

# Dispositivo experimental para evaluar el mecanismo trampa de mineralización en areniscas como medio de almacenamiento de CO<sub>2</sub> supercrítico (scCO<sub>2</sub>)

*Experimental device to evaluate mineral trapping in sandstones as a means of supercritical CO<sub>2</sub> (scCO<sub>2</sub>) storage*

Laura-María Valle-Falcones<sup>1\*</sup>, Carlos Grima-Olmedo<sup>2</sup>, Ramón Rodríguez-Pons<sup>3</sup> y Carlos Llopis-Albert<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup> Universidad Politécnica de Madrid (España)

<sup>4</sup> Universidad Politécnica de Valencia (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9202>

Las tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC) se presentan como una opción que podría ser viable para mitigar las emisiones del gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera, constituyendo una alternativa para luchar contra el ya probado cambio climático [1]. La última etapa abordada por estas tecnologías es el almacenamiento geológico del CO<sub>2</sub>, siendo para ello necesario encontrar ambientes geológicos adecuados que garanticen su éxito. Entre las estructuras geológicas posibles se encuentran los yacimientos agotados de hidrocarburos, las capas de carbón subterráneas y los acuíferos salinos profundos [2], siendo esta última opción la que tiene más potencial a escala industrial en España.

Debido a la necesidad de encontrar almacenamientos geológicos que garanticen la viabilidad técnica del proceso de inyección y la estanqueidad del gas [3], resulta necesario desarrollar tecnologías capaces de afrontar estos retos asociados a los proyectos CAC.

En la selección de un acuífero salino profundo para almacenamiento de CO<sub>2</sub> influyen las propiedades petrofísicas y geomecánicas del terreno, así como el alcance de los mecanismos trampa desarrollados a lo largo del tiempo que determinan la capacidad del almacén y la viabilidad técnica del proceso de inyección. Además, se debe garantizar en

todo momento la estanqueidad del CO<sub>2</sub> almacenado en el largo plazo. Los mecanismos trampa para el CO<sub>2</sub> que pueden desarrollarse en un almacén geológico profundo fueron definidos en 2005 por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [4], quedando recogidos de forma general en la Fig. 1 los tiempos de actuación de cada uno de ellos, durante y después del proceso de inyección.

El mecanismo trampa de mineralización o secuestro mineral se basa en las reacciones químicas que se generan entre los minerales de la roca almacén y la mezcla CO<sub>2</sub>/salmuera. La disolución mineral produce nuevas especies que fijan el CO<sub>2</sub> y modifican la porosidad y permeabilidad del almacenamiento, alterándose el pH de la mezcla CO<sub>2</sub>-salmuera-roca almacén. Mientras que el secuestro mineral se incrementa con el paso del tiempo, su velocidad de actuación se encuentra condicionada por el tamaño de partícula de la roca almacén, y por la temperatura y presión de inyección del CO<sub>2</sub>.

La necesidad de aumentar la temperatura representa un elevado consumo energético que se puede evitar mediante el empleo de bacterias y hongos [5]. És-

tas producen la disolución de los ácidos orgánicos creando protones que atacan la superficie del mineral por las partes oxigenadas, haciendo que la barrera metal-oxígeno sea más débil, acelerando la disolución de los silicatos magnésicos.

Seifritz en 1990 [6] propuso aplicar las reacciones de carbonatación para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, siendo los primeros estudios desarrollados en Los Alamos National Laboratory (LANL) entre 1995 y 1997 [7]. La carbonatación acuosa consiste en la disolución del CO<sub>2</sub> en la salmuera, resultando medianamente ácida. Posteriormente se produce la lixiviación del Ca/Mg, precipitando por último los carbonatos. La eficacia del proceso de carbonatación mineral está altamente influenciada por el tipo de roca almacén (su mineralogía) y de los métodos o características de la inyección. La carbonatación mineral podría mejorarse si se inyecta el CO<sub>2</sub> totalmente disuelto en agua y/o si se inyecta en silicatos ricos en cationes metálicos divalentes, tales como rocas basálticas y ultramáficas.

La carbonatación mineral producida al inyectar CO<sub>2</sub> resulta diferente si se realiza en rocas extrusivas (volcánicas tipo basalto) o en rocas sedimentarias, siendo en éste último caso un proceso más lento [8, 9]. El proyecto CarbFix [10,11] fue desarrollado con el objetivo de optimizar los costes de desarrollo tecnológico para la carbonatación mineral in-situ en basaltos (en su mayoría toleíticos con Olivino). Las rocas de la zona de inyección localizada al sur de la planta geotérmica Hellisheidi (suroeste de Islandia), tienen una composición de ultrabásica a basáltica (con 45-49% de SiO<sub>2</sub>) con estructuras de vítreas a cristalinas. En la fase piloto fueron inyectadas 175 toneladas de CO<sub>2</sub>, previamente

