una comprensión esencial para la identificación y exploración de yacimientos de hidrógeno natural a nivel global.

6.1 Muestreo de Gases en superficie

Para poder identificar gases desde superficie de la presencia de hidrogeno se requiere un equipo de sensores remotos y métodos indirectos, como análisis químico de muestras, sensores y detectores portátiles y monitorización de emisiones, como se muestran en la tabla 5. ya que, de allí se recopila información para definir las mejores localizaciones para capturar los gases a profundidades someras que indiquen una migración desde fondo hasta superficie del recurso.

Tabla 5

Síntesis de métodos indirectos.

Método	Definición
Análisis químico de muestras	Toma de muestras de aire o superficie para su análisis químico en laboratorio, utilizando técnicas como cromatografía de gases o espectrometría de masas.
Sensores y detectores portátiles	Dispositivos portátiles que detectan la presencia de gases en la superficie a través de sensores específicos.
Monitorización de emisiones	Método para monitorear emisiones de gases desde la superficie, utilizando sensores específicos o imágenes satelitales.

Nota. Esta tabla enseña diversos métodos indirectos para el muestreo de gases en superficie, donde implica técnicas que no requieren la toma directa de muestras de gas.

El procedimiento es muy similar a la captura de cualquier gas, pero en este caso se deben tener en cuenta que la partícula que intentamos detectar y capturar es la partícula más pequeña de la tabla periódica, lo cual requiere de materiales especiales para asegurar una toma de muestra en el menor tiempo posible para evitar la pérdida del recurso.

Los principales muestreos y análisis se describen a continuación:

6.1.1 Geoquímica de fluido

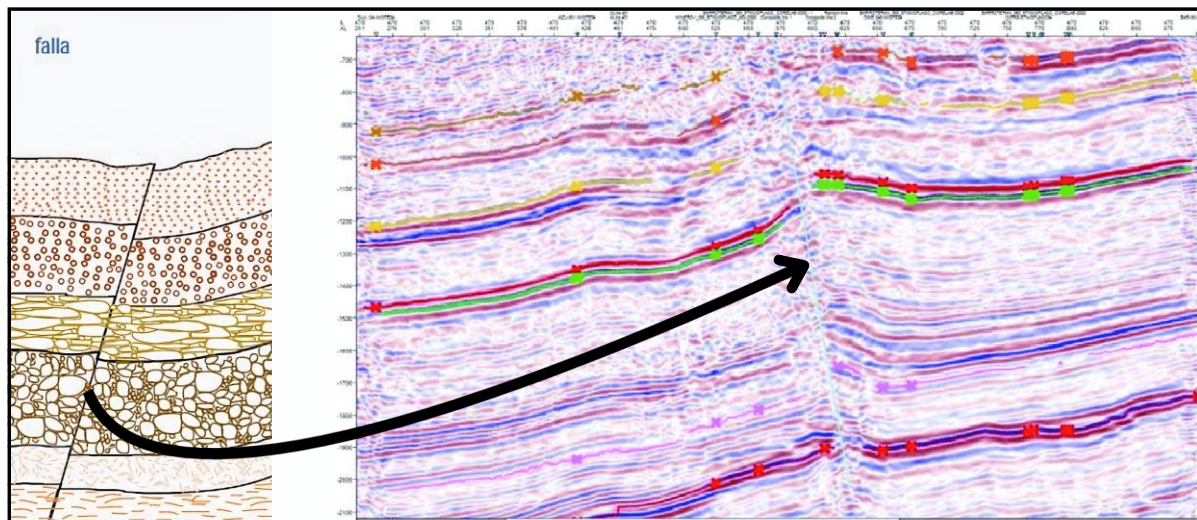
La geoquímica del agua nos permite comprender la composición y el trayecto subterráneo de las distintas aguas. Este aspecto reviste gran importancia, ya que la interacción del agua con el lecho rocoso es fundamental para entender la posibilidad de que ocurra la serpentización, así como para considerar al agua como portadora de gases solubles durante su migración. Varios estudios han evidenciado las diferencias en la composición de gases y aguas en distintos puntos de cuencas sedimentarias (Gonzalez-Penagos et al., 2016).

6.1.2 Imágenes sísmicas

La interpretación de los elementos estructurales en una región específica y el análisis de sus relaciones con el basamento geológico pueden ser clave para identificar las posibles rutas de migración del Hidrógeno Natural (Truche et al., n.d.). Además, el empleo de imágenes sísmicas facilita la identificación de fallas que conectan con el basamento y se extienden hasta la superficie como se ilustra en la figura 18, lo que permite delimitar las zonas que deben ser muestreadas para detectar anomalías de Hidrógeno, corroborando así su existencia.

Figura 18

Interpretación sísmica de horizontes y fallas.



Nota. Martinez et al. (2018). Interpretación sísmica que muestra la continuidad de los reflectores geológicos en el área que abarca las líneas y volúmenes sísmicos. Recuperado de Análisis estructural de cuencas sedimentarias, Capítulo: 6 (pp.82 - 94)

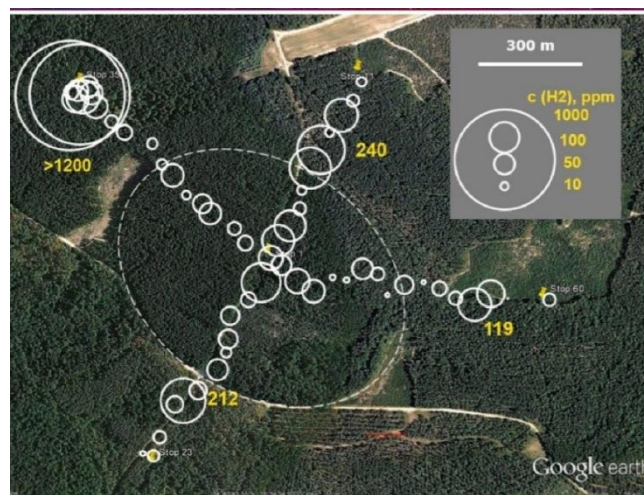
6.1.3 Imágenes de satélite

Según la percepción remota, las anomalías geomórficas superficiales son cruciales para la exploración de hidrocarburos y la detección de hidrógeno (Gupta, 2017), como se puede ver en la

figura 19 una imagen de satélite donde se muestra una formación conocida como "Carolina Bays" o "Círculos de hadas", que se consideran manifestaciones superficiales de emanaciones de hidrógeno desde el subsuelo hasta la superficie. Para los exploradores, estas características geomorfológicas facilitan la identificación inicial de áreas de interés, lo que permite la concentración eficiente de recursos técnicos y financieros. Varios autores han señalado ejemplos notables de anomalías geomórficas asociadas con fugas de hidrocarburos, lo que demuestra la relación entre las emisiones gaseosas y sus efectos en la superficie. Estas anomalías suelen manifestarse como formas circulares u ovaladas, fácilmente distinguibles del entorno en términos de topografía, tonalidad en las imágenes, vegetación, composición del suelo, humedad y rugosidad superficial, entre otros aspectos (Gupta, 2017).

Figura 19

Concentraciones subterráneas de H₂ en la Bahía Smith



Nota. Liu et al. (2023). Diagrama esquemático que muestra la distribución de las concentraciones subterráneas de H₂ en la Bahía Smith. [Diagrama]. Recuperado de *Unconventional Resources*, 3, 176-182.

6.2 Filtraciones de hidrogeno natural

Estas filtraciones se han visto relegadas en Filipinas durante más de dos siglos, donde las llamas de gas ardiente han permanecido activas de forma continua. Este lugar se conoce como "Los Fuegos Eternos", con concentraciones de hidrógeno medidas entre el 41,4% y el 44,5%, dependiendo del respiradero. (Vacquand C, 2011).

Este caso mencionado está vinculado a regiones donde posiblemente la corteza oceánica ha sido elevada por fuerzas tectónicas hacia la superficie de un margen continental, dando como resultado la reacción de serpentización entre el agua procedente de la deshidratación de la placa subductora y las rocas ultrabásicas de la placa abducida. (Vacquand, y otros, 2018).

6.1.4 Depresiones circulares por hidrogeno

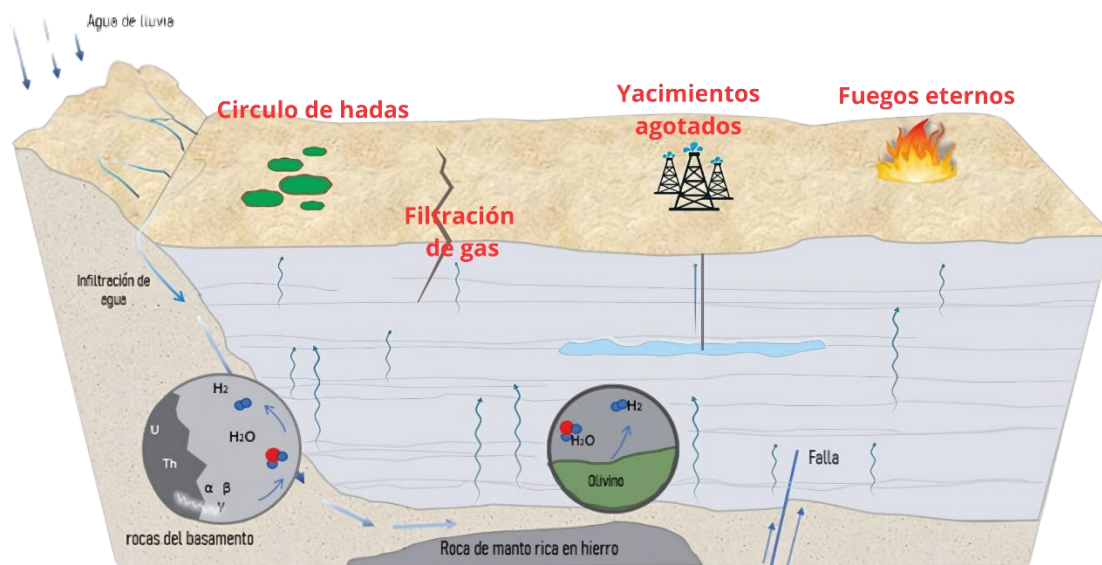
Las investigaciones sobre la distribución del hidrógeno en diferentes entornos geológicos revelan un fascinante panorama de procesos subterráneos y sus consecuencias en la topografía terrestre. Estas consecuencias se evidencian en la formación de depresiones circulares o casi circulares relacionadas con fugas de H₂, (Viacheslav Z, et al., 2015). Además, estudios indican que estas depresiones no son accidentales, ya que, se forman por la desgasificación (liberación de gases), deshidratación (pérdida de agua) y metasomatismo continuo, ya que, las rocas sufren cambios que acaban en colapsos y depresiones de la superficie (Liu J, et al., 2023).

La figura 20 ilustra varios fenómenos naturales que ejemplifican la generación y manifestación de hidrógeno en diversos entornos geológicos. Además, nos brinda una visión panorámica de cómo el hidrógeno, generado en las profundidades de la Tierra, se manifiesta en la superficie a través de diversos fenómenos naturales. Los círculos de hadas son un ejemplo

fascinante de cómo la presencia de hidrógeno subterráneo puede influir en la vegetación, creando patrones circulares distintivos en el suelo. Las filtraciones de gas, evidenciadas por burbujas o emanaciones gaseosas, indican la migración del hidrógeno desde el subsuelo hacia la atmósfera. Los fuegos eternos son una manifestación dramática de la combustión de hidrógeno y otros gases en contacto con el aire, y se han observado en diversas regiones del mundo. Finalmente, las filtraciones en yacimientos de petróleo y gas sugieren una asociación entre el hidrógeno y los hidrocarburos, lo que abre nuevas perspectivas para la exploración y producción de este recurso energético.

Figura 20

Origen de hidrogeno en la tierra



Nota. Eric Hand (2023) "Hidden Hydrogen". Formación del hidrogeno en el subsuelo. Recuperado y modificado de Science. doi: [10.1126/science.adh1460](https://doi.org/10.1126/science.adh1460)

6.1.5 Círculos de hadas - “*Fairy circles*”

Otras filtraciones difusivas ubicadas en entornos intracratónicos (por ejemplo, Sao Francisco, Cuenca en Brasil, Bourakebougou en Malí, África y Rusia) se han atribuido a interacciones químicas fluido-roca, como la oxidación del Fe^{2+} , minerales y litologías ricas en rocas subyacentes, o radiólisis del agua (Bendall, 2022)

Estas filtraciones difusas intracratónicas a veces se presentan como círculos poco profundos y depresiones subcirculares que van desde decenas de miles de metros hasta kilómetros, a los que algunos investigadores se refieren como "círculos de hadas". Como se ilustra en la figura 21 estas características topográficas se asocian a los cambios de vegetación y el suelo blanqueado, identificándolas mediante análisis geomorfológicos utilizando imágenes satelitales. Estas formaciones se han postulado como un efecto diagenético del hidrogeno sabiendo que aumenta la porosidad de la roca mediante disolución química a medida que va migrando hacia la superficie (Larin, Zgonnik, Deville, & Rodina, 2014), también es importante mencionar que estas superficies subcirculares también se da por procesos biológicos como la erosión mecánica del suelo por lluvias intensas, calor extremo y evaporación en algunos lugares.

