

# Morfología del espacio de poros de las areniscas de Utrillas a partir de imágenes de micro-tomografía axial computada de Rayos-X.

*Pore space morphology of Utrillas sandstones using X-Ray micro-computed-tomography images.*

R. Campos<sup>1</sup>, J. Martínez-Martínez<sup>2</sup>, I. Barrios<sup>1</sup>, N. Fusi<sup>3</sup>

1 CIEMAT. Laboratorio de Caracterización Petrofísica. Unidad de Geología Ambiental Aplicada. Departamento de Medio Ambiente. Avenida de la Complutense 40, 28040 Madrid. [rocio.campos@ciemat.es](mailto:rocio.campos@ciemat.es); [iciar.barrios@ciemat.es](mailto:iciar.barrios@ciemat.es)

2 Laboratorio de Petrología Aplicada. Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Campus San Vicente del Raspeig. 03080 Alicante. [javier.martinez@ua.es](mailto:javier.martinez@ua.es)

3 Dpto. di Scienze Geologiche e Geotecnologie. Università degli Studi di Milano-Bicocca. Piazza della Scienza, 4. 20126 Milano (Italia). [nicoletta.fusi@unimib.it](mailto:nicoletta.fusi@unimib.it)

**Resumen:** Se estudia la morfología del espacio de poros de una facies de grano fino de areniscas de Utrillas, muestreada en testigo de sondeo, a partir de imágenes de Tomografía Axial Computada de Rayos-X a escala micrométrica. Se comprueba como un adecuado tratamiento de datos, mediante la aplicación de filtros que mejoren la imagen y eliminen los artefactos inherentes a la técnica, así como una correcta y fundamentada segmentación de la imagen, conduce a la obtención de una información precisa del medio y de la morfología del espacio de poros. Los resultados se comparan con los obtenidos mediante Porosimetría por Intrusión de Mercurio, lo que permite discriminar entre la porosidad conectada y no conectada. Se realiza una reconstrucción 3D de la muestra mediante el apilamiento de imágenes y mediante la extensión del trabajo realizado en 2D al total de imágenes obtenidas, lo que nos proporciona la geometría y conectividad del espacio de poros en 3D. Este trabajo constituye la base de una primera caracterización de la roca almacén, sobre la que se simularan los mecanismos de transporte y/o retención de CO<sub>2</sub> en estado supercrítico.

**Palabras clave:** Porosidad, areniscas Utrillas, Tomografía Axial Computada de Rayos-X, CO<sub>2</sub>.

**Abstract:** The aim of this paper is to study the porous system of a fine-grained sandstone (known as Utrillas sandstone) by means of Computed Axial Tomography (CAT). 2D Images from CAT were properly treated and several filters were applied in order to improve the image quality. Moreover, filters were applied for deleting punctual defects appeared during image capture. Afterwards, improved images were segmented and different phases were distinguished (different minerals and pores). Results from the porosity quantification were compared to the data obtained by means of Mercury Intrusion Porosimeter (MIP). Comparison between both techniques (CAT and MIP) allows quantifying connected and non-connected porosity of rock. Spatial distribution and 3D connectivity of pores were also analyzed from the 3D reconstruction of the sample. This study constitutes the first step of the porous system characterization of the Utrillas sandstone. Next studies will be focused on analyzing and quantifying the injection, drainage and/or imbibition of supercritical CO<sub>2</sub> in this rock.

**Key words:** Porosity, Utrillas Sandstone, X-Ray Computed Tomography, CO<sub>2</sub>.

## INTRODUCCIÓN

El almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, mediante la inyección en acuíferos salinos profundos, es ya una realidad a nivel internacional. El objetivo de proyectos actualmente en desarrollo, se centra en investigar los procesos que van a tener lugar en estos almacenamientos geológicos y como la microestructura de las rocas almacén y sello, van a condicionar la estanqueidad y los mecanismos de atrapamiento a corto, medio y largo plazo. Así, los estudios encaminados a determinar la eficiencia en el transporte y/o retención de gas o fluido a través de rocas, se han convertido en un área de trabajo imprescindible en proyectos de inyección de CO<sub>2</sub>.