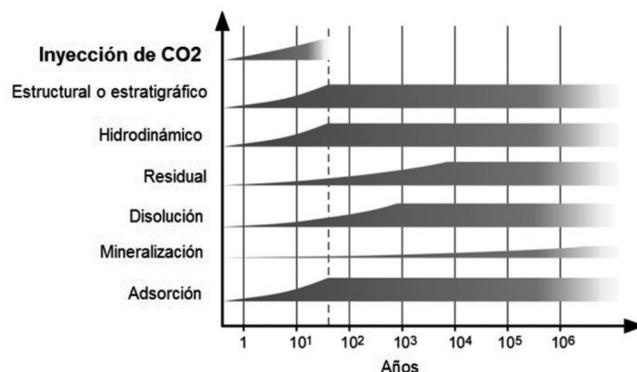


Figura 1: Tiempo estimado de actuación de los mecanismos trampa de CO<sub>2</sub>. Modificado de IPCC 2005

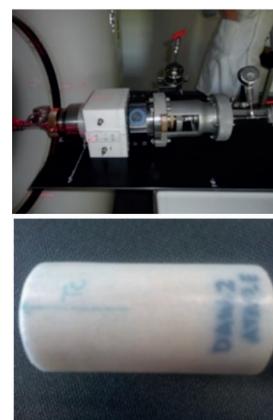
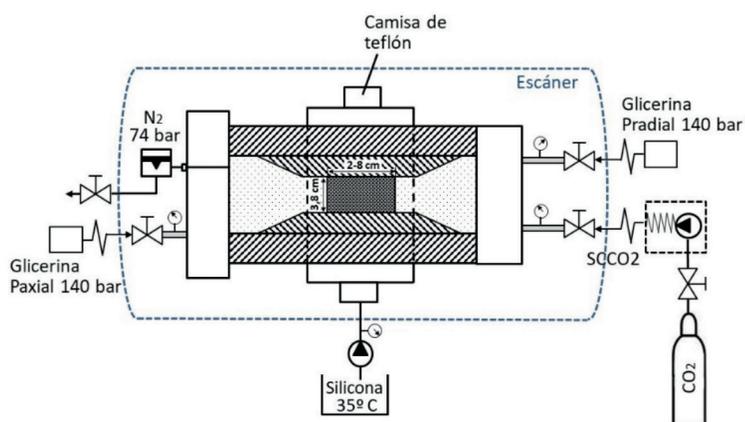


Figura 2: Esquema de la configuración estática del dispositivo ATAP. Celda y muestra con plástico termorretráctil

disueltas en la salmuera, donde el análisis de nueve pies de testigo confirmaron que entre el 80-90% del  $\text{CO}_2$  había producido fenómenos de carbonatación en la roca en menos de un año.

En este trabajo se ha desarrollado la configuración estática de un prototipo a escala de laboratorio (ATAP) para el estudio del mecanismo trampa de mineralización o secuestro mineral producido en un acuífero de arenisca para almacenamiento de  $\text{CO}_2$ . El equipo permite observar los cambios, reacciones y precipitaciones producidos en una muestra de roca, con los fluidos presentes en el almacén, en las condiciones reales de presión y temperatura características del almacenamiento. Las variaciones sufridas en la roca almacén se pueden verificar mediante estudios complementarios de difracción de rayos X, medidas de pH, medidas de porosidad y permeabilidad, o tomografía computada realizada con la muestra situada en la celda de inyección.

## 1. MATERIALES Y METODOS

Para el estudio de los mecanismos trampa y la viabilidad técnica de inyección de  $\text{CO}_2$  en un almacén geológico profundo se ha diseñado un equipo de ensayos ATAP (Alta Temperatura-Alta Presión), con la capacidad de reproducir las condiciones reales de almacén de hasta  $120^\circ\text{C}$  y 500 bar. Mediante su configuración dinámica se han podido realizar estudios de mecanismos trampa físicos de  $\text{CO}_2$  desarrollados en acuíferos de areniscas [12], fenómenos de degradación en los cementos para la completación de pozos de inyección [13] y mejora de la inyectividad en el almacén [14]. Para el análisis de la estanqueidad del  $\text{CO}_2$  en el largo plazo realizado en este trabajo, ha sido necesario desarrollar una configuración estática del dispositivo ATAP (Fig. 2) que permite

analizar el mecanismo trampa químico de mineralización o secuestro mineral.

La inyección de mezclas corrosivas  $\text{CO}_2$ /salmuera a elevadas temperaturas y presiones exige el empleo de materiales del tipo Hastelloy con resistencias superiores al acero inoxidable. Además, el empleo de la técnica TAC (Tomografía Axial Computerizada) para la visualización de los cambios producidos en la muestra objeto de estudio, manteniendo la presión y la temperatura de ensayo, necesita de un material radiotransparente que impida la generación de imágenes artefactadas. Este material es un recubrimiento de carbono en la zona de la celda de inyección donde se aloja la muestra que permite el análisis de la porosidad, saturación, desplazamiento de fluidos, homogeneidades y heterogeneidades de las muestras, así como los cambios producidos por procesos de mineralización.

