

EDUCACIÓN, CREATIVIDAD E INTELIGENCIA ARTIFICIAL: NUEVOS HORIZONTES PARA EL APRENDIZAJE. ACTAS DEL VIII CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE APRENDIZAJE, INNOVACIÓN Y COOPERACIÓN, CINAIC 2025

María Luisa Sein-Echaluce Lacleta, Ángel Fidalgo Blanco y Francisco José García Peñalvo (coords.)

1º Edición. Zaragoza, 2025

Edita: Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza.



Servicio de
Publicaciones
Universidad Zaragoza

EBOOK ISBN 978-84-10169-60-9

DOI 10.26754/uz.978-84-10169-60-9



Esta obra se encuentra bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial (ccBY-NC). Ver descripción de esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Referencia a esta obra:

Sein-Echaluce Lacleta, M.L., Fidalgo Blanco, A. & García-Peñalvo, F.J. (coords.) (2025). *Educación, Creatividad e Inteligencia Artificial: nuevos horizontes para el Aprendizaje. Actas del VIII Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Cooperación. CINAIC 2025 (11-13 de Junio de 2025, Madrid, España)*. Zaragoza. Servicio de Publicaciones Universidad de Zaragoza. DOI 10.26754/uz.978-84-10169-60-9

Simulación del futuro: Aplicación de software en la investigación y enseñanza del almacenamiento subterráneo de hidrógeno

Simulation of the future: Software application in underground hydrogen storage research and education

Juan Pous de la Flor¹, Juan Pous Cabello², María José Herrero Peña²
juan.pous@upm.es, j.pous@alumnos.upm.es, mariajose.herrero@fgupm.upm.es

¹Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
E.T.S.I.M.E (Universidad Politécnica de Madrid)

Madrid, España

²Laboratorio Oficial Madariaga (LOM)
Centro TECMINERGY (Universidad Politécnica
de Madrid)
Madrid, España

Resumen- La Universidad no solo lidera la investigación, sino que también tiene la responsabilidad de transferir ese conocimiento al alumnado. Sin embargo, en campos emergentes como el almacenamiento geológico de hidrógeno, a menudo carecemos de herramientas específicas. Ante este desafío, el investigador debe innovar y adaptar soluciones técnicamente viables. Comprender el comportamiento del hidrógeno en el subsuelo, donde coexisten otros gases, agua y rocas bajo condiciones de presión y temperatura conocidas, requiere respuestas: ¿reacciona? ¿migra? ¿se escapa? ¿fragiliza el entorno? En este contexto, el profesorado necesita validar hipótesis con herramientas sólidas. El uso de software especializado se ha convertido en una respuesta innovadora y eficaz tanto en docencia como en investigación. No obstante, estas herramientas no siempre están disponibles o no se ajustan a los objetivos. Ahí comienza el reto: adaptarlas, modificarlas o desarrollarlas desde cero para formar al estudiantado en entornos reales de simulación científica.

Palabras clave: *Software, hidrógeno, adaptación tecnológica, simulación.*

Abstract- Universities not only lead in research, but also have a responsibility to transfer knowledge to students. However, in emerging fields such as geological hydrogen storage, we often lack specific tools. Faced with this challenge, the researcher must innovate and adapt technically feasible solutions. Understanding the behaviour of hydrogen in the subsurface where other gases, water and rocks coexist under known pressure and temperature conditions requires answers: does it react? does it migrate? does it escape? does it fragilise the environment? In this context, teachers need to validate hypotheses with solid tools. The use of specialised software has become an innovative and effective response in both teaching and research. However, these tools are not always available or suited to the objectives. This is where the challenge begins: to adapt, modify or develop them from scratch to train students in real scientific simulation environments.

Keywords: *Software, hydrogen, technology adaptation, simulation.*

1. INTRODUCCIÓN

El interés del alumnado por comprender en profundidad los temas que se les presentan es una constante alentadora. Como profesionales de la enseñanza, debemos estar preparados para ofrecer respuestas científicas, rigurosas y actualizadas, sin subestimar su capacidad crítica ni su nivel de conocimientos.

Los alumnos conocen lo histórico y esto les sirve para investigar y preguntarse a diario sobre las nuevas materias en las que están siendo formados.