La evaluación de los sistemas de almacenamiento (rocas almacén y sello) requiere un correcto entendimiento de los mecanismos de transporte y/o atrapamiento a través del medio. Teniendo en cuenta que este transporte o retención depende en gran medida de la microestructura del espacio de poros de la roca almacén, será especialmente necesario una caracterización de la estructura de poros. Para ello la aplicación de técnicas como la Tomografía Axial Computada (TAC) o la porosimetría por intrusión de Mercurio (PIM) constituyen herramientas esenciales.

La TAC tiene importantes aplicaciones en geología, en el análisis cuantitativo y cualitativo de determinadas características geológicas, siempre que éstas estén suficientemente marcadas por diferencias en la

composición atómica y/o densidad. Debido al fuerte contraste, tanto en composición como en densidad, entre las fases sólidas y el aire o fluido, una de las principales aplicaciones de la TAC es el estudio de la porosidad. Trabajos como los de Mees et al., (2003), Van Geet et al., (2001) o Dong y Blunt (2009), ilustran esta aplicación. La diferenciación entre diferentes fases sólidas en las imágenes TAC, que también abordamos en este trabajo requiere un importante análisis de detalle y en este aspecto existen pocos trabajos publicados.

## ADQUISICIÓN DE DATOS, PROCESADO Y OPTIMIZACIÓN DE IMÁGENES

La PIM constituye una técnica sobradamente conocida, mientras que la TAC, aunque conocida, sigue actualmente en desarrollo, alcanzando cada vez resoluciones más altas que abren nuevos campos de exploración. Es una técnica no destructiva de exploración por Rayos-X originalmente desarrollada para uso médico (Hounsfield, 1972), que en lugar de proyectar los Rayos-X sobre el cuerpo a investigar, obtiene la imagen rotando alrededor del mismo. La rotación permite obtener una serie de barridos radiológicos de espaciado muy pequeño, desde múltiples ángulos que se pueden componer para generar una representación única en 3D. Las imágenes de la TAC registran las diferencias en el grado de atenuación de los Rayos-X lo cual depende en gran medida de la densidad, aunque también depende de la composición atómica y de la longitud de onda de los Rayos-X.

La información que proporciona la TAC a través de las imágenes obtenidas refleja las variaciones en el coeficiente de atenuación (CT) del medio atravesado (m). Este coeficiente de atenuación (CT) en unidades Hounsfield, es la relación que existe entre la atenuación de Rayos-X en la materia atravesada (m) y la atenuación en el agua (w), expresado en %

$$CT = 1000 (m-w)/w$$

El valor del CT para el agua es cero y aproximadamente -1000 para el aire, dependiendo de la temperatura, que condiciona su densidad. La variación en los valores de los CT están representados en las imágenes en la escala de grises, correspondiendo los valores más oscuros con los menores CT y los más claros con los mayores CT.

En función de la resolución, la TAC se puede clasificar en convencional o médica (600  $\mu\text{m}$ ), de alta resolución (100  $\mu\text{m}$ ), de super-alta resolución (10  $\mu\text{m}$ ) y micro-tomografía (1  $\mu\text{m}$ ). La adquisición de datos en el trabajo que se presenta, se ha realizado con el Scanner Nanotom de Phoenix que dispone el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados – Materiales (IMDEA-Materiales), alcanzando una resolución de 9.2

$\mu\text{m}/\text{px}$ . Se produce un solape entre las técnicas PIM y TAC, mediante la TAC detectamos todas las características y/o poros cuyo diámetro esté por encima de 9.2  $\mu\text{m}$ , lo cual solapa con la información aportada por la PIM que varía en el rango de 0.003  $\mu\text{m}$  a 360  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Para la reconstrucción de las imágenes se requieren una serie de algoritmos matemáticos y normalmente se requiere una transformación previa de las imágenes radiográficas para obtener un mayor contraste, que se realiza aplicando filtros digitales que amplifican las señales de interés y/o filtran el ruido. Igualmente la optimización de la imagen requiere la reducción de artefactos inherentes a la técnica TAC.

## ARENISCAS DE UTRILLAS: SEGMENTACIÓN DE FASES

Las areniscas en Facies Utrillas se han muestreado en el sondeo D-1 realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la evaluación de las formaciones almacén de  $\text{CO}_2$ , y localizado al NE de la localidad de Tejada (Burgos). Entre las diferentes facies muestreadas de la formación Utrillas se presenta en este trabajo el estudio de una de ellas, la muestreada a 35.4 m de profundidad.

