

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de almacenamiento geológico de Hidrógeno Verde en Uruguay en las cuencas sedimentarias *onshore* a través de una caracterización estructural y estratigráfica en las áreas de mayor favorabilidad.

CONTEXTO ENERGÉTICO

Uruguay se encuentra llevando a cabo la segunda transición energética. Debido a la complementariedad de los recursos energéticos solar y eólico, Uruguay cuenta con condiciones muy favorables para la producción de hidrógeno verde y sus derivados. Adicionalmente, la presencia de plantas de biomasa en las zonas más propicias para el desarrollo del hidrógeno verde, con acceso a CO₂ biogénico, favorecería la producción de derivados de hidrógeno tales como fertilizantes y metanol verde. En este contexto, la "Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y Derivados del Uruguay" establece los objetivos de producir 1 Mt de hidrógeno verde al año en 2040, lo cual supone la necesidad de instalar 18 GW de energía renovable y 9 GW de electrolizadores. Esta meta implicaría la necesidad de almacenamiento a gran escala, siendo el almacenamiento geológico una alternativa adecuada a considerar.

ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE H₂

El almacenamiento de energía se considera como uno de los elementos claves para la sustentabilidad del suministro energético en el siglo XXI (Tarkowski, 2019). En orden para almacenar energía a escala de GWhr o TWhr, más allá de la capacidad de instalaciones superficiales, grandes volúmenes de H₂ serán necesarios para balancear efectivamente las fluctuaciones de demanda vs suministro (Hashemi et al., 2021). A pesar de que almacenamiento geológico de H₂ no es aún una práctica ampliamente disponible y técnicamente viable a gran escala, las proyecciones de desarrollo de economías de H₂ propiciaron su consideración.

Los almacenamientos geológicos de H₂ se clasifican en convencionales (cuevas de sal, acuíferos salinos, campos de hidrocarburos depletados) y no convencionales (minas de carbón abandonadas, cuevas/minas de rocas duras revestidas, cuevas/minas refrigeradas) (Muhammed et al., 2022).

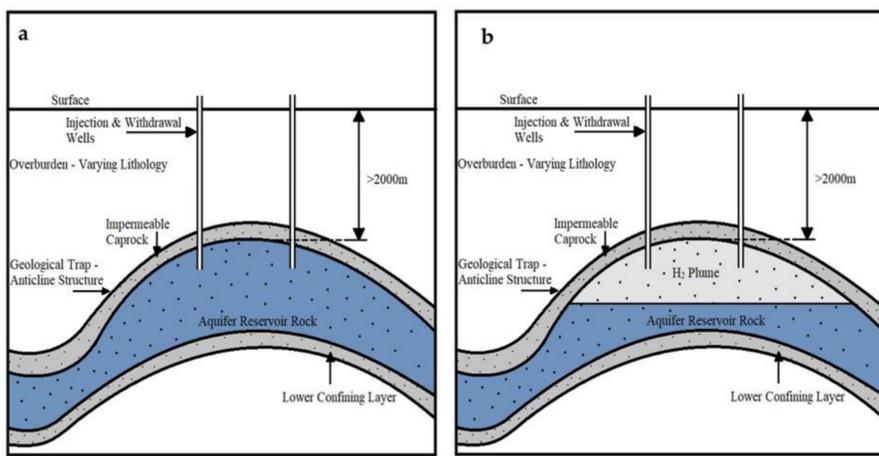


Figura 1: Esquema de acuífero (a) antes de la inyección de H₂ y (b) después de la inyección de H₂

Cuatro formas de almacenamiento se pueden definir, a partir de la combinación de la forma de energía inicial producida, la energía final consumida y los métodos de conversión:

- 1) H₂ puro: aplicación en celdas de combustibles (cuevas salinas)
- 2) H₂ + gas natural: objetivos de transporte (6-15% H₂)
- 3) Mezcla rica en H₂ con CO, CH₄ y CO₂ (gas de síntesis o gas ciudad)
- 4) Reactor subterráneo de metanización: representa una mezcla de H₂ con CO₂ en presencia de bacterias metanogénicas.

A pesar del incipiente desarrollo, varios proyectos alrededor del mundo han resultado exitosos o se encuentran en etapa de desarrollo.