Al mismo tiempo, las ciencias evolucionan rápidamente, y con ellas, los desafíos energéticos y tecnológicos. Uno de los nuevos paradigmas es el almacenamiento subterráneo de hidrógeno, una idea que hasta hace poco no se consideraba viable, ya que este gas raramente se encuentra libre en la naturaleza.

Con el auge del hidrógeno verde como vector energético clave en la transición hacia fuentes más limpias, surge una cuestión fundamental: ¿dónde almacenarlo? El subsuelo aparece como una opción económicamente viable, pero plantea importantes incógnitas técnicas aún sin resolver (Evro, Oni y Tomomewo, 2024).

Como señala la literatura científica, los yacimientos deplegados de hidrocarburos han demostrado ser estructuras selladas y estables; sin embargo, existe aún escasa comprensión sobre las interacciones entre el hidrógeno y las rocas y fluidos del subsuelo, debido a la falta de datos procedentes de ensayos en campo (Ebere y Jabbari, 2024).

Ante la falta de herramientas específicas, es necesario recurrir a softwares de simulación. Estas tecnologías, ampliamente utilizadas en investigación y docencia, permiten explorar hipótesis complejas. No obstante, comprobamos que no existe una única solución informática que aborde todas las variables del problema, lo que nos llevó a combinar diferentes programas, adaptar herramientas existentes e incluso desarrollar nuevas soluciones para afrontar este reto emergente.

2. CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN

Este trabajo tiene como objetivo presentar la solución desarrollada para abordar el desafío del almacenamiento subterráneo de hidrógeno, así como los parámetros y herramientas considerados más adecuados para su implementación.

Para comenzar, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los softwares de simulación existentes (Eltahan et al., 2025). A

3. RESULTADOS

A. Caracterización geomecánica

partir de este estudio, se seleccionaron aquellos que ofrecían funcionalidades más apropiadas para nuestras necesidades específicas. Se valoraron varias opciones como PHREEQC, descartado por su limitación en modelar sistemas con gases y rocas porosas, y Aspen Plus, que si bien cuenta con elevadas prestaciones, está más orientado a procesos industriales consolidados y presenta un coste de licencia elevado, lo que lo hace poco práctico en entornos educativos.

Por estas razones se optó por utilizar el software TOUGH+ y el módulo RealGasBrine, que permiten la simulación de flujos multicomponente de gases en medios porosos y condiciones de alta presión y temperatura, con capacidad para integrar reacciones geoquímicas y comportamiento de fases. Estas herramientas requirieron ciertas modificaciones para ajustarse a los parámetros específicos de nuestro caso de estudio, incluyendo la representación de compuestos como hidrógeno, metano, nitrógeno y agua, en diferentes fases y condiciones termodinámicas.

En paralelo, se definieron cuidadosamente los parámetros físicos, químicos y mecánicos esenciales, junto con la clasificación de los materiales presentes y el comportamiento de los distintos gases involucrados en el proceso.

Una vez seleccionado el software junto con las modificaciones oportunas a realizar, para adaptarlo al caso de estudio, se procedió a crear un modelo educativo en desarrollo, tratando de crear una herramienta de aprendizaje que permitiera a los alumnos la adquisición de nuevos conocimientos en el campo objeto de estudio, debido a la dificultad existente en el aprendizaje de esta materia en un entorno real. Se hace complicado en el ámbito de la docencia, el poder realizar visitas a este tipo de emplazamientos.

Se ha tratado de realizar un proyecto de innovación educativa en relación a conceptos de gran actualidad y desarrollo, como el almacenamiento subterráneo de hidrógeno. Se han implementado las nuevas tecnologías de información, proponiendo un software accesible que permita a los alumnos realizar sus propias simulaciones de almacenamientos subterráneos e implementar un enfoque de enseñanza efectiva a través de la integración tecnológica.

Además del diseño técnico, el modelo educativo planteado propone un entorno de aprendizaje activo, donde el alumnado se enfrenta a problemas reales mediante simulaciones interactivas. Esto favorece el desarrollo del pensamiento crítico, la interdisciplinariedad y la comprensión profunda de fenómenos complejos. El uso didáctico del software, permite reforzar conceptos relacionados con las titulaciones impartidos en nuestra escuela (geología, física, química, mecánica de fluidos, etc.) mediante una metodología basada en la resolución de problemas.