Esta facies corresponde a arcosas o subarcosas de grano fino, con cuarzo y feldespato potásico como mineralogía dominante, y micas y fragmentos de rocas metamórficas de forma subordinada. Presentan matriz caolinítica (no diferenciable en la TAC) e importante presencia de cemento calcítico-dolomítico. Se ha medido la porosidad abierta por PIM, obteniendo un valor medio de 15.9 % con una distribución de tamaños de poros que se muestra en la figura 1. En esta figura se muestra la zona de solape entre las dos técnicas PIM y TAC.

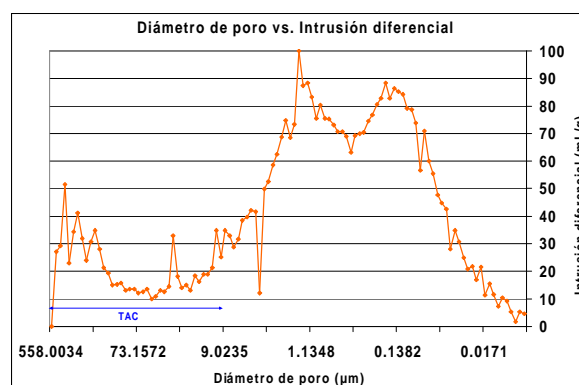


FIGURA 1. Distribución de tamaños de poros en las areniscas de Utrillas del sondeo SD-1 a 35.4m de profundidad, determinados mediante porosimetría por intrusión de mercurio. El rango marcado por la flecha azul indica la zona de solape entre la TAC y la PIM con poros mayores de 9 $\mu\text{m}$  de diámetro.

Las imágenes resultantes de la TAC, optimizadas y filtradas son sometidas a un proceso de segmentación, esto es, de separación de las diferentes fases que

componen la muestra. Esta segmentación (Fig. 2) se obtiene de una cuidadosa implementación de umbrales que se determinan a partir de la observación y comparación de la imagen TAC con imágenes de láminas delgadas obtenidas de la microscopía de luz polarizada a diferentes aumentos.

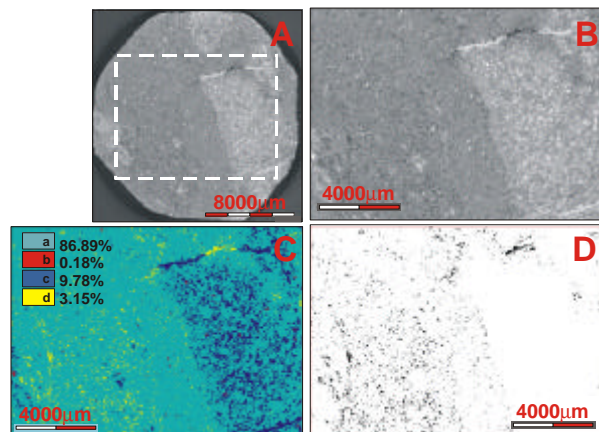


FIGURA 2. Segmentación y análisis de fases en una de las 639 imágenes TAC. (A) Imagen resultado de la TAC, (B) imagen recortada y filtrada de ruido, (C) imagen segmentada mediante la aplicación de umbrales para la detección de fases y (D) imagen binaria de los poros aislados.

Los resultados de la segmentación de una de las 639 imágenes obtenidas en la TAC, se muestra en la figura 2A. Observamos en primer término la imagen TAC recortada y filtrada de ruido y artefactos (Fig. 2B), en esta imagen se ha aumentado ligeramente el contraste para una mejor visualización. Sobre ella hemos aplicado una serie de umbrales para separar o segmentar cuatro fases diferenciables mediante TAC (Fig. 2C), indicamos también los porcentajes asignados a cada fase: un 86.89 % para la suma de cuarzo y feldespato potásico ( $\pm$  caolinita), un 0.18 % para las micas, fragmentos de rocas metamórficas y otros minerales de alta densidad, un 9.78 % para cementos calcínicos-dolomíticos, como el que se observa relleno de las fisuras, y finalmente un 3.15 % para los poros o huecos (en amarillo en la figura 2C, y en negro aislados del resto de la imagen en la figura 2D).

De esta distribución de porosidad (Fig. 2D), se ha realizado un análisis individualizado de poros, mediante el software AnalySIS con la detección automática de los factores geométricos que definen cada sección de cada poro. Sobre una población de 3134 poros para esta imagen TAC, se ha determinado un área media y perímetro medio de  $1583 \mu\text{m}^2$  y  $44 \mu\text{m}$  respectivamente. El factor de forma presenta un valor medio de 0.7, sobre una población de 1534 poros, los mayores de  $1\text{px}^2$ .