Estos fairy circles varían en tamaño desde menos de 100 metros hasta más de 3,0 kilómetros de diámetro. Según las imágenes satelitales, la profundidad de estas depresiones oscila entre aproximadamente 1 y 10 metros, alcanzando alrededor de 10 metros (Rezaee, R. 2021).

Figura 21

Círculo de hadas en Brasil.



Nota. Eric Hand (2023) “Hidden Hydrogen”. Los círculos de hadas se encuentran en diferentes áreas del mundo con diferentes diámetros, ubicaciones y densidades. Muchas veces funcionan como buenos indicadores de la búsqueda de hidrógeno natural. Recuperado y modificado de Science. doi: [10.1126/science.adh1460](https://doi.org/10.1126/science.adh1460)

6.1.6 Cuencas de Carolina - “Carolina Bays”

Este tipo de depresiones se ha observado en las llanuras costeras atlánticas de EE. UU, como se muestra en la figura 22 se evidencian en el estado de Carolina del Norte con múltiples manifestaciones en esa área, donde se detectaron concentraciones importantes de hidrogeno molecular (H_2) en los alrededores de las bahías (Zgonnik et al., 2015). Estas bahías son depresiones naturales superficiales, comúnmente llenas de agua y depósitos orgánicos, de forma

ovaladas. La presencia de hidrogeno en los suelos de “Carolina Bays” se descubrió tras observar una similitud geomorfológica con las depresiones que emite H₂ en Rusia, presentando concentraciones relativamente altas, este hidrogeno probablemente se origina en procesos geoquímicos que tienen lugar bajo rocas sedimentarias y migra a la superficie.

La geología de las bahías de Carolina se compone de dos elementos principales: la bahía, que es una depresión, y el borde de arena. La formación de la bahía se debe a la erosión provocada por la acción fluida, ya sea del viento o del agua, que excava los materiales geológicos preexistentes. Por otro lado, los bordes de arena se forman a partir de sedimentos transportados por procesos litorales, es decir, relacionados con el agua, y eólicos, vinculados al viento. Estos sedimentos surgen de depósitos geológicos subyacentes y se componen principalmente de arena de grano fino a medio. También es común encontrar arena fangosa depositada en ambientes acuáticos, lodo arenoso y arena con grava. (SCDNR Geological Survey, s.f.).

El hidrógeno molecular presente probablemente tiene su origen en procesos geoquímicos que ocurren debajo de la pila sedimentaria y luego migra hacia la superficie. Si existen rutas de migración de H₂, es posible que este flujo induzca interacciones entre los gases y las rocas, dando lugar a la formación de vías poco profundas. (Zgonnik et al., 2015).

Aunque los mecanismos detrás de su formación y su relación con las concentraciones de H₂ aún no están completamente comprendidos, podrían estar vinculados a redes de fallas alrededor de estas características o a propiedades petrológicas específicas, especialmente la porosidad de las rocas circundantes a las bahías de Carolina. (Larin et al., 2014). Además, se estima un flujo significativo de 2700 m³ de H₂ que se filtra desde las bahías de Carolina (Zgonnik et al., 2015).

Figura 22

Imagen satelital bahías de California, EE. UU



Nota. Zgonnik, V. et al, (2015). Ubicación del área de estudio Carolina del Norte, las bahías están delimitadas por polígonos de color naranja. Imagen satelital. Tomado de: <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>

7. Metodología - Flujo de trabajo propuesto para estudios de Hidrógeno natural

La exploración y detección de hidrógeno natural a través de características superficiales y en subsuelo requiere una metodología precisa que integre diversas técnicas de muestreo, análisis y observación.

La metodología propuesta se compone de las siguientes dos etapas, la primera donde se identifica las características y manifestaciones superficiales, seguidamente una segunda etapa que

busca encontrar manifestaciones de hidrógeno natural en el subsuelo. A continuación, se presenta una metodología estructurada para este propósito:

Etapas 1:

1. Recopilación de datos y revisión bibliográfica:

Es necesario comprender, como establece Romero (2002), cualquier investigación científica en cualquier ámbito de aplicación requiere un debido proceso para llevarse a cabo, es decir, una metodología. Sin embargo, para desarrollar cualquier escenario posible, es necesario primero comprender el tema, en este caso “Identificación y caracterización de manifestaciones de hidrógeno natural en el subsuelo y en la superficie terrestre”, se debe primero recopilar una serie de datos, definiendo claramente los siguientes puntos.

- I. Que es el hidrógeno natural, de forma amplia, para que sirve, como se manifiesta, que utilidad tiene, de qué forma se genera, que impacto produce, toda la información relacionada a este tipo de hidrógeno.
- II. Estudios previos del mismo tema, es decir, se debe realizar una revisión bibliográfica para analizar artículos, investigaciones, propuestas e implementaciones de metodologías para identificar y caracterizar hidrógeno natural en el subsuelo y en la superficie terrestre, haciendo especial énfasis en sus resultados, la forma de conseguir los resultados y el modo de operar.

Toda la información descrita anteriormente debe ser tan amplia como sea posible, de modo que se tenga de forma actualizada, suficientes datos para tener un referente claro de cómo actuar. Se deben analizar casos documentados de procesos de identificación y extracción de hidrógeno

natural, determinando las áreas geográficas donde se llevó a cabo, las técnicas de detección utilizadas en ellos y sus resultados.

2. Identificación de Manifestaciones Superficiales:

Descripción de Manifestaciones Superficiales: Identificar y describir las características geomorfológicas que podrían indicar la presencia de hidrógeno natural, como filtraciones, depresiones circulares, anomalías geológicas, entre otros.

3. Muestreo de Gases en Superficie:

Selección de Métodos Indirectos: Utilizar métodos indirectos como análisis químico de muestras, sensores y detectores portátiles, y monitorización de emisiones para detectar la presencia de hidrógeno en la superficie.

4. Imágenes Sísmicas

Interpretación de Elementos Estructurales: Analizar imágenes sísmicas para identificar elementos estructurales y posibles rutas de migración del hidrógeno natural, así como fallas que conecten con el basamento geológico (Truche, A., et al. n.d).

5. Imágenes de Satélite:

Detección de Anomalías Geomorfológicas: Utilizar imágenes de satélite para identificar anomalías geomorfológicas como círculos de hadas, Carolina Bays y otras formaciones que puedan estar asociadas con la presencia de hidrógeno (Gupta, R. 2017).

6. Investigación de Filtraciones y Depresiones Circulares:

Estudio de Filtraciones y Depresiones: Investigar áreas donde se han observado filtraciones de hidrógeno y la formación de depresiones circulares para comprender los procesos geológicos y químicos que podrían estar involucrados (Vacquand, C. 2011).

7. Análisis de Origen y Distribución del Hidrógeno:

Exploración del Origen del Hidrógeno: Investigar el origen del hidrógeno en la región de estudio, considerando procesos geológicos y geoquímicos que podrían estar generando su presencia en la superficie (Viacheslav Z., et al. 2015).

A continuación, se muestra en la figura 23 un resumen de flujo de trabajo propuesto para el estudio de hidrogeno natural donde se identifican las características y manifestaciones superficiales para un mayor entendimiento de la etapa 1.

Figura 23

Fase 1 del Flujo de trabajo propuesto para estudio de hidrogeno natural



Nota. El gráfico representa la metodología empleada para identificar y describir las características que podrían indicar la presencia de hidrógeno natural.

Etapa 2

1. Selección e identificación de áreas de estudio en el subsuelo:

Se identificarán y seleccionarán áreas de estudio donde se sospeche la presencia de hidrógeno natural, basándose en la información recopilada en la etapa anterior y en la experiencia previa en la exploración de diversas áreas, para identificar patrones, zonas potenciales, beneficios, impactos y todo lo relacionado, utilizando datos geológicos, geofísicos y geoquímicos disponibles, y analizando estructuras geológicas favorables, tales como fallas, pliegues y otras características que podrían indicar la presencia de hidrógeno.

2. Identificación de elementos geológicos esenciales

a. Mecanismo de Generación:

Estudio de procesos geoquímicos y geofísicos que pueden dar origen al hidrógeno natural.

b. Roca Basamento:

Análisis de la composición, estructura y edad de las rocas subyacentes para determinar su capacidad de generar y almacenar hidrógeno.

c. Actividad Hidrogeológica:

Evaluación de la circulación y presencia de agua subterránea que pueda estar relacionada con la generación y migración del hidrógeno.

d. Presencia de Fallamiento y Geomecánica Asociada:

Identificación de estructuras geológicas como fallas que puedan influir en la migración y acumulación del hidrógeno.

e. Reservorios:

Localización y caracterización de las formaciones geológicas capaces de almacenar hidrógeno.

f. Sellos

Identificación de capas impermeables que puedan sellar y confinar el hidrógeno en los reservorios.

3. Muestreo del subsuelo y de aguas subterráneas

Además, se lleva a cabo el muestreo del subsuelo y de aguas subterráneas mediante perforaciones y toma de muestras de núcleos de roca en las áreas seleccionadas, seguido por la extracción y análisis seguido por la extracción y análisis composicional del agua subterránea para comprender su interacción con el lecho rocoso y su capacidad para transportar gases solubles, lo que puede indicar la presencia de hidrógeno (Gonzalez-Penagos, J., et al. 2016). Además, se recolectan muestras de suelo, agua y gases en áreas identificadas como potenciales yacimientos de hidrógeno natural para su análisis en laboratorio y determinar la presencia y concentración de hidrógeno, así como identificar otros gases asociados y posibles trazas geoquímicas que puedan indicar su origen.

4. **Análisis geofísico:**

Se llevarán a cabo estudios geofísicos, como la sísmica de reflexión, la gravimetría, la magnetometría y métodos electromagnéticos, para caracterizar la estructura geológica y la distribución de fluidos en el subsuelo, lo que puede identificar zonas con potencial presencia de hidrógeno natural. Estos estudios, que incluyen sísmica de reflexión, gravimetría, magnetometría y métodos electromagnéticos, se realizan para caracterizar la estructura subsuperficial de las áreas identificadas como potenciales yacimientos de hidrógeno natural. Ayudan a identificar estructuras geológicas favorables y zonas de acumulación de gases.

5. **Análisis químico de muestras:**

Se realizarán análisis químicos de las muestras de roca y agua obtenidas, para determinar la concentración de hidrógeno y otros gases presentes, así como para identificar posibles procesos geoquímicos asociados. En este proceso se deben integrar datos en diferentes esquemas y programas de análisis estadístico para desarrollar modelos que permitan comprender la distribución y origen del hidrógeno en el subsuelo y en la superficie terrestre estudiadas, demostrando así el potencial del área para hidrógeno natural.

6. **Modelado geológico y geofísico:**

Se utilizan los datos recopilados para desarrollar modelos geológicos y geofísicos tridimensionales de las áreas estudiadas. Estos modelos permiten visualizar la distribución de los posibles yacimientos de hidrógeno natural y evaluar su tamaño, forma, profundidad y características geológicas.

7. Análisis de la historia geológica:

Se estudia la historia geológica de las áreas de interés para comprender los procesos geológicos que han llevado a la formación de los yacimientos de hidrógeno natural. Esto puede incluir la evaluación de la tectónica de placas, la actividad volcánica, la sedimentación, la diagénesis y otros procesos geológicos relevantes.

8. Modelado del origen del hidrógeno:

Se desarrollan modelos geoquímicos para entender el origen del hidrógeno natural encontrado en los yacimientos. Esto puede implicar la evaluación de procesos de serpentización, descomposición de materia orgánica, reacciones de agua-roca, entre otros.

9. Caracterización del entrapamiento:

Se estudian los mecanismos de entrapamiento del hidrógeno dentro de las rocas y sedimentos. Esto puede incluir la evaluación de porosidad, permeabilidad, estructura de la roca, presión y temperatura.

10. Análisis de la distribución superficial:

Se realiza un análisis detallado de la distribución superficial de los yacimientos de hidrógeno natural, utilizando datos de mapeo geológico, imágenes de satélite, fotografías aéreas y otros datos geoespaciales disponibles.

11. Evaluación de viabilidad económica y ambiental:

Finalmente, se evalúa la viabilidad económica y ambiental de la explotación de los yacimientos de hidrógeno natural identificados. Esto incluye consideraciones sobre costos de extracción, impactos ambientales, regulaciones gubernamentales y demanda de mercado.

12. Validación y correlación:

Se compararán los resultados obtenidos con los datos previamente recopilados y con modelos geológicos y geoquímicos existentes para validar las conclusiones y establecer correlaciones entre las manifestaciones de hidrógeno y los procesos geológicos y geofísicos en juego. En este paso se debe recopilar toda la información en informes técnicos que resumen los resultados y las conclusiones alcanzadas, demostrando el resultado del trabajo. Además, se procederá a la formulación de hipótesis sobre la presencia, origen y comportamiento del hidrógeno en el área de estudio, así como a la definición de un modelo conceptual del sistema geológico relacionado con la presencia de hidrógeno. Seguidamente, se llevará a cabo la evaluación de la probabilidad de la ocurrencia de manifestaciones de hidrógeno natural, junto con la determinación de la probabilidad de encontrarlas y la formulación de recomendaciones para futuras exploraciones y estudios en el área de interés.