El siguiente paso a seguir, una vez implementado el proyecto de innovación docente, sería analizar y valorar la mejora en la comprensión de los conceptos relacionados con el hidrógeno en un entorno geológico del alumnado, a través de un cuestionario inicial y otro final. Finalmente, se mediría el grado de satisfacción de los alumnos en relación a la nueva metodología a través de un cuestionario de escala Likert.

A partir de los datos obtenidos mediante estudios geofísicos, fue posible conocer la morfología y volumen potencial del depósito, lo que permitió estimar su capacidad de almacenamiento. La litología del área de estudio se determinó a través de información proveniente de sondeos y estudios geológicos específicos.

Uno de los factores clave fue la identificación de materiales susceptibles de reaccionar con el hidrógeno, comprometiendo la integridad estructural del sistema (Li et al., 2023). Además, se prestó especial atención a las presiones de operación y al comportamiento frente a ciclos repetidos de carga y descarga, para evaluar fenómenos como la fatiga estructural (Masoudi et al., 2024).

La simulación geomecánica se llevó a cabo utilizando Flac3D, considerando especialmente la posible presencia de óxidos de hierro, cuya interacción con el hidrógeno puede reducir significativamente las propiedades mecánicas del medio (Jabour y Hassan, 2022). Se estableció un rango de operación entre 20 y 90 bares, y se realizaron pruebas de resistencia hasta 200 bares como presión máxima.

Los resultados fueron alentadores, ya que el sistema mostró un buen comportamiento estructural incluso bajo condiciones extremas. En la Figura 1 se muestra la deformación simulada a 95 bares.

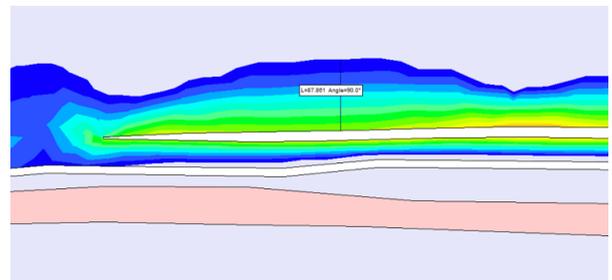


Figura 1. Simulación geomecánica a 95 bares de presión.

Las deformaciones observadas en ese nivel no comprometieron la estabilidad del sistema. Sin embargo, tras diversas iteraciones, se concluyó que el rango óptimo de operación para preservar la integridad del sistema estaría entre 20 y 80 bares, manteniendo una capacidad de almacenamiento considerable y garantizando la seguridad estructural.

B. Caracterización geoquímica

Tomando como base los datos geofísicos reales, los resultados de la simulación geomecánica anterior y la composición de los gases presentes en el yacimiento, se procedió a una simulación geoquímica avanzada.

Esta modelización tuvo en cuenta las interacciones entre cuatro compuestos en distintas fases: metano, nitrógeno, agua e hidrógeno (Higgs et al., 2023). La simulación permitió observar el comportamiento de estos gases en el subsuelo, revelando que no se mezclan completamente, sino que generan zonas de interfaz con diferentes proporciones de mezcla.

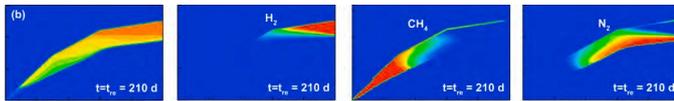


Figura 2. Simulación química del comportamiento de gases en subsuelo.

Este tipo de visualización ofrece al usuario (y al estudiante) una comprensión clara de los fenómenos que ocurren en el interior de la Tierra.

4. CONCLUSIONES

La utilización de herramientas avanzadas de simulación, junto con sus respectivas adaptaciones y programaciones específicas, ha permitido arrojar luz sobre una realidad hasta ahora poco explorada: el comportamiento del hidrógeno en condiciones subterráneas de almacenamiento. Esta implementación representa un avance significativo tanto en el ámbito científico como en el educativo, ya que permite interpretar, explicar y visualizar fenómenos complejos de manera comprensible y rigurosa.