El testigo de roca es alojado en el interior del cuerpo de la celda con un diámetro de 3,8 cm y una longitud que puede variar entre 2 y 8 cm, permitiendo el acople de muestras más cortas utilizando adaptadores en los pistones que cierran el cuerpo central. Para este estudio se han ensayado tres muestras de arenisca de una misma formación, con una longitud de 6,5 cm, 6,8 cm y 6,9 cm respectivamente, que se han recubierto con un plástico termorretráctil para impedir la difusión del  $\text{CO}_2$  a través de la camisa de caucho.

La roca ensayada se somete a una presión de confinamiento radial por el aumento de presión aplicado a la glicerina ubicada en la cavidad existente entre la camisa de caucho que envuelve la muestra y las paredes de la celda. Mediante el acoplamiento posterior de la celda, donde se aloja también glicerina, se proporciona el confinamiento axial a la muestra. De esta forma, mediante manómetros y válvulas de seguridad se controla la presión

de confinamiento tri-axial (140 bar) (radial+axial) de la roca, de forma semejante a la que estaría sometida en un acuífero salino profundo.

Para mantener la temperatura constante de la muestra se rodea la celda con una camisa de teflón radiotransparente que dentro de un escáner permite obtener imágenes sin artefacto, pudiéndose analizar los cambios producidos en la roca durante el ensayo. La temperatura de la camisa se mantiene constante a  $35^\circ\text{C}$  mediante la circulación por bombeo del aceite de silicona, previamente calentado con una resistencia en un tanque exterior.

La inyección/recuperación de uno o dos fluidos se puede realizar de forma independiente o mezclados a través de la espiral de distribución en la superficie de contacto con los dos pistones que cierran la celda, antes de atravesar la muestra, evitando así su entrada estratificada. En esta configuración ATAP estática una de las dos entradas del pistón para la inyección de fluidos se cierra mientras que la otra se utiliza para inyectar primero salmuera y después  $\text{CO}_2$  supercrítico (SCCO<sub>2</sub>). En esta línea de inyección se encuentra una válvula y un manómetro a la entrada de la celda que permite mantener estanco el volumen de fluido que satura la muestra durante el ensayo a presión constante.

Mediante un equipo de contrapresión, con una válvula que cierra la producción de fluidos a la salida, se consigue inyectar  $\text{CO}_2$  en la muestra en estado supercrítico (SCCO<sub>2</sub>), manteniendo una presión de tardo del manómetro a la salida de la celda de 74,5 bar, que se transmite a todo el sistema de inyección de fluidos. Mediante la apertura/cierre de la válvula en la línea de llenado con  $\text{N}_2$  se consigue variar la presión de dicho equipo de contrapresión hasta la deseada en el ensayo.

La inyección continua de fluidos se realiza de modo separado, por un lado la

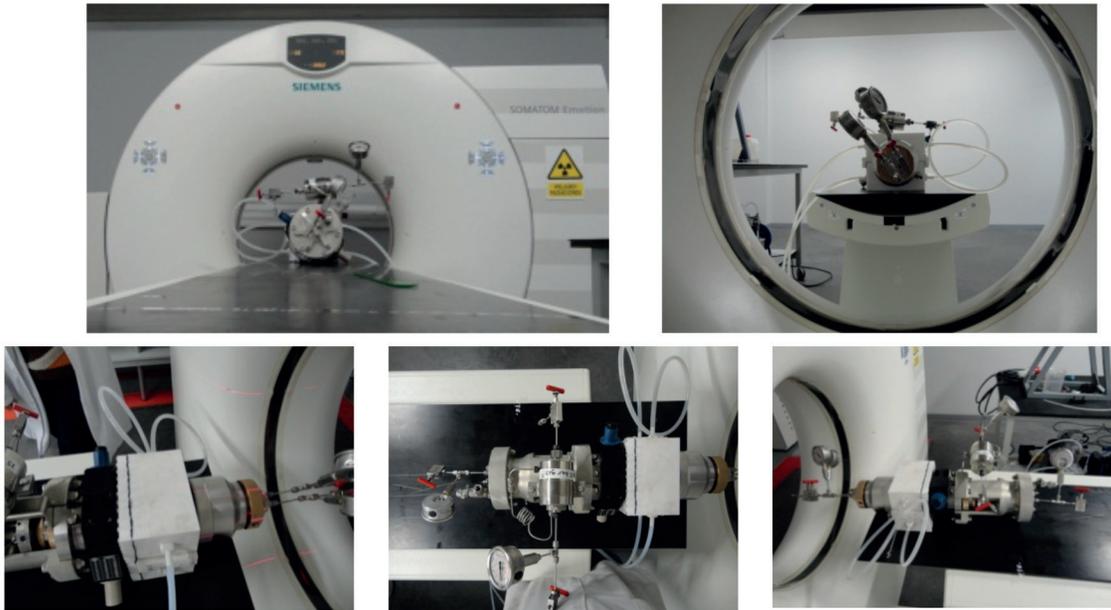


Figura 3: Posicionamiento de referencia de la celda en la mesa del escáner

salmuera con una bomba ISCO serie-D de alta precisión a un caudal (hasta 107 ml/min) o presión constante (hasta 517,1 bar). Por otro lado, el CO<sub>2</sub> líquido de botella mediante un generador JASCO PU-2080 con refrigeración de sus cabezales para el control térmico por debajo de -4°C, se bombea en estado supercrítico evitando el cambio de fase por descompresión al entrar en la bomba. El sistema de bombeo SSQD proporciona estabilidad en el flujo (libre de pulsos) consiguiendo un caudal de hasta 10 ml/min y una presión máxima de 35 MPa.