Tabla 1: Listado de proyectos de almacenamiento geológico de hidrógeno (Hematpur et al., 2023)

Country	Project name	Storage fluid	Storage volume (1,000 m ³)	Type of storage	Status	References
Argentina	Hychico-diadema	CO ₂ & H ₂	49,500	DGR	P	www.hychico.com.ar
Austria	RAG-Sun Storage	NGH	6,000,000	DGR	P	www.rag-austria.at
Czech Republic	RWE-Haje	NGH	100,000	Aquífer	P	www.rwe-gasstorage.cz
	RWE-Lobodice	NGH	100,000	Aquífer	S	www.rwe-gasstorage.cz
Denmark	GHH	H ₂	66	Salt cavern	P	www.greenhydrogenhub.dk
	ANGUS+	H ₂	-	Geological formations	P	www.angusplus.de
EU countries	HyStorIES	H ₂	-	DGR and aquífer	P	Londe (2021)
	HyUnder	H ₂	4,000	Salt cavern	P	www.hyunder.eu
France	HyPster	H ₂	484	Salt cavern	P	HyPSTER... (2021)
	TEREGA	H ₂	3,300	Salt cavern	P	www.terega.fr
Germany	Beynes	NGH	330,000	Aquífer	S	Liebscher et al. (2016)
	HyCAVmobil	H ₂	500	Salt cavern	S	Thaysen et al. (2021)
	HYPOS	H ₂	-	Salt cavern	P	HYPOS... (2019)
	InSpEE	H ₂	-	Salt cavern	P	Zapf et al. (2015)
	HyINTEGRER	H ₂	-	DGR	P	Boersheim et al. (2019)
Germany and Austria	Ketzin	NGH	130,000	Aquífer	S	Liebscher et al. (2016)
	Kiel	NGH	32	Salt cavern	S	Liebscher et al. (2016)
Germany and Austria	H ₂ STORE	H ₂	-	DGR	P	Henkel et al. (2014)
Ireland	Green Hydrogen @ Kinsale	H ₂	990	DGR	P	www.energy-storage.news
	HyStock	H ₂	66	Salt cavern	S	www.hystock.nl

REFERENCIAS

- Hashemi, L., Blunt, M., Hajibeygi, H. (2021). Pore-scale modelling and sensitivity analyses of hydrogen-brine multiphase flow in geological porous media. *Sci. Rep.* 11, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-87490-7>.
- Hematpur, H., Abdollahi, R., Rostami, S., Haghighi, M., Blunt, M. J. (2023). Review of underground hydrogen storage: Concepts and challenges. *Advances in Geo-Energy Research*, 7(2). <https://doi.org/10.46690/ager.2023.02.05>.
- Muhammed, N. S., Haq, B., Al Shehri, D., Al-Ahmed, A., Rahman, M. M., Zaman, E. (2022). A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future Outlook. *Energy Reports*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.002>.
- Morales, E., Veroslavsky, G., Manganelli, A., Marmisolle, J., Pedro, A., Samaniego, L., Plenc, F., Umpiérrez, R., Ferreiro, M., Morales, M. (2021). Potential of geothermal energy in the onshore sedimentary basins of Uruguay. *Geothermics*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102165>.
- Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051>.

Netherlands	LSES	H ₂	14,000	Salt cavern	P	Groenberg et al. (2020)
	LSES	H ₂	75,000	DGR	P	Groenberg et al. (2020)
Sweden and Finland	HYBRIT	H ₂	120	Lined rock cavern	P	www.hybriddevelopment.se
	Aldbrough	NGH	330,000	Salt cavern	P	www.ssethermal.com
UK	HyStorPor	H ₂	-	Geological formations	P	www.gtr.ukri.org
	Teesside	H ₂	210	Salt cavern	S	Liebscher et al. (2016)
USA	SHASTA	NGH	-	DGR	P	www.edx.netl.doe.gov
	Spindletop	H ₂	906	Salt cavern	S	Liebscher et al. (2016)
	Clemens Dome	H ₂	580	Salt cavern	S	Liebscher et al. (2016)
	Moss Bluff	H ₂	566	Salt cavern	S	Liebscher et al. (2016)

Note: P denotes prospective, S denotes successful, GHH denotes green hydrogen hub Denmark, DGR denotes depleted gas reservoir, NGH denotes natural gas & H₂.

METODOLOGÍA

Para la realización del presente estudio se seguirán las siguientes etapas:

- Revisión de áreas de mayor favorabilidad de proyectos de Hidrógeno Verde, a partir de fuente de base de datos de recursos renovables, así como de cálculos del potencial de generación de H₂ a partir del recurso eólico y solar a escala departamental.
- Caracterización geológica estructural y estratigráfica de la región resultante a partir de datos de sísmica 2D y pozos profundos.
- Localización de estructuras geológicas propicias para almacenamiento, y de ser posible, cálculo de capacidad de almacenamiento volumétrica.