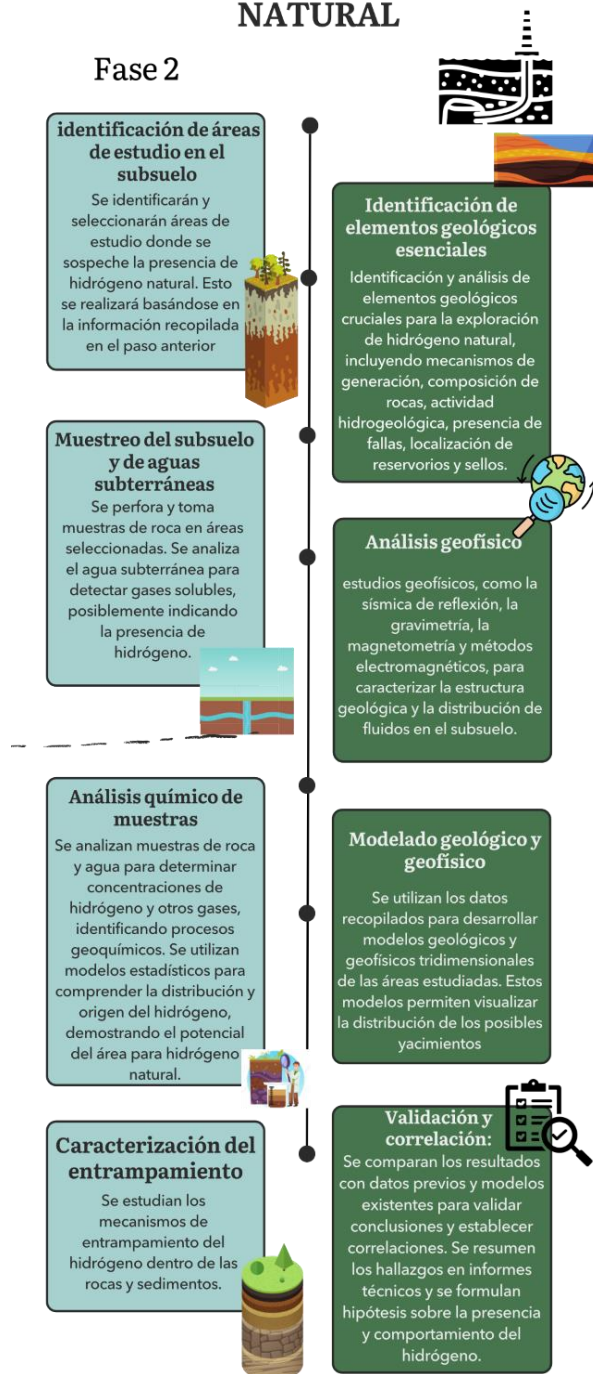
La Figura 24 presenta un flujo de trabajo que detalla los pasos a seguir en la segunda etapa, donde se muestra de forma sintetizada la identificación de manifestaciones de hidrógeno natural en el subsuelo.

Figura 24

Fase 2 del Flujo de trabajo propuesto para estudio de hidrogeno natural

FLUJO DE TRABAJO PROPUESTO PARA ESTUDIOS DE HIDRÓGENO NATURAL

Fase 2



Nota. El gráfico representa la fase dos de la metodología empleada para identificar manifestaciones de hidrógeno natural en el subsuelo.

Esta metodología integra diferentes enfoques, desde la observación de manifestaciones superficiales hasta el análisis geoquímico y geológico, para proporcionar una comprensión integral de la generación de hidrógeno natural en un área específica. Su aplicación sistemática puede facilitar la identificación y exploración de yacimientos de hidrógeno natural a nivel global.

Elementos importantes por identificar:

- **Basamento:**

En el contexto del entendimiento de los sistemas de formación del hidrógeno natural, el basamento juega un papel fundamental. Podemos establecer un paralelo con los sistemas petrolíferos, donde el basamento sería análogo a la roca madre (Patiño, et al., 2023). De hecho, sin la presencia de esta roca, la producción de hidrógeno no sería posible. En la mayoría de los casos, se ha observado que los basamentos asociados a la producción de hidrógeno tienen características máficas y/o altos contenidos de hierro, lo que favorece procesos como la serpentización u oxidación (Toulhoat y Zgonnik 2022). Estos procesos requieren la presencia de aguas percoladas o acuíferos dentro o en interacción con el basamento para que se produzcan las reacciones químicas que liberan el hidrógeno (Muhammed, et al., 2022). Además, las condiciones que favorecen la alteración geomecánica y cualquier otro mecanismo que aumente la exposición de roca al agua mejorará la producción de hidrógeno por unidad de área en el sistema."

- **Migración de Fluidos:**

La presencia e interacción del agua son fundamentales para la liberación del hidrógeno. El agua es la fuente del hidrógeno libre, ya que se produce a partir de la separación de sus moléculas. Las reacciones químicas que ocurren con las rocas máficas son las responsables de esta liberación. Debido al reducido tamaño molecular del H₂, prácticamente cualquier tipo de roca con porosidad y permeabilidad mínimas puede llegar a almacenar este gas. Es importante destacar que las rocas que reciben recargas de hidrógeno activamente serán más significativas, ya que se espera que tengan una mayor concentración de H₂ (Blay-Roger et al., 2024). Los acuíferos superficiales activos pueden actuar como reservorios principales de interés al evaluar el almacenamiento de hidrógeno.

J Charlou, et al., (2010). La acidez y la temperatura del agua actúan como catalizadores o aceleradores de estas reacciones, favoreciendo la producción de hidrógeno. Una vez liberado, el hidrógeno puede migrar hacia la superficie o hacia posibles trampas con facilidad, debido a su tamaño molecular muy reducido, lo que le permite atravesar la mayoría de los materiales con mínima porosidad (Maiga et al., 2023).

- **Fallas Profundas (Interpretación Sísmica):**

La presencia de fallamiento intenso en los basamentos cristalinos se ha identificado como un factor que aumenta significativamente el área de contacto entre las rocas involucradas en la interacción química. Esto, a su vez, incrementa considerablemente las posibilidades de liberación de H₂.

- **Posibles Reservorios:**

Debido al reducido tamaño molecular del H₂, prácticamente cualquier tipo de roca con porosidad y permeabilidad mínimas puede llegar a almacenar este gas. Es importante destacar que las rocas que reciben recargas de hidrógeno activamente serán más significativas, ya que se espera que tengan una mayor concentración de H₂ (Blay-Roger et al., 2024). Los acuíferos superficiales activos pueden actuar como reservorios principales de interés al evaluar el almacenamiento de hidrógeno.

- **Posibles Sellos:**

El tamaño molecular del H₂ es de 0.24 nanómetros, mientras que las formaciones rocosas que funcionan como sellos en los sistemas petrolíferos suelen tener microporosidades de alrededor de 2 nanómetros. Esto impide efectivamente la retención del gas. Por ejemplo, en Mali, la roca sello se caracteriza por ser una dolerita, una roca cristalina que carece de porosidad, y cuyos minerales no permiten la fuga de hidrógeno (Liu et al. 2023).

- **Anomalías Geotérmicas:**

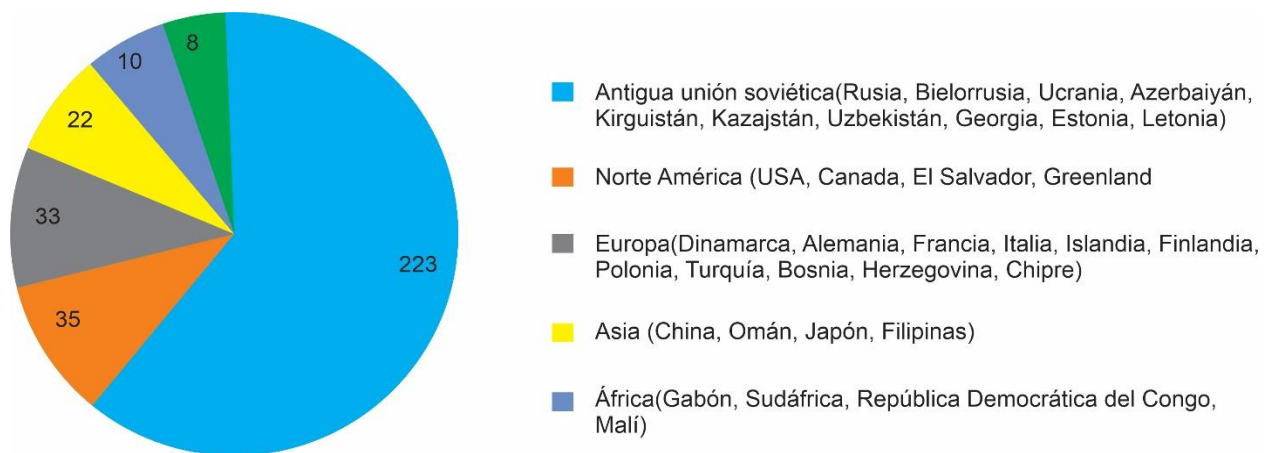
Se cree que las anomalías geotérmicas están relacionadas con ambientes favorables para la generación de hidrógeno, ya que la temperatura actúa como un catalizador en las reacciones químicas que lo producen (Patiño, et al., 2023).

8. Análisis global: Estado actual de yacimientos a nivel mundial

Para abordar la situación actual de la generación mundial de hidrogeno natural se identifica las principales regiones prospectas en este campo, la figura 25 muestra las zonas en las que se detectó hidrogeno blanco, incluyendo la Antigua Unión Soviética, Norte América, Europa, Asia y África. Asimismo, en la figura 26 se evidencia como la concentración de hidrogeno varia de 1% a 100% dependiendo de las diferentes regiones y entornos geológicos, destacando los factores que influyen en la evolución de esta industria y proporcionando una base sólida para comprender el contexto global de la generación de hidrógeno natural en la actualidad.

Figura 25

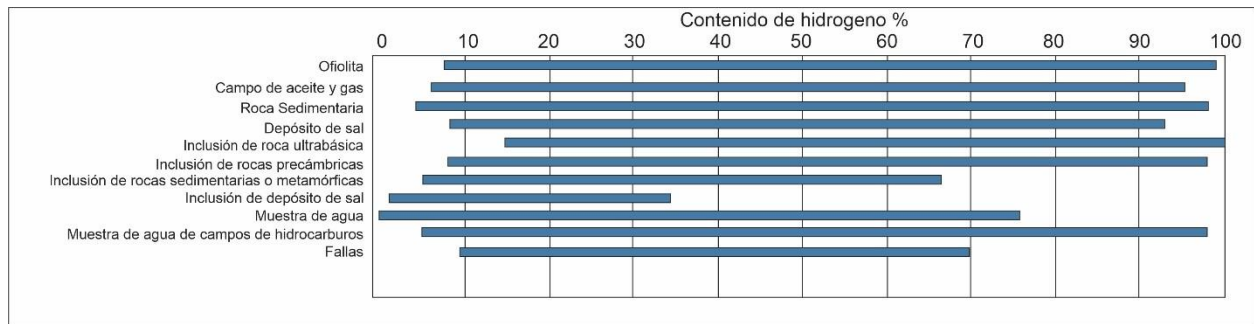
Detección de hidrogeno natural de forma global



Nota. El Diagrama Emanaciones de hidrogeno detectado en diversas regiones. Tomado y modificado de China Geology, 5(4), 722-733. 120), por Q. N. Tian, 2022, Science.

Figura 26

Análisis del contenido de hidrógeno en una variedad de entornos.



Nota. (Tian, Q. N., et al. (2022). Los datos muestran una variabilidad en los niveles de hidrógeno, indicando como varios factores ambientales influyen en su distribución y concentración.

[Diagrama]. Recuperado y modificado de China Geology, 5(4), 722-733.

8.1 Caso I: Bourakebougou – Malí, Africa

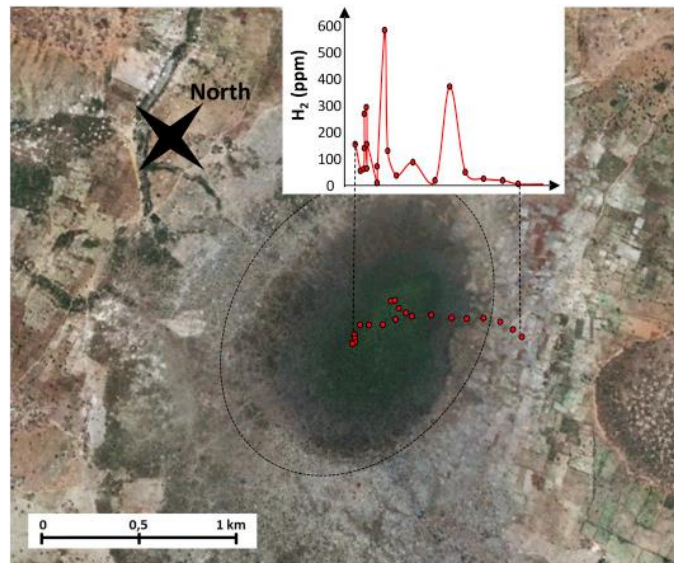
En diversas partes del mundo, se están estudiando yacimientos de hidrógeno natural con el objetivo de su aprovechamiento, uno de ellos es el campo de Mali en África occidental, La Figura 27 ofrece una vista satelital de este yacimiento, donde las estructuras circulares conocidas como círculos de hadas son una clara señal de la presencia de hidrógeno. Este yacimiento ha estado en producción desde 2012, suministrando hidrógeno limpio, compuesto principalmente por un 98% de H₂, junto con metano, nitrógeno y helio (Tian Qian-ning et al., 2022).