El efecto del mecanismo trampa de mineralización se analiza antes y después del ensayo de inyección utilizando la técnica de picnometría de He y la técnica TAC con el escáner médico Somatom de la casa Siemens. Las imágenes obtenidas de la muestra son comparadas con una imagen base fijada para una situación de referencia tanto en la celda como en la mesa del escáner (Fig. 3).

Se efectúa la inyección de salmuera a un caudal constante (1cc/min) hasta inyectar 20 veces el volumen de poro conocido de la muestra, momento en el que la consideramos 100% saturada en salmuera  $Sw_{(100\%)}$ . Una vez establecidas las condiciones de presión y temperatura en el interior de la celda, con la muestra saturada en salmuera y las válvulas de conexión cerradas, se fija la *posición de estudio* para obtener mediante el escáner la secuencia de imágenes TC1 de la muestra durante el ensayo (Fig. 4).

Se procede posteriormente a la inyección de SCCO<sub>2</sub> a una caudal de 1cc/min, consiguiendo una inyección de un volumen equivalente a 10 veces el volumen de

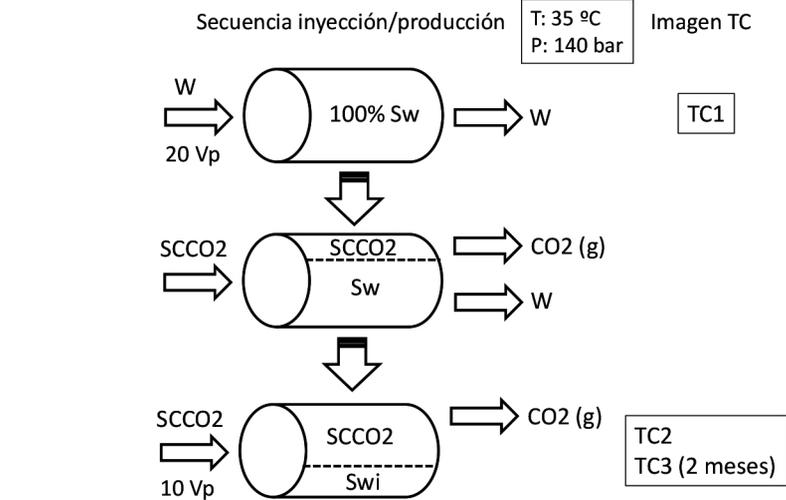


Figura 4: Fases del ensayo de inyección y secuencia del registro de tomografías computadas TC1-3

poro (Vp), desplazando la salmuera del interior de la muestra. La inyección continúa hasta que no se produce más salmuera y solamente se recupera CO<sub>2</sub> (g) a la salida de la celda. En ese momento se considera que la muestra está saturada en SCCO<sub>2</sub> y en el volumen de salmuera no desplazada que constituye la saturación irreducible de la misma  $Sw_i$ . Se cierran las válvulas de inyección y producción de la celda y se obtiene la segunda imagen TC2 de tomografía computada (Fig. 4). Se mantiene la celda estanca a temperatura y presión de confinamiento constante durante dos meses, periodo en el que tiene lugar el proceso de mineralización por reacción de la roca, la salmuera y el SCCO<sub>2</sub> en la muestra (mecanismo trampa de mineralización). Se realiza un tercer estudio de tomografía computada TC3 con la celda en la *posición de estudio* (Fig. 4).

Una vez realizado el estudio TC3, se abren válvulas y se recupera la muestra del interior de la celda. Se mete la muestra en estufa y se mantiene a 25°C hasta que está seca, momento en el cual, se mide su porosidad tras el ensayo en el equipo de picnometría de He.