Gracias a estas simulaciones, el profesorado y los investigadores pueden ofrecer al alumnado y a los profesionales del sector una visión clara y fundamentada de los procesos que ocurren en el subsuelo al introducir hidrógeno en un entorno geológico. Este enfoque transforma un fenómeno teórico en un resultado tangible, comprensible y visualizable, facilitando un aprendizaje activo y aplicable.

Además, el modelo desarrollado es escalable y flexible, lo que abre la puerta a futuras adaptaciones específicas a contextos geológicos concretos, considerando condiciones físicas, químicas y operativas definidas. Esta capacidad de predicción y personalización representa una ventaja clave tanto para la docencia como para el diseño y planificación de proyectos reales, alineando la formación académica con las necesidades del sector energético en plena transición.

En el plano educativo, la creación de un modelo docente basado en entornos virtuales de simulación científica representa una innovación metodológica de gran valor. Frente a la imposibilidad de realizar prácticas de campo en emplazamientos reales de almacenamiento subterráneo, el uso de estas herramientas permite replicar en el aula situaciones realistas, planteando retos y desafíos complejos que fomentan el pensamiento crítico, el aprendizaje basado en problemas y la adquisición de competencias digitales avanzadas.

En este contexto, el proyecto no solo introduce tecnología en el aula, sino que la convierte en una herramienta pedagógica activa. La implementación del software, adaptado a las capacidades y necesidades del alumnado, permite que estos participen directamente en el proceso de simulación, tomando decisiones, analizando resultados y comprendiendo los límites del modelo. Así, se impulsa un rol más activo del estudiante, transformándolo en sujeto protagonista de su aprendizaje.

Está previsto, además, evaluar el impacto educativo de esta propuesta mediante un protocolo de análisis que incluye cuestionarios iniciales y finales sobre conocimientos, y una

escala Likert de satisfacción. De esta manera, se podrá valorar de forma objetiva la mejora en la comprensión de los conceptos relacionados con el hidrógeno, así como la aceptación de esta metodología por parte del alumnado. La información servirá de base para futuras mejoras e iteraciones del modelo docente.

En definitiva, tanto el alumnado como el sector energético, incluyendo tanto a los actores tradicionales como a las nuevas empresas emergentes enfocadas en la transición energética, cuenta ahora con una herramienta innovadora que les permite anticipar y analizar el comportamiento del almacenamiento subterráneo de hidrógeno antes de llevar a cabo una primera inyección real. Esto se traduce en una optimización de recursos, una reducción de riesgos y un incremento significativo de la viabilidad técnica y estratégica de los proyectos, así como de las competencias del alumnado.

REFERENCIAS

- Ebere, F. O. y Jabbari, H. (2024). Unlocking underground hydrogen storage potential: Geochemical characterization of North Dakota's geological formation. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 93, 250-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.330>
- Eltahan, E., Albadan, D. J., Delshad, M., Sepehrnoori, K. y Alpak, F. O. (2025). Optimizing hydrogen storage in the subsurface using a reservoir-simulation-based and deep-learning-accelerated optimization method. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 119, 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.031>
- Evro, S., Oni, B. A. y Tomomewo, O. S. (2024). Repurposing depleted unconventional reservoirs for hydrogen storage: Challenges and opportunities. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 99, 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.212>
- Higgs, S., Da Wang, Y., Sun, C., Ennis-King, J., Jackson, S. J., Armstrong, R. T. y Mostaghimi, P. (2023). Comparative analysis of hydrogen, methane and nitrogen relative permeability: Implications for Underground Hydrogen Storage. *Journal Of Energy Storage*, 73, 108827. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108827>
- Jabbour, K. y Hassan, N. E. (2022). Optimized conditions for reduction of iron (III) oxide into metallic form under hydrogen atmosphere: A thermodynamic approach. *Chemical Engineering Science*, 252, 117297. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117297>
- Li, J., Wu, Z., Zhu, L., Zhang, Z., Teng, L., Zhang, L., Lu, C., Wang, R. y Zhang, C. (2023). Investigations of temperature effects on hydrogen diffusion and hydrogen embrittlement of X80 pipeline steel under electrochemical hydrogen charging environment. *Corrosion Science*, 223, 111460. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111460>
- Masoudi, M., Hassanpouryouzband, A., Hellevang, H. y Haszeldine, R. S. (2024). Lined rock caverns: A hydrogen storage solution. *Journal Of Energy Storage*, 84, 110927. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110927>