En el campo Bourakebougou, ubicado en la Megacuena Taoudeni, se encuentran pozos con profundidades que van desde 300 hasta 1400 metros. Además, las formaciones que se encuentran actualmente abarcan desde el período Arcaico hasta el período Cuaternario. Las formaciones de arenisca ricas en hierro se encuentran sobre las rocas plutónicas y sedimentarias del basamento. Un estudio detallado revela la presencia de minerales como óxido, sulfuro y serpentina, especialmente en fracturas, demostrando la influencia de estos en el aumento de H₂ en las capas ricas en hierro (Maiga et al., 2023).

La presencia de hidrógeno no derivado de fósiles en este yacimiento, junto con sus características geológicas, lo posiciona como un caso ejemplar para respaldar la sostenibilidad energética (Maiga et al., 2023).

Figura 27

Imagen satelital campo Malí



Nota : Geoquímica superficial de una estructura circular ubicada al este del bloque 25 de PETROMA y cercana al pueblo de Gassola. También se presenta un perfil de las concentraciones de hidrógeno (en ppm). Las coordenadas del centro de la estructura son una latitud de 13.194605° y una longitud de -6.242527°. Tomado de:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>

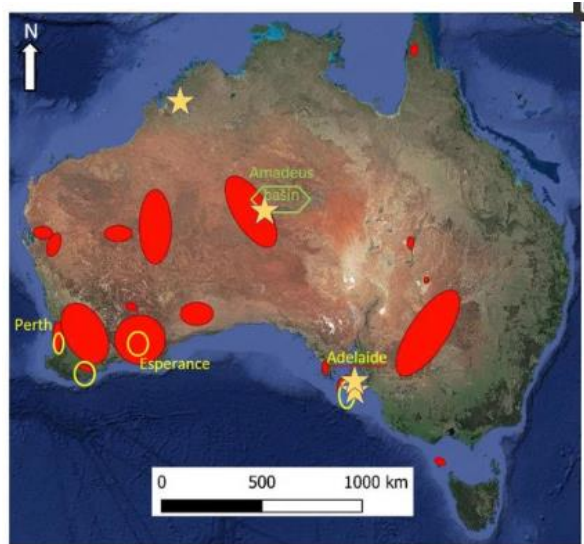
8.2 Caso II: Australia

Otro caso, es el estudio realizado en la zona occidental de Australia donde estudios se aferran a la idea de un yacimiento de hidrogeno natural porque comparten condiciones y características similares del campo de África occidental, una de ellas es que están asociados con

depressiones circulares a subcirculares y están ubicados en áreas con rocas de basamento precámbrico ígneas, metamórficas y ricas en hierro donde puede ocurrir oxidación de Fe^{+2} y reducción de H_2O (Qian-ning Tian, et al, 2022).

Agregando a lo anterior, estas coincidencias son justificadas con imágenes satelitales del occidente de Australia que muestran la presencia de numerosas depressiones de forma subcircular a circular como se evidencia en la figura 28, las cuales se han desarrollado sobre capas de sedimentos terciarios que recubren el Cratón Arcaico de Yilgarn rico en hierro (Rezaee, R., 2021). Esta característica específica ha motivado a realizar estudios para investigar si algunas depressiones circulares en Australia Occidental están vinculadas a la liberación natural de H_2 .

De manera similar, se ha encontrado evidencia de características que reflejan presencia de hidrogeno como depressiones circulares al sur de Australia. Geoscience Australia calculó la cantidad de hidrógeno generada a través de la radiólisis y serpentización del agua, concluyendo que los recursos de hidrógeno a profundidades inferiores a 1 km oscilan aproximadamente entre $1,6 \times 10^6$ m³/año y 58×10^6 m³/año (Tian Qian-ning, et al, 2022). Además, se han otorgado permisos para la expansión en exploración de este gas. Uno de estos permisos lo obtuvo Golden Hydrogen para explorar, evaluar y desarrollar hidrógeno natural en áreas designadas después de presentar pruebas de la existencia de hidrógeno natural con una pureza de hasta el 90%, hallado en la Isla Canguro.

Figura 28*Imagen satelital depresiones circulares Australia*

Nota: Ubicación de las áreas con muchas depresiones circulares en Australia (áreas rojas). Las estrellas amarillas son la ubicación de los pozos que encontraron H₂, los círculos amarillos resaltan las áreas donde se pueden observar depresiones que parecen círculos de hadas y donde se han realizado estadísticas en este estudio tomado de:

<https://doi.org/10.3390/geosciences11030145>

8.3 Caso III: Un Enfoque en descubrimientos globales

El tercer caso de descubrimientos globales en hidrógeno natural se centra en la detección de fuentes naturales de este gas en diferentes regiones del mundo. Estos descubrimientos han sido realizados mediante la instalación de dispositivos de análisis continuo de gases y la evaluación de la presencia de hidrógeno en diferentes contextos geológicos. En este capítulo, se presentan tres ejemplos significativos de estos descubrimientos: la cuenca de São Francisco en Brasil, los Pirineos en Francia y Rusia. Estos casos muestran la variedad de formas en que el

hidrógeno natural puede ser generado y liberado en la superficie, y cómo la comprensión de estos procesos puede ayudar a mejorar nuestra comprensión del ciclo del hidrógeno en la Tierra.

8.3.1 São Francisco, Brasil

Uno de estos casos adicionales data en el año 2018, donde se instalaron siete dispositivos de análisis continuo de gases en la cuenca de São Francisco, Brasil, con el fin de supervisar la presencia de hidrógeno y evaluar posibles emisiones intermitentes de hidrógeno natural que estaban vinculadas a los "círculos de hadas" (Prinzhofer A et al., 2019; Moretti I et al., 2021). Los investigadores sugieren que podría haber una fuente natural de generación de hidrógeno en las profundidades de la región de estudio como se ilustra en la figura 29 donde se descubrió la presencia de fallas profundas, un basamento con elementos radiactivos como el uranio (U), torio (Th) y potasio (K), que permite liberar una cantidad significativa de hidrógeno debido a la radiación presente en el agua con estimaciones que oscilan entre 90 y 266 toneladas al año de hidrogeno. (Donze FV et al., 2020).

Además, El análisis geológico del basamento en la cuenca de São Francisco indica la presencia de rocas ultramáficas y máficas, como también condiciones favorables para la serpentinización. Es así como, en base a la superficie total de la cuenca, la producción de hidrógeno por serpentinización podría ser considerable, con estimaciones entre 113 y 1018 toneladas por año (Donzé et al., 2020).

El contexto estructural y tectónico de la cuenca de São Francisco revela la presencia de fallas profundas que podrían facilitar el drenaje de hidrógeno desde zonas profundas hacia la superficie. Algunas de estas fallas podrían cruzar la secuencia sedimentaria completa, permitiendo que el hidrógeno alcance la superficie. Otras podrían conectar yacimientos poco profundos, como los carbonatados, sugiriendo rutas alternativas para el escape de gas (Donzé et al., 2020).

La interfaz entre las rocas del basamento y las capas sedimentarias podría ser un sitio de almacenamiento potencial para el hidrógeno. La secuencia Macaúbas, que forma parte de esta interfaz, contiene areniscas, pelitas, diamictitas, carbonatos, rocas volcánicas básicas y formaciones de hierro metamorfoseadas (Donzé et al., 2020). La formación Espinhaço, por su parte, está compuesta principalmente por cuarzo-arenita, y puede proporcionar reservorios con buenas características de permeabilidad y porosidad (Donzé et al., 2020).

Figura 29

Círculo de Hadas Brasil



Nota: Brasil: un cráter formado por la emanación de hidrogeno natural conocido como “circulo de hadas” Tomado de:

https://www.researchgate.net/publication/348281269_Hidrogeno_y_su_proyeccion_como_transicion_energetica_para_Colombia

8.3.2 Pirineos, Francia

En 2020, investigadores franceses llevaron a cabo un estudio sobre el hidrógeno natural en las estribaciones occidentales de los Pirineos cubriendo aproximadamente 7.500 km². El área

abarca la Zona Pirenaica Norte (ZNP), la cuenca de Mauléon, la cuenca de Arzacq y la cresta del Grand Rieu, con el objetivo de investigar el mecanismo de migración del hidrógeno natural en una zona que aún no presentaba registros de fugas de gas en la superficie. Este estudio identificó áreas clave con concentraciones elevadas de gas a lo largo de la parte norte de la cuenca de Mauléon. Los resultados sugieren que el hidrógeno natural podría originarse mediante el proceso de serpentinización de las rocas del manto, seguido de la migración del hidrógeno a lo largo de las principales zonas de fallas de empuje (Lefeuvre1 N et al., 2021). Además, se están llevando a cabo mediciones de hidrógeno en las cercanías de la depresión en la provincia de Gironde.

8.3.3 Rusia

Otro de los posibles casos de presencia de hidrogeno natural se da en Rusia entre los años 2005 y 2011, donde, se llevó a cabo un monitoreo de alrededor de 562 depresiones superficiales casi circulares que presentaban emisiones de hidrógeno. La figura 30 muestra estas depresiones, con diámetros que varían desde 100 metros hasta varios kilómetros, suelen estar rodeadas de suelo blanco y mostrar un crecimiento anormal de plantas (Larin N et al., 2015). Por lo general, el núcleo de estas depresiones consiste en un humedal o un lago. Según una evaluación de la composición del gas en las capas superficiales del suelo cercano, se estima que la cantidad de hidrógeno que escapa de estas depresiones hacia la superficie alcanzan aproximadamente los 24,000 metros cúbicos por día (Larin N et al., 2015).

Mucho antes se han informado concentraciones de hidrógeno molecular, ya sea como gas libre o disuelto en acuíferos, en el subsuelo, en muchos pozos en toda Rusia y en diferentes tipos de contexto geológico (Shcherbakov y Kozlova 1986)

Esta región es parte de la antigua plataforma rusa. En esta zona, el basamento está compuesto por rocas metamórficas e ígneas precámbricas deformadas, incluidas rocas en parte arcaicas. El basamento está cubierto por una cubierta sedimentaria.

Figura 30

Imágenes satelitales con presencia de depresiones circulares



Nota: Desarrollo progresivo de la estructura Elektrostal. Región de Moscú y mapa de concentraciones de hidrógeno en el subsuelo (fecha de mediciones 22/05/2012). Los máximos corresponden al límite de la estructura. La línea discontinua en azul muestra el límite del área, que está invadida por agua y donde no fue posible realizar mediciones Tomado de:

<https://rdcu.be/dGNNu>

La Tabla 6 presenta un resumen de descubrimientos a nivel mundial relacionados con la generación natural de hidrógeno con mayores concentraciones y procesos predominantes de cada

lugar. Además, detalla los fenómenos involucrados, las reacciones químicas subyacentes, las concentraciones de hidrógeno encontradas y los autores de cada estudio, proporcionando una visión general de la distribución y origen del hidrógeno natural en la Tierra.