RESULTADOS ESPERADOS

Según la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde y a partir de la base de datos de fuentes renovables actualmente, se infiere que la región al norte del Río Negro representa la de mayor favorabilidad para el desarrollo de proyectos de Hidrógeno Verde. Mas precisamente, los departamentos del litoral debido a su conexión con el Río Uruguay, facilitando la presencia de agua como recurso indispensable, así como de vías de transporte.

En este sentido, la disponibilidad de datos geológicos y geofísicos de mayor calidad se ubican en los departamentos de Salto y Artigas. El presente trabajo pretende entonces realizar una caracterización estructural y estratigráfica de dicha región. Los resultados serán mapas de contorno estructural de basamento, así como de espesores de las principales secuencias. Asimismo, se interpretarán las principales estructuras tales como fallas, ya que su identificación es indispensable para caracterizar estructuras geológicas favorables. Se localizarán las potenciales estructuras de almacenamiento.

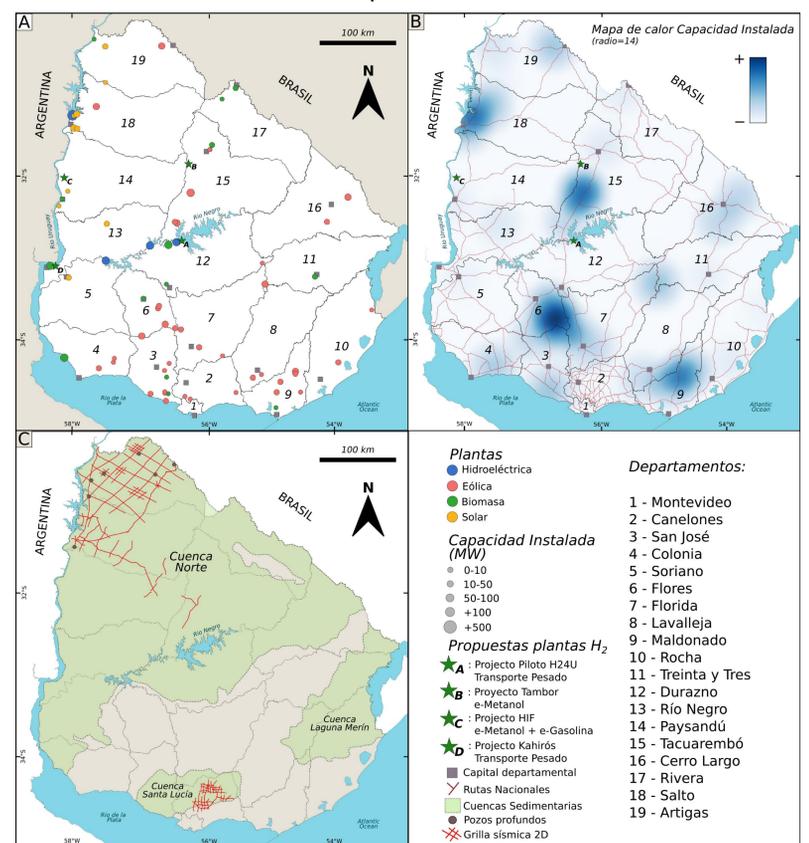


Figura 2: A: Fuentes renovables en Uruguay. B: Mapa de calor de capacidad instalada de fuentes renovables eólica y solar. C: Cuencas sedimentarias onshore indicando datos sísmicos.

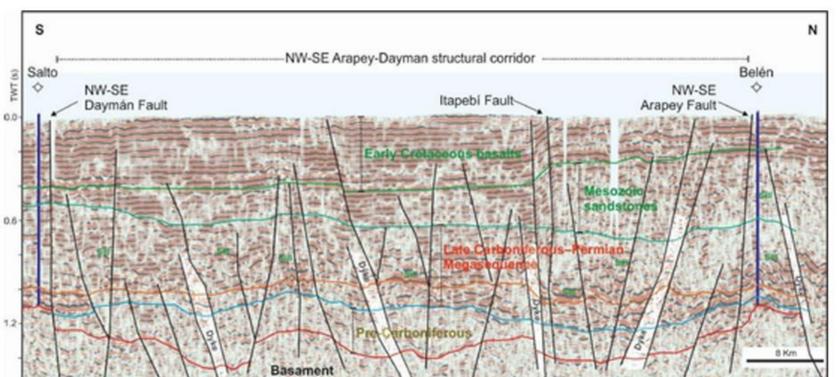


Figura 3: Línea sísmica interpretada (Norte-Sur) al oeste del departamento de Salto (Morales et al., 2021).