Este trabajo de segmentación y análisis (Fig. 2) se ha reproducido en las 639 imágenes determinadas en la TAC. El apilamiento de las 639 imágenes realizado en el software Image-J y tratamiento posterior en Avizo

Fire, ha conducido a la representación del espacio de poros en 3D, el cual se muestra en las figuras 3 y 4.

El objetivo del análisis en 3D, ha sido definir la distribución espacial de los poros, así como determinar su conectividad, y la posible orientación preferencial de los poros. Estos tres parámetros resultan fundamentales en nuestro estudio, ya que son un indicador del comportamiento del flujo de un fluido en el medio poroso.

La reconstrucción tridimensional permite observar una distribución heterogénea de la porosidad dentro de la muestra (Figs. 3 y 4). Gracias a la TAC es posible identificar una zonación en la porosidad, probablemente asociada a la presencia de cementos carbonáticos que en principio reducen significativamente la porosidad. Esta zonación define áreas de porosidad máxima y mínima. La porosidad calculada para cada zona es de 6.67 % y de 0.37 %, respectivamente. El valor de porosidad total media determinada a partir de la reconstrucción 3D es de 3.31 % mientras que es 3.15 % en el análisis en 2D. Se observa además una fractura, parcialmente cementada, que atraviesa toda la estructura y que tendrá una influencia importante en la permeabilidad del medio.

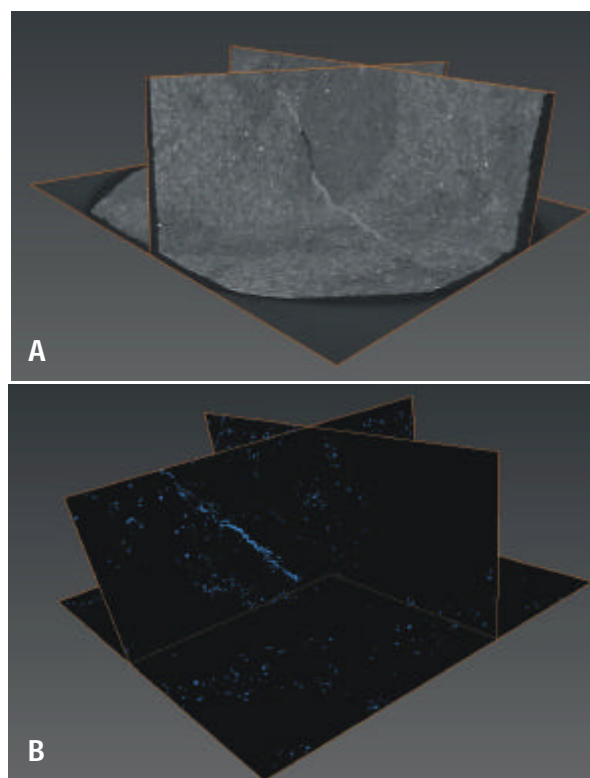


FIGURA 3. Ejemplo de reconstrucción de un volumen (3D) a partir de un apilamiento de 639 imágenes TAC y secciones ortogonales que muestran (A) los CT en escala de grises de los diferentes materiales que componen la muestra y (B) la porosidad en volumen binarizado después de un proceso de segmentación.

La geometría tridimensional de los poros (Fig. 4) muestra que no existe una orientación preferencial

significativa de los mismos (el 68% de los poros poseen un *feret shape* entre 1 y 2 y el 98 % presenta valores  $<3$ ). Considerando los poros elongados (*feret shape*  $>2$ ), hemos observado que existe una gran dispersión de los ángulos que forma el eje mayor del poro, respecto los ejes cartesianos del sistema, por lo que no se puede deducir una orientación preferente de poros.

Se ha realizado también un estudio de la conectividad del sistema poroso, deduciendo que la porosidad conectada tridimensionalmente, de la zona más porosa es del 4.73 %, lo que constituye el 61.52 % de la porosidad total de dicha zona.