Tabla 6

Descubrimientos de hidrógeno alrededor del mundo

Fenómeno	Descripción	Lugar	Reacción química	% concentración H ₂	Autor
Serpentinización	Se han estimado altas tasas de producción de hidrógeno a través de la serpentinización de rocas ultramáficas-máficas. Este proceso geológico, esencial para la formación de hidrógeno, ocurre cuando el agua interactúa con minerales de silicato de magnesio y hierro presentes en estas rocas.	Australia	$2Mg_2SiO_4 + 3H_2O \rightarrow 2Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + H_2$	90	Boreham CJ et al., 2021
	La producción de hidrógeno se ha observado en dos pozos cerca del sistema de rift del Continente Medio desde 1982. Estos pozos emiten pequeñas cantidades de hidrógeno acompañadas principalmente de nitrógeno y trazas de hidrocarburos, indicando un proceso activo de serpentinización subterránea.	Kansas, EE.UU	$3(Fe^{2+})_{(roca)} + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_{4(roca)} + 6H^+ + H_2$	37	Coveney Jr et al., 1987
	El campo ultramáfico del sitio de Rainbow muestra concentraciones extraordinariamente altas de H ₂ en los fluidos ventilados, que provienen de una fuente casi idéntica a la del manto. La descarga total de hidrógeno se estima entre 2,5 y 7,5 millones de metros cúbicos estándar por año, destacando la significativa	Rainbow	$6[(Mg_{1.5}Fe_{0.5})SiO_4] + 7H_2O \rightarrow 3[(Mg_3Si_2O_5(OH)_4] + Fe_3O_4 + H_2$	40	Jean Luc, et al., 2010

	actividad geológica de serpentización en esta área.				
Radiólisis	Investigaciones en ambientes subterráneos han medido la tasa de producción y la composición isotópica del H ₂ derivado de reacciones radiolíticas, mostrando la relevancia de este proceso en la generación de hidrógeno.	Estados unidos y Canadá	$2\text{H}_2\text{O} + \text{radiación} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	16	(Lin, Slater, Lollar, Lacrampe-Couloume, & Onstott, 2005)
	Se analizan los gases de hidrocarburos e hidrógeno que se desprenden de las aguas de fractura salinas para determinar sus firmas isotópicas y de composición	Canadá y Sudáfrica	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	11,5	(Fu, y otros, 2007)
Actividad Biológica	Se estudiaron las tasas de oxidación de gases traza en suelos canadienses expuestos a mezclas de H ₂ , revelando la importancia de la actividad microbiana en la dinámica del hidrógeno.	Canadá	No aplicable específicamente; involucra la oxidación biológica del H ₂ .	5-6	(Piché-Choquette, Khdhiri, & Constante, 2018)
Profundamente arraigado	Gas de cromitas y dunitas serpentizadas en la mina Molodezhnaya fue identificado como combustible para una llama estable, indicando una fuente significativa de H ₂ "profundamente arraigada".	Kazajstán	No especificada; se infiere generación de H ₂ a partir de procesos geológicos profundos.	93,5–98,5	Уханов et al., 1987
Reacción de minerales	Alta concentración de H ₂ en zonas fracturadas de California, interpretada como formación de H ₂ por interacción del agua con superficies minerales frescas debido a actividades tectónicas.	Estados unidos-California	No especificada; implica agua interactuando con minerales bajo estrés tectónico.	1-10	(Wiersberg & Erzinger, 2008)

Nota. Esta tabla resume los descubrimientos y localizaciones relevantes de hidrógeno natural en todo el mundo. Los datos incluyen información sobre depósitos naturales, su distribución geográfica y porcentaje asociado de hidrogeno en campo.

9. Hidrógeno blanco en Colombia potenciales fuentes y su papel en la transición energética.

En Colombia, el uso de hidrogeno es un avance significativo hacia la diversificación y la sostenibilidad energética. Para explorar y desarrollar el potencial del hidrógeno como una alternativa energética limpia y renovable, se ha observado un creciente interés y compromiso por parte de actores clave, tanto del sector público como del privado. Se están llevando a cabo investigaciones exploratorias bajo la dirección de organizaciones como el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), y se están llevando a cabo avances significativos en la identificación y utilización de sus recursos naturales para la generación de hidrógeno en el país, (Páez, 2024). En esta sección se analizará la situación actual del hidrógeno en Colombia, poniendo énfasis en los progresos, obstáculos y perspectivas que esta fuente de energía novedosa presenta para el país.

9.1 Perspectiva del hidrogeno blanco en Colombia

En Colombia, los estudios de hidrógeno blanco aún están en una etapa inicial, se están identificando áreas prometedoras y se están utilizando técnicas innovadoras. Existe evidencia de la presencia de gas en cantidades significativas en el país, aunque aún no se ha confirmado que se trate de yacimientos. Dada la relevancia de esta nueva fuente energética, el Ministerio de Minas y Energía ha establecido regulaciones al respecto a través del Decreto 2235 de 2023 (World Economic Forum, 2024).

9.1.1 Decreto 2235 de 2023

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia (MME) emitió una regulación para la exploración y explotación del hidrógeno blanco como Fuentes no Convencionales de Energía Renovables (FNCER) mediante el Decreto 2335 de 2023.

La Ley 2099 de 2021, Ley de Transición Energética, incluyó el hidrógeno verde y azul en la lista de FNCER establecida por la Ley 1715 de 2014, ampliando los beneficios tributarios creados para este tipo de energía. Posteriormente, en la Ley 2294 de 2023 del Plan Nacional de Desarrollo fue incluido el hidrogeno blanco como fuente de energía (Vesga, 2023) .

Esta nueva legislación establece estándares generales que deben ser establecidos, incluyendo:

- **Autorización previa:** Para llevar a cabo proyectos de evaluación y explotación de hidrógeno blanco, será necesario cumplir con los estándares que emita el MME o la entidad designada por este último, la cual también será responsable de otorgar las autorizaciones requeridas.
- **Fases:** Los proyectos se llevarán a cabo en tres fases; evaluación, exploración y explotación.
- **Titulares:** Podrán ser titulares, personas jurídicas o comunidades energéticas.
- **Exclusividad:** Quien obtenga la autorización para el desarrollo de un proyecto, tendrá exclusividad sobre el área determinada mientras este se encuentre vigente.
- **Coproducción:** Se podrá producir simultáneamente hidrocarburos, energía geotérmica y minerales a la vez que hidrógeno blanco cumpliendo los requisitos que el MME reglamentará.
- **Entrega de información:** El desarrollador deberá entregar información técnica obtenida durante el desarrollo del proyecto al Servicio Geológico Colombiano.

- Incentivos: El gobierno pondrá en marcha instrumentos para incentivar proyectos de hidrógeno blanco, sin perjuicio de los incentivos tributarios existentes.
- Participación social: El MME podrá establecer lineamientos, condiciones y requerimientos para la participación comunitaria en los proyectos.

La Figura 31 (Ver Figura 31) resume de manera gráfica la nueva regulación emitida por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, la cual establece los lineamientos generales para la exploración y explotación del hidrógeno blanco como una fuente de energía renovable. Esta normativa busca fomentar el desarrollo de proyectos en este sector y establecer un marco regulatorio claro para los actores involucrados

Figura 31

Reglamentación sobre hidrógeno blanco en Colombia



Nota. (Inés Elvira Vesga. 2023, 27 diciembre). Decreto emitido por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia (MME), donde expide la regulación referente a la exploración y explotación

del hidrógeno blanco como Fuentes no Convencionales de Energía Renovables. Recuperado y modificado de Holland & Knight.

<https://www.hklaw.com/en/insights/publications/2023/12/ministerio-de-minas-y-energia-de-colombia-emite-reglamentacion>

9.2 Diversificación Energética en Colombia

En el contexto energético actual se resalta el potencial significativo del hidrógeno blanco como una fuente de energía alternativa y sostenible en el contexto colombiano. Más allá de su papel como combustible limpio, la exploración y aprovechamiento del hidrógeno blanco pueden desempeñar un papel crucial en la transición energética del país hacia una matriz más diversificada y menos dependiente de los combustibles fósiles (World Economic Forum, 2024).

La visión de Colombia hacia la transición energética se fortalece con la incorporación del hidrógeno como un elemento clave. Este recurso representa una puerta hacia la diversificación energética, permitiendo un desplazamiento hacia fuentes con bajas emisiones de carbono y, por ende, la reducción de las emisiones de CO₂, un paso crucial en la lucha contra el cambio climático (Chaustre Celis, J. 2023).

En resumen, el hidrógeno blanco emerge como un pilar fundamental en la estrategia de transición energética de Colombia. Su potencial para reducir las emisiones de carbono, y su capacidad para generar energía de manera limpia y sostenible hacen de este recurso una pieza clave en la búsqueda de un futuro energético más justo y sostenible para todos los colombianos (Bonitch et al., 2024).

De acuerdo con lo anterior se encuentran beneficios de la exploración del hidrógeno blanco como:

- El costo inferior a un dólar por kg, que se estima entre dos y diez veces inferior al del hidrógeno producido a partir de otras fuentes, como agua o combustibles fósiles. Esta ventaja económica podría impulsar la adopción masiva de esta tecnología y acelerar la transición hacia una economía basada en energías renovables.
- La nula emisión de CO₂, puesto que ya está disponible bajo la superficie. Esto significa que su producción y uso no contribuyen al cambio climático, lo que lo convierte en una opción atractiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y cumplir con los compromisos internacionales de reducción de carbono.
- La producción de hidrogeno blanco no requiere agua. En un país donde el acceso al agua puede ser limitado en algunas regiones, esta característica es especialmente relevante, ya que reduce la presión sobre los recursos hídricos y garantiza un proceso de producción más sostenible y eficiente.

9.3 Estudios de hidrogeno natural realizados en Colombia

En estudios recientes realizados en Colombia, se han encontrado concentraciones de hasta 40.000 partes por millón (ppm) de hidrogeno en los análisis de cromatografía de gases. Estos valores son del mismo orden de magnitud que el caso de Bourakébougou (World Economic Forum, 2024).

Un estudio publicado en la revista Geosciences en 2023, respaldado por la Universidad Nacional y liderado por la ingeniera geóloga de la institución Alejandra Carrillo, encontró la primera prueba de hidrógeno natural en el Valle del Cauca, Colombia. El Servicio Geológico Colombiano (SGC) también reveló los primeros hallazgos en los Llanos Orientales (Páez, 2024). En Colombia, Ecopetrol está logrando descubrir los primeros indicios de la existencia de

hidrógeno blanco en los bloques que opera, utilizando información del subsuelo recopilada durante años de exploración de hidrocarburos. Estas pruebas se presentaron en las cuencas de los Llanos Orientales y Caguán-Putumayo en 2022 y 2023 (World Economic Forum, 2024).

En las cuencas del Cauca-Patía, chocó y Sinú-San Jacinto conformadas por acuíferos y un basamento de corteza oceánica que posee rocas con minerales ferromagnesianos que podrían estar reaccionando para la generación de hidrogeno por medio de la serpentización (Patiño., et al 2024).

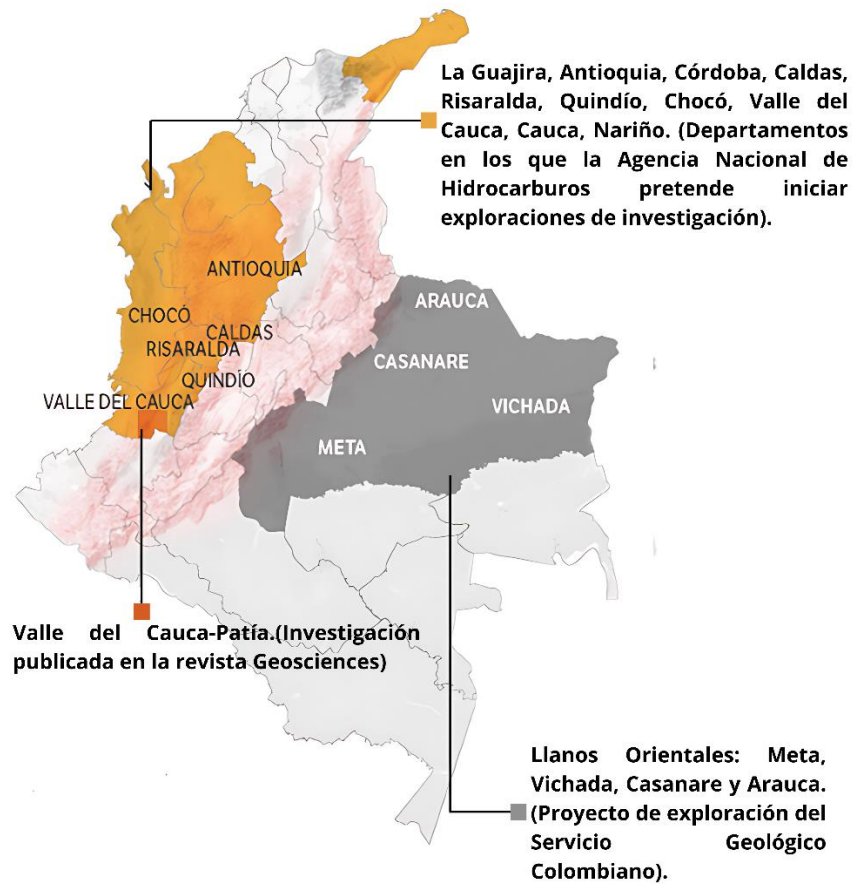
Como se ha mencionado anteriormente el origen profundo como generación de hidrogeno desde el manto terrestre, es una de las fuentes con una considerable incidencia. En Colombia, la cuenca de Tumaco se sitúa cerca de la zona de subducción, donde se ha informado la presencia de gas metano cuyo origen no ha sido determinado con certeza, se considera que este gas podría derivar del manto terrestre, donde una reacción propicia con el agua daría lugar a la formación de hidrógeno y dióxido de carbono, como se ha citado previamente. Asimismo, la desgasificación del magma podría estar presente en la cordillera Centra de Colombia, ya que es una cadena montañosa de origen volcánico, presenta no solo emanaciones de gases y fluidos hidrotermales en superficie, sino también intrusivos ígneos que pueden ser beneficiosos para la interacción fluido/roca. Existen algunos reportes del Servicio Geológico Colombiano que reportan concentraciones de H₂, un ejemplo son en el volcán cerro del Machín, Nereidas en cercanías del Volcán Nevado del Ruiz, emanaciones en el Volcán Puracé en el Cauca y el Volcán Azufral Laguna Verde. Pese a que las concentraciones son bajas, se ratifica la presencia de H₂ natural emanado por gases volcánicos (Moretti., Gonzalez 2021).