## 2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las imágenes obtenidas con el escáner mediante el campo de visión (FOV) en la ventana seleccionada se comparan para observar los posibles cambios que afectan a la muestra en las diferentes etapas del ensayo. Mediante el software con adquisición de imágenes, con estándar DICOM, se obtienen los cortes (aproximadamente 107 por estudio) efectuados en la muestra saturada en salmuera y posteriormente en SCCO<sub>2</sub>, calculándose las intensidades me-

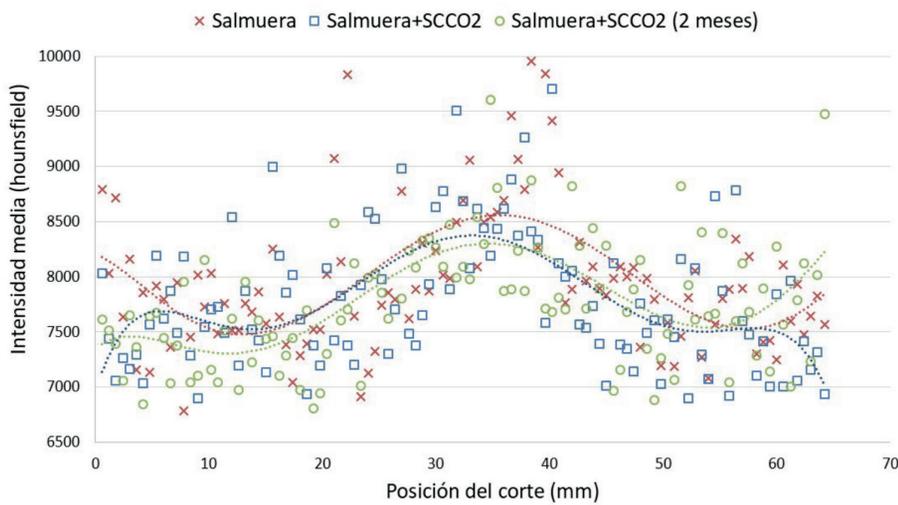


Figura 5: Medidas de máxima intensidad de cada uno de los cortes en cada etapa

días en unidades Hounsfield. El topograma compuesto por medidas de intensidad en escala de grises presenta variaciones del blanco al negro que determinan la densidad del material en los diferentes puntos atravesados por los Rayos X, correspondiendo el blanco al material más denso y el negro al menos denso. Mediante el programa de tratamiento de imágenes se obtiene la medida de máxima intensidad en cada uno de los cortes (Fig. 5).

En la Figura 6 se comparan las imágenes obtenidas de la primera muestra de arenisca (representativa de la formación) dentro de la celda a la presión y tempe-

ratura del almacén en cuatro cortes a 6, 12, 18 y 24 mm de distancia de la cara de inyección, saturada en salmuera (TC1), de la muestra saturada en SCCO<sub>2</sub> y el volumen irreducible de salmuera (TC2), y a los dos meses de haber saturado la muestra con SCCO<sub>2</sub> (TC3). Se realiza entonces la comparativa de los estudios realizados en cada una de las etapas y en las posiciones fijadas en la muestra.

Para la primera muestra de arenisca ensayada no se aprecian cambios cualitativos significativos como consecuencia de las distintas inyecciones efectuadas. Esto se debe a la no existencia de variaciones

de la macro porosidad en las imágenes proporcionadas de las muestras mediante la técnica TAC.

Transcurridos dos meses de permanencia del SCCO<sub>2</sub> se abre la celda y se recupera la muestra, que una vez secada en estufa es sometida a un estudio cuantitativo con el picnómetro de He obteniéndose una porosidad total de 10,90%. En la tabla I se recogen además los resultados de porosidad (9,42% y 8,85%) de los otros dos ensayos realizados con muestras de arenisca de la misma formación, a 35°C de temperatura y presiones respectivas de 140 bar y 75 bar.

En otro estudio realizado por Campos et al [15] donde una muestra de arenisca de Utrillas fue sometida a la inyección de SCCO<sub>2</sub> y salmuera en condiciones de almacenamiento (80 bar y 32°C), se midió con porosimetría de Hg una disminución de su porosidad de 15,64% a 9,70%, similar a la observada en las muestras empleadas en nuestro estudio (Tabla I). Esta disminución de la meso porosidad debida a la precipitación mineral conlleva una menor capacidad de almacenamiento del CO<sub>2</sub> inyectado con posterioridad. Si bien esto contradice los estudios de Berrezueta et al [16], donde se produce un aumento de porosidad, estamos ante un fenómeno dependiente no sólo de la mineralogía del almacén y la composición de la salmuera, sino del tiempo de permanencia del CO<sub>2</sub> en el acuífero.