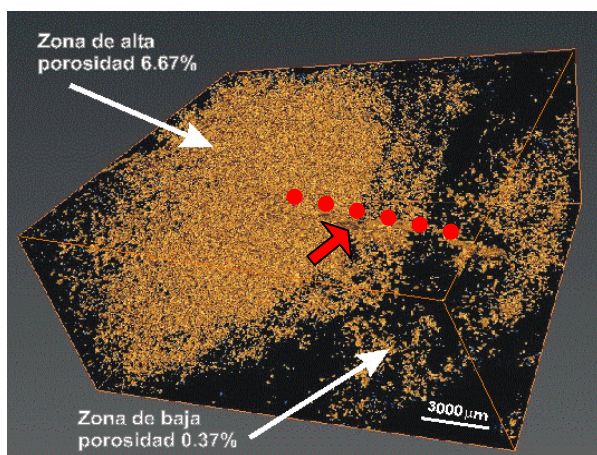


FIGURA 4. Distribución tridimensional de los poros en la muestra estudiada (reconstrucción con AVIZO). Se aprecian las dos zonas con diferente porosidad. En esta perspectiva, la fractura abierta (marcada con una flecha roja) se encuentra de perfil, y únicamente se aprecia en la zona poco porosa.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos aportados por la TAC, unida los aportados por otras técnicas de exploración tradicionales, son de gran valor para el estudio del sistema de poros de cualquier material geológico y además en el caso que se muestra, van a contribuir a la evaluación de estas facies como potencial roca almacén de CO<sub>2</sub>.

Las imágenes TAC en 2D han servido junto con la microscopía óptica, para establecer los umbrales de segmentación, en las imágenes que representan los CT de las diferentes fases que componen la roca. Como objetivo principal de este estudio, se han segmentado los poros del resto de la fase sólida, por sus bajos o nulos CT. Se deduce en el estudio en 2D, una porosidad del 3.15 % y se muestra su alta correlación con los resultados obtenidos mediante PIM, teniendo en cuenta el rango de solape entre ambas técnicas (9-360 μm). La contribución de los poros mayores de 9 μm a la porosidad PIM es sólo del 3.01 %, lo que se correlaciona totalmente con el 3.15 % obtenido mediante la técnica TAC.

La ventaja que presenta la TAC frente otras técnicas como la PIM, es la posibilidad de visualizar la distribución espacial de los poros, su conectividad y orientación que son parámetros indicadores del comportamiento del flujo de un fluido en el medio poroso y además imprescindibles para la evaluación de la formación almacén. Estos parámetros se han abordado en el análisis 3D.

Mientras que la técnica PIM ofrece un valor global de la porosidad abierta, mediante la TAC se han podido diferenciar dos zonas, con valores de porosidad máximos y mínimos: 6.67 % y 0.37 %. Se ha constatado la buena correlación entre ambas técnicas en la zona de solape, sin embargo la diferencia entre la porosidad media determinada en la TAC (3.31 %) y la PIM (15.9 %), para todo el rango de detección de cada técnica, ilustra la importancia de los tamaños de poros menores de 9 μm, que con toda probabilidad forman los canales o gargantas que conectan poros de mayores dimensiones.

La conectividad máxima de poros, en la zona de mayor porosidad es de un 61.52 %, con poros con clara tendencia esférica. No se ha constatado orientaciones preferentes de poros, aunque si ha sido posible identificar una fractura, parcialmente cementada, que atraviesa el sólido. Identificar y determinar las características de fisuras o discontinuidades puntuales en la roca, se abordará en próximos trabajos, ya que son éstas las que van a condicionar en gran medida el flujo de fluidos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Sket del IMDEA su colaboración, en la determinación y reconstrucción de las imágenes TAC y a A.M. González Luján por su trabajo de laboratorio. Este trabajo ha sido realizado en el Proyecto CGL2011-24768, financiado por la Sec. de Estado Investigación Desarrollo e Innovación del MEC.

## REFERENCIAS

- Dong, H. y Blunt, M.J. (2009): Pore- network extraction from micro-computerized-tomography images. *Physical Review*, E80, 036307, 1-11.
- Hounsfield, GN. (1972): *A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X or Gamma Radiation*. British Patent N°1.283.915, London.
- Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M., y Jacobs, O. (2003): *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Geol.Soc. Special Publ. 215. 243pp.
- Van Geet, M., Swennen, R., y Wevers, M. (2001): Towards 3D petrography: application of microfocus computer tomography in geological science. *Computer & Geosciences*, 27, 1091-1099.