Los estudios realizados en Colombia han revelado un panorama prometedor en cuanto a la presencia de hidrógeno natural. La Figura 32 presenta un mapa que identifica las principales zonas

de Colombia con potencial para la exploración de hidrógeno blanco. Esta representación gráfica complementa la información presentada en el texto y permite identificar visualmente las regiones con mayor potencial para futuras exploraciones.

Figura 32

Potenciales puntos de exploración de hidrógeno blanco en Colombia



Nota. (Páez, A. M. D. 2024, 10 enero). La promesa del hidrógeno natural en Colombia. Recuperado y modificado de Climate Tracker.

9.3.1 Prospectiva de H₂ en Colombia en la cuenca cauca-patía

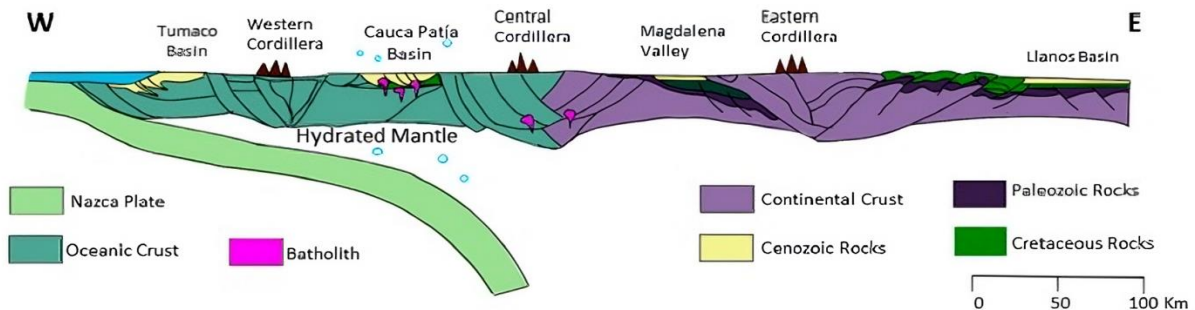
Colombia, debido a su variada geología, alberga una amplia gama de rocas, entre las cuales se encuentran las ofiolitas, una formación rocosa oceánica del Mesozoico con la capacidad inherente de generar hidrógeno al interactuar con el agua. Dentro del análisis realizado sobre este tema, se ha observado que, en la región occidental del país, particularmente en el Valle del Cauca - Patía, existe una concentración significativa de estas rocas (Moretti 2023).

En Colombia, se pueden encontrar al menos tres tipos de rocas que tienen el potencial de generar hidrógeno (H₂): ofiolitas, carbón y facies ricas en hierro, debido al proceso de acumulación de terrenos oceánicos durante la subducción a lo largo de la costa del Pacífico. La Figura 33 muestra una representación esquemática de una sección transversal que va desde el Pacífico hasta el Cratón Amazónico, delineando las diferentes provincias geológicas de Colombia donde se está realizando la prospección de hidrógeno.

En dirección oeste, el Valle Cauca-Patía se inserta en un contexto geológico diferente, donde predominan los materiales de ofiolitas. A pesar de los esfuerzos de exploración y la recopilación de datos subsuperficiales, el Valle Cauca-Patía no ha resultado exitoso en términos de hallazgos de petróleo y gas. No obstante, este valle muestra un potencial prometedor en cuanto a la presencia de hidrógeno natural.

Figura 33

Sección transversal demostración estructural características de central parte de Colombia en el nivel de Cali.



Nota. Ramírez et al., (2023). Area de estudio de ofiolitas en cuenca Valle Cauca-Patía. Tomado y modificado de Natural H₂ Emissions in Colombian Ophiolites: First Findings. *Geosciences*, 13(12), 358. <https://doi.org/10.3390/geosciences13120358>

9.3.1.1 Ofiolitas colombianas del Valle del Cauca

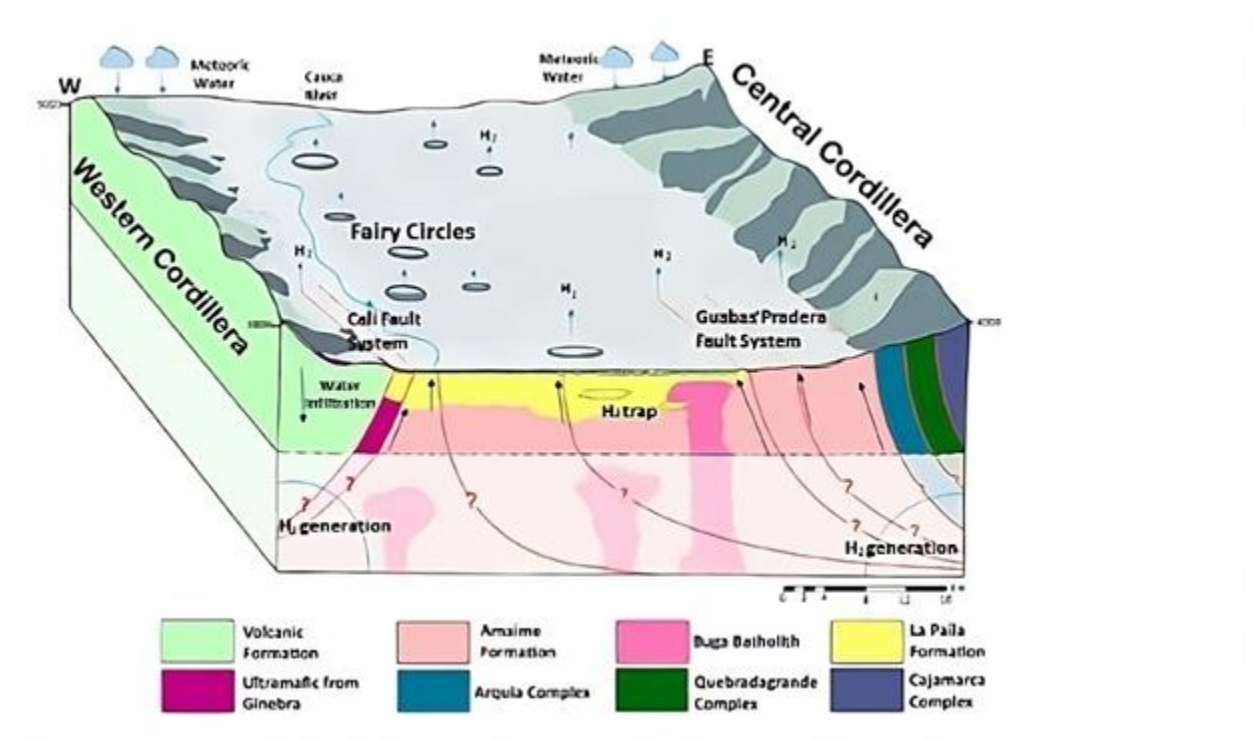
En la Cuenca Cauca-Patía a través de imágenes satelitales de alta resolución proporcionadas por diversos proveedores, como el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia Espacial Europea (ESA). Estas anomalías se manifiestan como pequeñas depresiones en el suelo, conocidas también como círculos de hadas o Depresiones Subcirculares (SCD) en la literatura. En el Valle del Cauca y Patía, se han identificado 23 de estos círculos de hadas, cuyas dimensiones varían entre 10 y 60 metros cuadrados, algunos de los cuales se encuentran dentro de campos de cultivo de caña de azúcar (Ramírez, Penagos, Rodríguez, & Moretti, 2023).

En Colombia, al elegir las áreas para el análisis de gases del suelo basándonos en la presencia potencial de H₂ en rocas y en las anomalías de vegetación, se ha encontrado un contenido

relativamente alto de H₂ en el suelo superficial un ejemplo de esto es el esquema presente en la figura 34. Otra de las zonas de análisis, cerca de Ginebra, fue seleccionada debido a la presencia de láminas de empuje de ofiolitas, un contexto geológico donde se espera la presencia de H₂. Sin embargo, las anomalías en la vegetación en esta zona tropical húmeda de Colombia presentan algunas diferencias con respecto a observaciones previas en Brasil, Namibia y Australia.

Figura 34

Sistema esquemático de hidrogeno del valle del Cauca-Patía



Nota. Ramírez et al., (2023). Especulación de zonas de generación de hidrogeno en la cuenca Valle del Cauca-Patía. Tomado y modificado de Natural H₂ Emissions in Colombian Ophiolites: First Findings. Geosciences, 13(12), 358. <https://doi.org/10.3390/geosciences13120358>

Aunque este estudio aún está en una fase preliminar, se presenta la primera evidencia documentada de emisiones naturales de hidrógeno en Colombia. Se han detectado emisiones de hidrógeno tanto en las fallas que bordean el valle Cauca-Paita como en microfiltraciones dentro del propio valle.

Este hallazgo representa un avance significativo en nuestra comprensión de los procesos geológicos y geoquímicos en esta región, así como en el potencial que tiene para ser una nueva fuente de energía primaria, libre de carbono.

9.3.2. Prospectiva de h₂ en Colombia en la cuenca de llanos orientales

En la cuenca de Llanos Orientales un estudio publicado en la revista *Acipet* en 2023, respaldado por Ecopetrol S.A y liderado por Cesar Patiño, realizaron estudios en la detección de hidrógeno blanco donde se basa en señales encontradas en muestras de gas obtenidas en la cabeza de pozo en campos de petróleo y gas. Es crucial destacar que estas muestras fueron analizadas por dos laboratorios distintos en momentos temporales diferentes, lo que garantiza la fiabilidad de los resultados.

Sin embargo, es importante considerar que la presencia de hidrógeno puede estar vinculada a la corrosión en la tubería de los pozos, lo que no necesariamente implica un origen natural del mismo. A pesar de esta consideración, es relevante mencionar que el pozo examinado durante los muestreos tenía una corta historia de actividad y no mostraba producción de agua asociada en ese momento. Por lo tanto, resulta poco probable que el hidrógeno tenga un origen corrosivo. En este contexto, este hallazgo incrementa la probabilidad de que el hidrógeno tenga un origen natural.

La cuenca de los Llanos se caracteriza por la presencia de acuíferos activos e inagotables debido a la recarga significativa de aguas meteóricas en la zona de piedemonte. Esto sugiere que el origen natural del hidrógeno podría estar relacionado con los procesos geológicos y biogeoquímicos propios de la región.

En la zona de estudio, el análisis del agua en la cuenca indica que las aguas meteóricas se adentran más profundamente al este. Esto se debe a que en el Campo "A" llegan con una temperatura más elevada que en las áreas circundantes. Esta situación podría estar relacionada con una mayor probabilidad de que las aguas que han recorrido zonas propicias para procesos como la serpentinización o la radiólisis favorezcan al Campo "A". Estas aguas podrían actuar como medios acuosos que transportan el hidrógeno teórico producido en las capas más profundas.

Existen similitudes entre las configuraciones geológicas de las cuencas en donde se ha detectado Hidrogeno Natural, sus posibles sistemas de generación y la cuenca de los llanos. La 7 resume los elementos identificados que pueden ser parte de un sistema de generación de Hidrogeno Natural presentes en el sector de la cuenca analizado:

Tabla 7

Posibles elementos identificados de un sistema de generación de hidrogeno natural

Posibles elementos de plays de Hidrógeno blanco	Descripción en campo de este trabajo
Basamento	Granitos, Dioritas, Filitas Basamento entre 13-15 km. Gradiente que segura temperaturas para procesos químico-físico. Evidencia de llegada de aguas que estuvieron en contacto con hidrotermalismo.
Rocas ultrabásicas	No hay presencia comprobada en el basamento cristalino en el sector del campo
Zona de influencia volcánica	No, pero hay evidencia de hidrotermalismo proveniente del piedemonte

Fallas profundas	Presencia de Fallas de basamento a superficie. Cortes de las fallas principales al Leon Shale. Arenas Suprayacentes de la Formación Carbonera.
Geoformas circulares	Existe la presencia de drenajes circulares.
Asociaciones mineralógicas y anomalías de vegetación	No distinguibles
Shows de hidrógeno	Un pozo ha mostrado en dos muestras tomados en momentos distintos analizados por laboratorios distintos Hidrogeno
Gases asociados a hidrógeno	Nitrógeno. No se ha detectado Helio por el momento.

Nota. Esta tabla resume posibles elementos identificados de un sistema de generación de hidrogeno natural en la cuenca Llanos Orientales

La detección de muestras que apuntan hacia la existencia de hidrógeno en esta región de la cuenca proporciona evidencia sobre la probable existencia de un sistema de hidrógeno. El análisis preliminar del yacimiento "A" indica la posible presencia de los componentes principales, lo que subraya la importancia de llevar a cabo muestreos adicionales para determinar la circulación activa de hidrógeno en esta área específica de la cuenca.