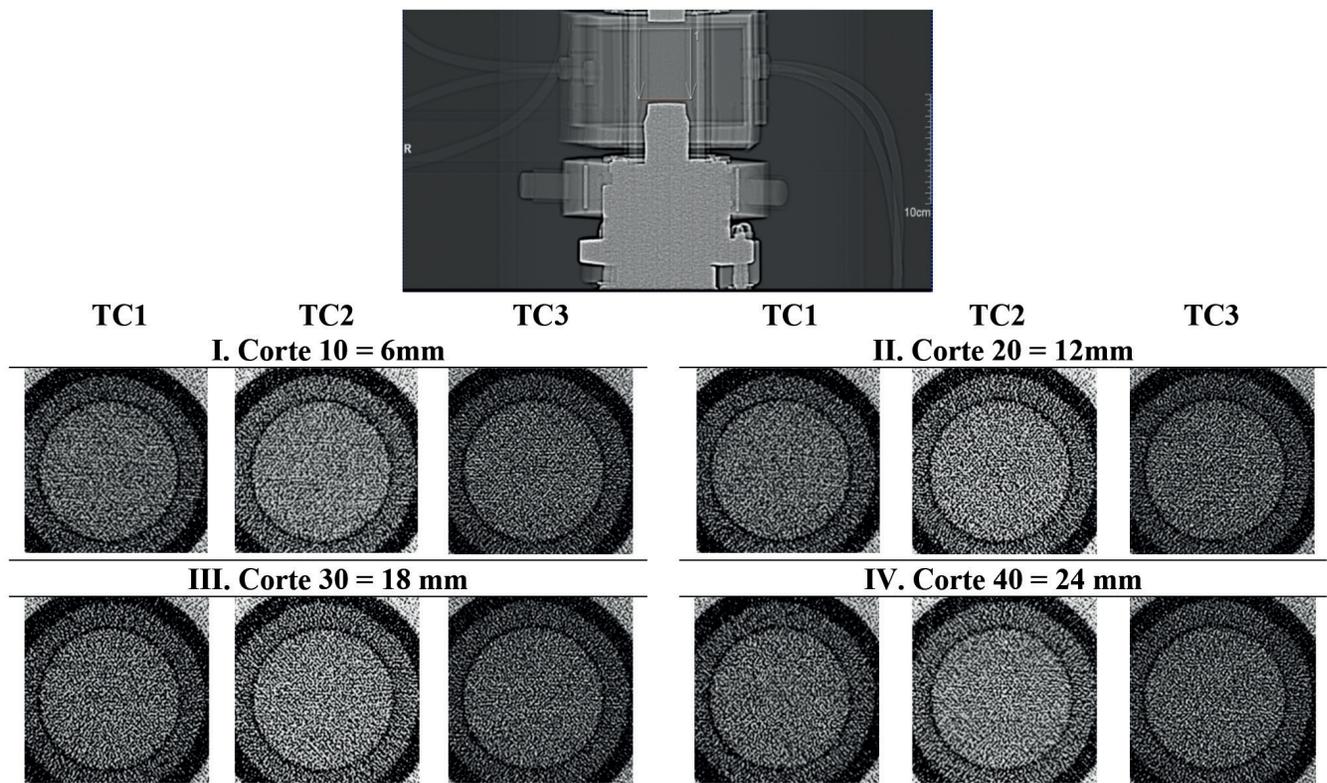


Figura 6: Escanograma de la muestra situada dentro de la celda. Imágenes del escáner en las distintas etapas y posiciones de estudio

Muestra		Ensayo			Medida Porosidad			Ref.
Roca	Localización	Equipo	P y T	Duración	Método	Antes	Después	
Arenisca	Cuenca del Duero	Inyección SCCO <sub>2</sub> - W	140 bar 35°C	2 meses	Picnómetro de He	16,97	10,90	Este trabajo
			75 bar 35°C			14,85	9,42	
						12,53	8,85	
Arenisca	Cuenca del Ebro	Inyección SCCO <sub>2</sub> - W	80 bar 32°C	2 meses	Porosimetría de Hg	15,64	9,70	Campos et al, 2015
Arenisca Feldespática	Cuenca del Guadalquivir	Reactor con SCCO <sub>2</sub>	75 bar 35°C	1000 h	OpM y SEM	12,63	12,94	Berrezueta et al, 2017
Greywacke	Cuenca del Ebro					19,01	21,16	
Cuarzo-arenita	Cuenca del Duero	Reactor con SCCO <sub>2</sub> - W	75 bar 35°C	24 h		9,55	11,13	

SCCO<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub> supercrítico; W: salmuera

OpM: Optical image analysis con lámina delgada; SEM: Microscopía electrónica de barrido

Tabla I: Resultados comparativos de inyección de SCCO<sub>2</sub> en diferentes tipos de roca y condiciones de ensayo

En la Tabla I se evidencia la diferencia existente en la variación de la porosidad según la metodología empleada para someter a la muestra del acuífero a las condiciones de presión y temperatura de almacén. Se produce un aumento de porosidad al realizar las pruebas en reactor, tanto con la muestra sumergida en SCCO<sub>2</sub> como en la mezcla SCCO<sub>2</sub>-salmuera, frente a la disminución producida al inyectar en la muestra (situada dentro de la celda triaxial) la mezcla SCCO<sub>2</sub>-salmuera. Serían necesarios estudios complementarios y de sensibilidad para justificar la variación de estos resultados, teniendo influencia factores como la mineralogía de la muestra, la composición de la salmuera y la técnica utilizada para introducir en la roca el CO<sub>2</sub> supercrítico.