10. Conclusiones

La revisión muestra que el hidrógeno molecular puede originarse en varios tipos de entornos de la Tierra y, a menudo, son reacciones químicas dadas por agua y formaciones geológicas con hierro, desempeñando un papel importante en los procesos de generación de hidrogeno blanco. Además, en este estudio se conoce que el gas generado tiene mayor facilidad de migrar por rocas poco permeables comparadas con los hidrocarburos, por lo que es necesario para almacenar el hidrogeno contar con rocas como la dolerita y evaporitas que funcionan de roca sello para el hidrogeno como se evidencia en el caso de Malí.

Se resalta la importancia de comprender las reacciones químicas y los rasgos físicos de las formaciones geológicas que podrían contener y almacenar hidrógeno natural en el subsuelo. Este conocimiento es fundamental para identificar áreas con potencial para la generación y almacenamiento de hidrógeno, lo que a su vez podría conducir a la optimización de estrategias de exploración y explotación de este recurso. Además, entender estas características contribuirá a mejorar la eficiencia y la precisión de los métodos de muestreo y análisis utilizados en la investigación de hidrógeno natural en el subsuelo. En resumen, el estudio de las reacciones químicas y los rasgos físicos de estas formaciones es crucial para avanzar en el aprovechamiento responsable y sostenible del hidrógeno como recurso energético.

Los principales yacimientos de hidrógeno natural y sus manifestaciones superficiales a nivel mundial han sido crucial para comprender el potencial de producción y las reservas de este recurso energético. Este análisis nos ha proporcionado una visión más clara de la distribución

geográfica y la abundancia de yacimientos de hidrógeno natural, así como de las posibles áreas de concentración. Al comprender mejor estos aspectos, estamos mejor equipados para evaluar el papel del hidrógeno natural en el panorama energético global y para explorar su viabilidad como una fuente de energía alternativa y sostenible.

Esta Metodología ha sido de relevancia para tener una guía que facilita la identificación precisa de las manifestaciones del hidrógeno natural tanto en la superficie como en el subsuelo que permitirán tener una estimación más acertada para la ubicación de yacimientos o zonas con concentraciones de hidrogeno, lo que puede ser crucial para su exploración eficiente y sostenible, contribuyendo así a la transición energética del país y a la mitigación de impactos ambientales negativos.

Los recientes descubrimientos de hidrógeno blanco en Colombia marcan un importante avance en su transición energética. Estos hallazgos abren nuevas oportunidades para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Este descubrimiento podría ayudar a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y promover un sistema energético más sostenible y limpio. Sin embargo, es esencial continuar investigando y evaluando el impacto total del hidrógeno blanco en esta transición, y abordar los desafíos tecnológicos, económicos y regulatorios asociados. Con un enfoque estratégico y colaborativo, Colombia puede aprovechar plenamente el potencial del hidrógeno blanco para avanzar hacia un futuro energético más resiliente, competitivo y respetuoso con el medio ambiente.

11. Recomendaciones

Realizar estudios comparativos exhaustivos de la huella de carbono asociada con la extracción y uso del hidrógeno natural en comparación con los combustibles fósiles tradicionales y otras fuentes de energía renovable, abordando aspectos específicos como las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero a lo largo de todo el ciclo de vida del hidrógeno natural.

Investigar y desarrollar tecnologías especializadas para la extracción de hidrógeno natural, priorizando la comprensión de los mecanismos de formación y atrapamiento en el subsuelo, así como la optimización de los procesos de extracción para aumentar la eficiencia y reducir los costos.

Explorar y proponer nuevas técnicas de almacenamiento de hidrógeno natural en acuíferos profundos, evaluando tanto su viabilidad técnica como económica para una implementación a gran escala, considerando también los aspectos relacionados con la seguridad y la integridad del almacenamiento a largo plazo.

Realizar investigaciones más profundas sobre las manifestaciones superficiales del hidrógeno natural, como las depresiones circulares, con el objetivo de comprender mejor su relación con las formaciones subterráneas y utilizar esta información para mejorar las técnicas de exploración y descubrir nuevas fuentes de hidrógeno natural.

Referencias Bibliográficas

- Alonso, J. (Febrero de 2003). Petrología Sedimentaria. Obtenido de Rocas evaporitas:
https://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1727/mod_resource/content/4/DocInt2003JA_PSevaportas2.pdf
- Antony Joseph (2023). Water Worlds in the Solar System: The prime targets in the search for life beyond Earth, Pages 167-200. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95717-5.00008-6>
- Berkner, L. V., & Marshall, L. C. (1966). Limitation on oxygen concentration in a primitive planetary atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 23(2), 133–143.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1966\)023<0133:l0ocia>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1966)023<0133:l0ocia>2.0.co;2)
- Blay-Roger, R., Bach, W., Bobadilla, L. F., Reina, T. R., Odriozola, J. A., Amils, R., & Blay, V. (2024). Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189(113888), 113888.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113888>
- Blay-Roger, R., Bach, W., Bobadilla, L. F., Reina, T. R., Odriozola, J. A., Amils, R., & Blay, V. (2024). Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113888.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113888>
- Вовк, Н., 1978. О природе водорода в месторождениях калийных солей. *Геохимия Молчанов, В. И. (s/f). Осадконакопление и свободный водород. Sbras.ru. Recuperado el 25 de febrero de 2024, de <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/science/publications/article-journal-osadkonakoplenie-i-svobodnyy-vodorod-1968-001701>*

- Bonitch, A., Leyton, S., Klauer, Á., Sena, J. S., Gómez, M., Rico, J. P., Giner, I., & Monteiro, M. L. (2024, 6 febrero). Colombia. Aproximación a la regulación sobre el Hidrógeno. Cuatrecasas. <https://www.cuatrecasas.com/es/latam/energia-infraestructura/art/colombia-hidrogeno-aproximacion-regulacion>
- Boreham, C. J., Sohn, J. H., Cox, N., Williams, J., Hong, Z., & Kendrick, M. A. (2021). Hydrogen and hydrocarbons associated with the Neoproterozoic Frog's Leg Gold Camp, Yilgarn Craton, Western Australia. *Chemical Geology*, 575(120098), 120098. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120098>
- Charlou, J. L., Donval, J. P., Konn, C., Ondréas, H., Fouquet, Y., Jean-Baptiste, P., & Fourré, E. (2010). High production and fluxes of H₂ and CH₄ and evidence of abiotic hydrocarbon synthesis by serpentinization in ultramafic-hosted hydrothermal systems on the Mid-Atlantic Ridge. En *Geophysical Monograph Series* (pp. 265–296). American Geophysical Union.
- Chaustre Celis, J. (2023). Modelo de negocios, viabilidad financiera y análisis de riesgo en proyectos de hidrógeno verde en el marco de la transición energética en Colombia. Universidad de los Andes.
- Conrad, R. (1996). Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO). *Microbiological Reviews*, 60(4), 609–640. <https://doi.org/10.1128/mr.60.4.609-640.1996>
- Conrad, Ralf, & Seiler, W. (1980). Contribution of hydrogen production by biological nitrogen fixation to the global hydrogen budget. *Journal of Geophysical Research*, 85(C10), 5493–5498. <https://doi.org/10.1029/jc085ic10p05493>

De Aragón, E. (2023, octubre 2). A la búsqueda y captura de reservas de hidrógeno natural.

Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/reservas-hidrogeno-natural-globales/Diego>.

Dubessy, J., Pagel, M., Beny, J.-M., Christensen, H., Hickel, B., Kosztolanyi, C., & Poty, B.

(1988). Radiolysis evidenced by H₂-O₂ and H₂-bearing fluid inclusions in three uranium deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5), 1155–1167.

[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90269-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90269-4)

Ehhalt, D. H., & Rohrer, F. (2009). The tropospheric cycle of H₂: a critical review. *Tellus. Series*

B, Chemical and physical meteorology, 61(3), 500. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2009.00416.x>

Extraer hidrógeno de campos petrolíferos y arenas bituminosas puede hacerse a bajo coste.

(2019, agosto 28). *El Periódico de la Energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/extraer-hidrogeno-de-campos-petroliferos-y-arenas-bituminosas-puede-hacerse-a-bajo-coste/>

Fu, Q., Sherwood Lollar, B., Horita, J., Lacrampe-Couloume, G., & Seyfried, W. E., Jr. (2007).

Abiotic formation of hydrocarbons under hydrothermal conditions: Constraints from chemical and isotope data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(8), 1982–1998.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.01.022>

Gregory, S., Barnett, M., Field, L., & Milodowski, A. (2019). Subsurface microbial hydrogen

cycling: Natural occurrence and implications for industry. *Microorganisms*, 7(2), 53.

<https://doi.org/10.3390/microorganisms7020053>

Guerrero, S. (2021). Injusticias epistémicas y crisis ambiental. Iztapalapa. *Revista de ciencias sociales y humanidades*, 42(90), 311-326,

<https://doi.org/10.28928/ri/902021/aot2/guerreromcmanuss> .

- Guillén, J., Calle, J., Gavidia, A., & Vélez, A. (2020). Desarrollo sostenible: Desde la mirada de preservación del medio ambiente colombiano. *Revista de ciencias sociales*, 26(4), 293-307, URI: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7687041>.
- Guilquiruca, I. (2023). Almacenaje subterráneo de hidrógeno verde en formaciones geológicas: caso estudio salar de atacama, Chile. Obtenido de Universidad de Chile.
- Hallis, L. J., Huss, G. R., Nagashima, K., Taylor, G. J., Halldórsson, S. A., Hilton, D. R., Mottl, M. J., & Meech, K. J. (2015). Evidence for primordial water in Earth's deep mantle. *Science (New York, N.Y.)*, 350(6262), 795–797. <https://doi.org/10.1126/science.aac4834>
- Karato, S.-I. (2006). Remote sensing of hydrogen in earth's mantle. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 62(1), 343–375. <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.62.15>
- Kremer, T., Ars, J., Laine, C., Mouquet, P., Peignard, L., Lenir, I., & Voisin, C. (2023). A new passive seismic monitoring strategy for the exploration of natural Hydrogen and Helium occurrences. 84th EAGE Annual Conference & Exhibition.
- Kuang, W., Arey, B. W., Dohnalkova, A. C., Kovarik, L., Mills, B., Menon, N. C., Seffens, R. J., & Simmons, K. L. (2023). Multi-scale imaging of high-pressure hydrogen induced damage in EPDM rubber using X-ray microcomputed tomography, helium-ion microscopy and transmission electron microscopy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(23), 8573–8587. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.004>
- Levshounova, S. P. (1991). Hydrogen in petroleum geochemistry. *Terra Nova*, 3(6), 579–585. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00199.x>
- Lin, L.-H., Slater, G. F., Sherwood Lollar, B., Lacrampe-Couloume, G., & Onstott, T. C. (2005). The yield and isotopic composition of radiolytic H₂, a potential energy source for the

- deep subsurface biosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(4), 893–903.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.032>
- Linares, J., & Moratilla, B. (2019). El hidrógeno y la energía. Editorial de la Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, segunda edición, Madrid, p. 104.
- Maiga, O., Deville, E., Laval, J., Prinzhofer, A., & Diallo, A. B. (2023). Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. *Scientific Reports*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38977-y>
- McCollom, T. M., & Bach, W. (2009). Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3), 856–875. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.032>
- McCollom, T. M., & Donaldson, C. (2016). Generation of hydrogen and methane during experimental low-temperature reaction of ultramafic rocks with water. *Astrobiology*, 16(6), 389–406. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1382>
- Moretti, I. (31 de Julio de 2023). Hidrógeno blanco: el combustible limpio del futuro. (S. G. Colombiano, Entrevistador) Obtenido de Hidrógeno blanco: el combustible limpio del futuro.
- Morita, R. Y. (1999). Is H₂ the universal energy source for long-term survival? *Microbial ecology*, 38(4), 307–320. <https://doi.org/10.1007/s002489901002>
- Muhammed, N. S., Haq, M. B., Al Shehri, D. A., Al-Ahmed, A., Rahman, M. M., Zaman, E., & Iglauer, S. (2023). Hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A comprehensive review. *Fuel (London, England)*, 337(127032), 127032.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127032>

Murray, J., Clément, A., Fritz, B., Schmittbuhl, J., Bordmann, V., & Fleury, J. M. (2020).

Abiotic hydrogen generation from biotite-rich granite: A case study of the Soultz-sous-Forêts geothermal site, France. *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 119(104631), 104631.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104631> Nesmelova, Z.N., Travnikova, L.G., 1973. Radiogenic gases in ancient salt deposits.

Nivin, V. A. (2009). Diffusively disseminated hydrogen-hydrocarbon gases in rocks of nepheline syenite complexes. *Geochemistry International*, 47(7), 672–691.

<https://doi.org/10.1134/s0016702909070039>

Novelli, P. C., Lang, P. M., Masarie, K. A., Hurst, D. F., Myers, R., & Elkins, J. W. (1999).