Tras la inyección de SCCO<sub>2</sub> se produce primeramente por disolución en la salmuera su transformación a CO<sub>2</sub> (aq) y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, aumentando con ello la seguridad del almacén al no encontrarse el CO<sub>2</sub> en fase libre, provocándose posteriormente la disolución mineral al variar el pH de la mezcla SCCO<sub>2</sub>-salmuera [17]. Estos procesos producen la disminución de la presión del sistema y la consiguiente separación del CO<sub>2</sub> de la fase acuosa al disminuirse su solubilidad, creándose de nuevo una fase libre de CO<sub>2</sub>. Todo ello provoca la posterior precipitación mineral produciéndose cambios en la morfología, porosidad y permeabilidad del medio poroso, que luego afectan al flujo bifásico natural del CO<sub>2</sub> y el agua de formación (salmuera) dentro del almacén, influyendo en la capacidad y seguridad del almacenamiento, siendo preciso estudiar en cada caso esas variaciones para conocer su contribución.

Otros estudios adicionales podrían realizarse para obtener el pH de los efluen-

tes, la caracterización de la mineralogía y petrografía mediante DRX, SEM o análisis óptico de imágenes [16,18,19], así como petrofísicos con la medida de la variación de la permeabilidad. De igual manera se podría ampliar el alcance del estudio de las reacciones químicas características del mecanismo trampa de mineralización basándonos en la geomecánica del almacén y en los posibles efectos en la estanqueidad del CO<sub>2</sub> en el acuífero [20].

### 3. CONCLUSIONES

El equipo ATAP en su configuración estática ha permitido reproducir el mecanismo trampa químico de mineralización desarrollado al inyectar CO<sub>2</sub> en la muestra a la presión y temperatura del acuífero salino profundo. El tiempo de ensayo de la muestra en esas condiciones permite el estudio de las reacciones químicas que se producen entre la roca, salmuera y SCCO<sub>2</sub> características del secuestro mineral.

Los estudios con TAC del interior de la muestra situada en la celda (a la presión y temperatura de ensayo) permiten observar las variaciones en su mineralogía, y si se han generado fenómenos de fracturación o cavidad. Se ha comprobado que la variación en la porosidad de la muestra de arenisca ensayada no era suficientemente apreciable con esta técnica. Se reduce su aplicación a los casos en que se producen cambios cualitativos significativos, bien por la mineralogía del almacén (rocas basálticas) donde los procesos de mineralización son más acuciados en el corto plazo, o por reacciones químicas más agresivas debido a la composición de la salmuera.

Para el estudio completo del secuestro mineral desarrollado en un alma-

cenamiento subterráneo se debe seguir una metodología de ensayo donde, previamente a la inyección de los fluidos de composición conocida, se analice la mineralogía y porosidad de las muestras a ensayar. Se recomienda emplear técnicas de análisis como la DRX y SEM en la cara de inyección, que permitan seleccionar las zonas de interés, y mediante porosimetría de mercurio cuantificar los volúmenes y tamaños de poro, así como su distribución e interconexión.

La naturaleza del mecanismo trampa de mineralización determina que el tiempo de permanencia del CO<sub>2</sub> en estado supercrítico en la celda durante el ensayo sea función de la mineralogía de la muestra, pudiéndose disminuir con el empleo de catalizadores que aceleran las reacciones químicas. En este caso, resulta conveniente realizar el estudio de las reacciones químicas que puedan desarrollarse en el acuífero. Se sugiere la posibilidad de medir el pH de los efluentes iniciales y finales, después de la permanencia del CO<sub>2</sub> supercrítico en la muestra y observar su variación. Sería conveniente analizar la variación de su mineralogía, en los mismos puntos previos a la inyección, comprobar la variación de su estructura porosa, y estudiar la composición química de los efluentes obtenidos.

La disolución y precipitación mineral modifica la estructura porosa ampliando los diámetros de garganta y disminuyendo la superficie específica de los poros, resultando en menores presiones capilares y cambios en la permeabilidad relativa. Como consecuencia, se produce una creciente resistencia al flujo de salmuera y una disminución de la movilidad del CO<sub>2</sub> inyectado, actuando como un mecanismo de auto-sellado, siendo desfavorable a la

migración del CO<sub>2</sub> hacia zonas de fuga (fallas, fracturas) o sello. El estudio con ATAP y los ensayos complementarios de los procesos desarrollados en cada almacén, condicionado por su mineralogía y su geología específica, conduce a un conocimiento más preciso de la capacidad de almacenamiento de la formación geológica y de la seguridad en la estanqueidad del CO<sub>2</sub> en el almacén en el largo plazo.

## REFERENCIAS

- [1] Broecker WS. Climate change - CO<sub>2</sub> arithmetic. *Science*, 200. Vol. 315 (5817), 1371-1371. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1139585>
- [2] Zhang, D., Song, J. 2014. Mechanisms for geological carbon sequestration. *Procedia IUTAM* 10, 319-327.
- [3] Bachu S. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: road map for site selection using the transform of the geological space into CO<sub>2</sub> space. *Energy conversion & management*, 2002 (43) 87-102. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00009-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00009-7)
- [4] Metz, B., Davidson, O., Coninck, H.C. et al. 2005. IPCC, 2005: IPCC special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA-442 pp. ISBN- 13978-0-521-68551-1.
- [5] Ah-Hyung AP, Matter J, Chandran K. Microbial and chemical enhancement of in-situ carbon mineralization in geological formation. Final report. Columbia University, December 15, 2. DOE Award Number: DE-FE0002389.
- [6] Seifritz W. CO<sub>2</sub> Disposal By Means of Silicates. *Nature*, 1990. Vol. 345, 6275, 486. <http://dx.doi.org/10.1038/345486b0>
- [7] Huijgen WJJ, Comans. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Literature Review Update 2003-2004. Energy Research Centre of Netherlands. R.N.J.2003-2004.
- [8] Gutknecht, V., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Sigfússon, G., Aradóttir, E.S., Charles, L. Creating a carbon dioxide removal solution by combining rapid mineralization of CO<sub>2</sub> with direct air capture. *Energy Procedia*, 2018. Vol. 146, 129-134.
- [9] Xue Z, Mito S, Kitamura K, et al. Case study: trapping mechanisms at the pilot-scale CO<sub>2</sub> injection site, Nagaoka, Japan. *Energy Procedia* 1. 2009, 2057-2062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.268>
- [10] Sigurdur Reynir S, Wolff-Boenisch D, Stefansson A. et al. Mineral Sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010. Vol. 4, 3, 537-545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.11.013>
- [11] Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Tómasdóttir, S., Sigfússon, B., et al. The geology and hydrology of the CarbFix2 site, SW-Iceland. *Energy Procedia*, 2018. Vol. 146, 146-157.
- [12] Valle LM, Rodríguez R, Grima C. et al. Effects of supercritical CO<sub>2</sub> injection on sandstones wettability and capillary trapping. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018. Vol. 78, 341-348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.09.005>
- [13] Estévez E, Valle L, del Barrio D, et al. Cements of improved sealing capacity in CO<sub>2</sub> geological storage. Congreso Eurock. Vigo, 2014. <http://www.sem.es/wp-content/uploads/2015/06/Boletin7SEMR.pdf>
- [14] de Dios JC, Delgado MA, Marín JA. et al. Short-term effects of impurities in the CO<sub>2</sub> stream injected into fractured carbonates. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016. Vol 54, 727-736. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.08.032>
- [15] Campos R, Barrios I, Lillo J. Experimental CO<sub>2</sub> injection: Study of physical changes in sandstone porous media using Hg porosimetry and 3D network models. *Energy Reports*, 2015. Vol. 1, 71-79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypr.2015.01.004>
- [16] Berrezueta E, Domínguez Cuesta MJ, Ordóñez Casado B, et al. Pore space quantification of sedimentary rocks before-after supercritical CO<sub>2</sub> interaction by optical image analysis. *Energy Procedia*, 2017. Vol. 114, 4382-4393. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1591>
- [17] Ruina X, Rong L, Jin M, et al. Effect of Mineral Dissolution/Precipitation and CO<sub>2</sub> Exsolution on CO<sub>2</sub> transport in Geological Carbon Storage. Published as part of the Accounts of Chemical Research special issue "Chemistry of Geologic Carbon Storage". *Acc. Chem. Res.* 2017, 50, 2056-2066. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00651>
- [18] Mateos Redondo F, Kovács T, Berrezueta E. Petrographic and petrophysical characterization of detrital reservoir rocks for CO<sub>2</sub> Geological Storage (Utrillas and Escucha Sandstones, North Spain). *Geosciences*, 2018. Vol 8, 7 UNSP 246. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences8070246>
- [19] Berrezueta E, Kovacs T. Application of optical image analysis to the assessment of pore space evolution after CO<sub>2</sub> injection in sandstones. A case study. *J. Pet. Sci. Eng.* 2017. Vol 159, 679-690. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.039>
- [20] Raza A, Gholami R, Sarmadivaleh M, et al. Integrity analysis of CO<sub>2</sub> storage sites concerning geochemical-geomechanical interactions in saline aquifers. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016. Vol. 36, 224-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.10.016>

## AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Instituto Petrofísico (IPF) por el apoyo financiero para el desarrollo de la instalación experimental ATAP, y al Instituto Francés del Petróleo (IFP) por la formación recibida para el diseño del dispositivo de ensayos.

## DEFINICIONES Y TÉRMINOS

ATAP	Dispositivo de ensayos a Alta Temperatura-Alta Presión
Artefacto	Distorsión de la imagen radiológica
CAC	Captura y almacenamiento de CO <sub>2</sub>
Completación	Trabajos de cementación, entre otros, efectuados en pozos productores o inyectores de petróleo/gas
DICOM	Digital Imaging and Communication On Medicine
DRX	Difracción de Rayos-X
FOV	Field Of View
SCCO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> en estado supercrítico
SEM	Microscopía electrónica de barrido
SSQD	Slow Suction Quick Delivery
Sw	Saturación de salmuera
Sw <sub>(100%)</sub>	Saturación de salmuera al 100%
Swi	Saturación irreducible de salmuera
TAC	Tomografía Axial Computerizada
Vp	Volumen de poro
W	Salmuera