Molecular hydrogen in the troposphere: Global distribution and budget. *Journal of Geophysical Research*, 104(D23), 30427–30444. <https://doi.org/10.1029/1999jd900788>

Palfey, W. R., Rossman, G. R., Hwang, S., & Goddard, W. A. (2022). Hydride in oxide minerals - a potentially overlooked reservoir for hydrogen in the mantle. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2022*, MR35B-0061.

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGUFMMR35B0061P/abstract?>

Parnell, J., & Blamey, N. (2017). Global hydrogen reservoirs in basement and basins.

Geochemical Transactions, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12932-017-0041-4>

Páez, A. M. (10 de Enero de 2024). Climatetracker. Obtenido de ¿El nuevo oro blanco? La

promesa del hidrógeno natural en Colombia: <https://climatetrackerlatam.org/historias/el-nuevo-oro-blanco-la-promesa-del-hidrogeno-natural-en-colombia/#:~:text=Se%20sabe%20que%20hay%20hidr%C3%B3geno,de%20acuerdo%20con%20el%20SGC>

Peslier, A. H., Schönbächler, M., Busemann, H., & Karato, S.-I. (2017). Water in the earth's interior: Distribution and origin. *Space Science Reviews*, 212(1–2), 743–810.

<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0387-z>

Piché-Choquette, S., Khdhiri, M., & Constant, P. (2018). Dose-response relationships between environmentally-relevant H₂ concentrations and the biological sinks of H₂, CH₄ and CO in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 123, 190–199.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.008>

Ramirez, A. C., Penagos, F. G., Rodriguez, G., & Moretti, I. (Noviembre de 22 de 2023).

Geosciences. Obtenido de Natural H₂ Emissions in Colombian Ophiolites: First

Findings: <https://www.mdpi.com/2076-3263/13/12/358>

Ravaux, F., Sajjad, M., Zafar, H., Daoud, M. E., Kamoutsi, H., Aubry, C., Weston, J., Singh, N., Haidemenopoulos, G., & Anjum, D. H. (2023). Addressing the hydrogen entrapment in Al₂₀₂₄ alloys using scanning transmission electron microscopy and density functional theory. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 3(100026), 100026.

<https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2023.100026>

Raymond M. Coveney Jr. (2) Edwin. (1987). Serpentinization and the origin of hydrogen gas in

Kansas. *AAPG Bulletin*, 71(1), 39–48. [https://doi.org/10.1306/94886d3f-1704-11d7-](https://doi.org/10.1306/94886d3f-1704-11d7-8645000102c1865d)

[8645000102c1865d](https://doi.org/10.1306/94886d3f-1704-11d7-8645000102c1865d)

Rigollet, C., & Prinzhofer, A. (2022). Natural hydrogen: A new source of carbon-free and renewable energy that can compete with hydrocarbons. *First Break*, 40(10), 78–84.

<https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2022087>

- Romero, A. (2002). Las redes de información y su importancia para la investigación científica. *Revista Venezolana de Gerencia*, 7(19), 425-441, URI:
<https://www.redalyc.org/pdf/290/29001906.pdf>.
- Rubio, L. Q. (21 de Abril de 2023). El tiempo. Obtenido de ANH destinará \$ 170.000 millones para buscar hidrógeno blanco en Colombia:
<https://www.eltiempo.com/economia/sectores/anh-destinara-170-000-millones-para-buscar-hidrogeno-blanco-761498>
- Ruiz, A. (2023). Evaluación de impacto ambiental: la aceleración de los proyectos de generación de energías renovables aminora la exigencia de evaluación. *Anuario. Observatorio de políticas ambientales*, 23(1), 364-382, URI:
https://www.boe.es/biblioteca_juridica/anuarios_derecho/abrir_pdf.php?id=ANU-O-2023-10036500382.
- Sarı, E., & Çiftçi, E. (2024). Underground hydrogen storage in a depleted gas field for seasonal storage: A numerical case study of the Tekirdağ gas field. *Fuel (London, England)*, 358(130310), 130310. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130310>
- Schmidt, U. (1974). Molecular hydrogen in the atmosphere. *Tellus*, 26(1–2), 78–90.
<https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1974.tb01954.x>
- Scott, E. (2021). Exploring for native hydrogen. *Nature Reviews. Earth & Environment*, 2(9), 589–589. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00215-2>
- Su, H., Bhuiyan, S., Toda, H., Uesugi, K., Takeuchi, A., & Watanabe, Y. (2017). Influence of intermetallic particles on the initiation and growth behavior of hydrogen micropores during high-temperature exposure in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys. *Scripta Materialia*, 135, 19–23. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.03.020>

Su, Q., Zeller, E., & Angino, E. (1992). Inducing action of hydrogen migrating along faults on earthquakes. *Acta Seismologica Sinica (English Edition)*, 5(4), 841–847.

<https://doi.org/10.1007/bf02651032>

Tagawa, S., Sakamoto, N., Hirose, K., Yokoo, S., Hernlund, J., Ohishi, Y., & Yurimoto, H. (2021). Experimental evidence for hydrogen incorporation into Earth’s core. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22035-0>

Takai, K., Gamo, T., Tsunogai, U., Nakayama, N., Hirayama, H., Nealson, K. H., & Horikoshi, K. (2004). Geochemical and microbiological evidence for a hydrogen-based, hyperthermophilic subsurface lithoautotrophic microbial ecosystem (HyperSLiME) beneath an active deep-sea hydrothermal field. *Extremophiles: Life under Extreme Conditions*, 8(4), 269–282. <https://doi.org/10.1007/s00792-004-0386-3>

The potential for geologic hydrogen for next-generation energy. (s/f). [Usgs.gov](https://www.usgs.gov). Recuperado el 25 de febrero de 2024, de <https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy>

Tian, Q. N., Yao, S. Q., Shao, M. J., Zhang, W., & Wang, H. H. (2022). Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of “carbon neutrality”. *China Geology*, 5(4), 722-733.

<https://doi.org/10.31035/cg2022046>

Vázquez, J. A. R. (2023, marzo 17). Yacimientos de hidrógeno natural y renovable. *Avatar Energía*, blog de Energías Renovables. <https://avatarenergia.com/yacimientos-de-hidrogeno-patnatural-y-renovable/>

Vesga, I. E. (27 de Diciembre de 2023). Holland & Knight. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía de Colombia emite reglamentación sobre hidrógeno blanco:

<https://www.hklaw.com/en/insights/publications/2023/12/ministerio-de-minas-y-energia-de-colombia-emite-reglamentacion>

Wang, W., Liu, C., Zhang, D., Liu, W., Chen, L., & Liu, W. (2019). Radioactive genesis of hydrogen gas under geological conditions: An experimental study. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 93(4), 1125–1134. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14298>

Wiersberg, T., & Erzinger, J. (2008). Origin and spatial distribution of gas at seismogenic depths of the San Andreas Fault from drill-mud gas analysis. *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 23(6), 1675–1690. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.01.012>

World Economic Forum. (16 de January de 2024). Obtenido de White hydrogen can be a game-changer in Colombia's green transition. Here's why:

<https://www.weforum.org/agenda/2024/01/white-hydrogen-and-its-role-within-the-energy-transition/>

Yang, K., Kobeissi, S., Ling, N., Li, M., Esteban, L., May, E. F., & Johns, M. L. (2023). Measurement of hydrogen dispersion in rock cores using benchtop NMR. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(45), 17251–17260.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.197>

Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203(103140), 103140.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>

Anexos

Anexo A: Glosario

Análisis geomorfológicos: disciplina que estudia el relieve de la superficie terrestre describiendo analíticamente sus formas y procesos generadores a fin de explicar su origen e interpretar su dinámica.

Anomalías geomórficas: son características inusuales o distintivas en la forma de la superficie terrestre que no se ajustan al patrón típico de la región circundante. Estas anomalías pueden manifestarse de diversas formas, como depresiones, colinas, formas irregulares, etc.

Arena fangosa: hábitat caracterizado por sedimentos finos, fangosos y ricos en materia orgánica.

Bacterias fijadoras: las bacterias fijadoras son pequeños organismos que tienen la habilidad de convertir el nitrógeno del aire en una forma que las plantas pueden usar para crecer.

Basaltos: son rocas ígneas de grano fino y color oscuro que se forman por el enfriamiento rápido del magma basáltico en la superficie terrestre. Son abundantes en la corteza oceánica y comúnmente tienen una composición rica en minerales ferromagnesianos.

Biogénicamente: se refiere a procesos o materiales que son producidos por organismos vivos o por actividades biológicas. Por ejemplo, algunas rocas sedimentarias se forman a partir de la acumulación de restos de organismos marinos.

Brucita: es un mineral con fórmula química $Mg(OH)_2$. Es un hidróxido de magnesio que se encuentra comúnmente como un mineral secundario en la alteración de minerales de magnesio.

Carbonatadas: se refiere a rocas que contienen minerales carbonatados, como la calcita ($CaCO_3$) o la dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). Estas rocas se forman por la precipitación o acumulación de carbonatos en ambientes sedimentarios.

Catalizador: es una sustancia que acelera la velocidad de una reacción química sin ser consumida en el proceso. Actúa proporcionando una ruta alternativa de menor energía para que la reacción ocurra más rápidamente.

Descomposición anaeróbica: es un proceso de descomposición de materia orgánica que ocurre en ausencia de oxígeno.

Desgasificación: es el proceso mediante el cual un líquido o sólido pierde gases disueltos en su interior.

Depósito kárstico: un tipo de topografía formada en zonas con una presencia generalizada de rocas carbonatadas a través de la disolución. Las fosas de hundimiento, cavernas y superficies marcadas de hoyos son rasgos típicos de una topografía cárstica.

Ecosistemas microbianos: los ecosistemas microbianos son comunidades de microorganismos que viven e interactúan en un entorno específico. Estos microorganismos pueden incluir bacterias, arqueas, hongos, protistas y virus, entre otros.

Efecto diagenéticos: relativo a la diagénesis, que es la alteración física, química o biológica de los sedimentos, que se convierten en rocas sedimentarias, a temperaturas y presiones relativamente bajas, que puede producir cambios en la mineralogía y la textura original de la roca.

Entornos intracratónicos: consisten en rellenos de grandes áreas dentro de las masas estables de la corteza continental. Se caracterizan por depósitos continentales y marinos someros, con importantes gaps, hiatos entre megasecuencias deposicionales.

Estribaciones: es un grupo de pequeñas montañas que derivan de un sistema orográfico mayor, dígase cordillera o sierra, y que generalmente son más bajas que este; también a ramales cortos que salen de dichos sistemas.

Ferromagnesianos: se refiere a minerales que contienen hierro (Fe) y magnesio (Mg) en su composición química. Estos minerales son comunes en rocas ígneas y metamórficas y tienen propiedades magnéticas significativas.

In situ: significa "en el lugar" o "en la posición original". Se refiere a llevar a cabo una acción o proceso exactamente donde se encuentra la materia o el fenómeno que se quiere tratar, sin necesidad de moverlos.

Lixiviación: es un proceso en el cual un solvente líquido, generalmente agua, se utiliza para extraer sustancias solubles de una sustancia sólida, como minerales en una roca. Es comúnmente utilizada en la minería para separar metales valiosos de los minerales de desecho.

Manto inferior: es una capa de la Tierra ubicada debajo de la corteza terrestre y encima del núcleo externo. Constituye una de las capas más grandes y voluminosas del planeta.

Metasomatismo: es un proceso geológico interno donde soluciones químicas activas reaccionan con minerales preexistentes en las rocas, añadiendo o eliminando elementos químicos y formando nuevos minerales que modifican la composición de la roca. Puede ocurrir durante el metamorfismo o por contacto con fluidos calientes.

Minerales ferromagnéticos: son minerales que tienen propiedades magnéticas significativas en presencia de un campo magnético externo. Estos minerales tienen una alta susceptibilidad magnética y pueden ser atraídos por un imán.

Peridotitas: son rocas ultramáficas compuestas principalmente de minerales ricos en magnesio y hierro, como el olivino y la piroxena. Se encuentran comúnmente en el manto terrestre y son una de las principales rocas del manto superior.

Pila sedimentaria: representa una secuencia estratigráfica que puede incluir diferentes tipos de rocas sedimentarias, como areniscas, limolitas, lutitas, conglomerados y carbonatos, entre otros.

Procesos bióticos: los procesos bióticos son aquellos que involucran la actividad de los organismos vivos en un ecosistema.

Proceso metamórfico: es un conjunto de cambios físicos y químicos que ocurren en las rocas debido a la exposición a altas temperaturas, presiones y, a veces, a la actividad de fluidos durante un período de tiempo prolongado.

Radiación ionizante: es un tipo de energía que tiene la capacidad de liberar partículas cargadas (iones) al interactuar con la materia. Puede provenir de fuentes naturales, como el sol, o de actividades humanas, como los rayos X o la radioterapia.

Rocas clásticas: son rocas sedimentarias formadas por la acumulación y cementación de fragmentos de rocas preexistentes, llamados clastos. Estos clastos pueden variar en tamaño y están unidos por un material cementante.

Rocas ultramáficas: son un tipo de roca ígnea que tiene una composición mineralógica dominada por minerales ricos en magnesio (Mg) y hierro (Fe).