

Almacenamiento geológico profundo de CO₂: Selección de formaciones favorables en la Cuenca del Ebro y estimación de su capacidad

Underground CO₂ storage: Approach for favourable formations in Ebro Basin and storage capacity estimation

R. Campos^{1,2}, M.A. Perucha³ y F. Recreo¹

1 Ciemat. Av. de la Complutense nº 22, 28040 Madrid. rocio.campos@ciemat.es; fernando.recreo@ciemat.es.

2 URJC. Dpto. Biología y Geología. C/ Tulipán s/n 28933 Móstoles Madrid. rocio.campos@urjc.es

3 IGME, Rios Rosas nº 23, 28003 Madrid. ma.perucha@igme.es

Resumen: El almacenamiento geológico profundo (AGP) es una de las iniciativas que, en el ámbito internacional, está cobrando mayor relevancia para reducir las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera. En territorio español, el estudio de las posibilidades de AGP de CO₂ se está canalizando a través del Proyecto Singular Estratégico “Tecnologías avanzadas de generación, captura y almacenamiento de CO₂” del MEC y, como una parte de este proyecto, se han estudiado las posibilidades que ofrece la Cuenca del Ebro de cara al almacenamiento definitivo de CO₂, mediante la reinterpretación de la información de sondeos del Archivo Nacional de Hidrocarburos, gestionado por el IGME. Se han seleccionado una serie de formaciones que, por sus características relativas a disposición, extensión, profundidad y porosidad, podrían constituir un futuro almacenamiento, prestando también especial atención a las formaciones sello, que garantizarían la estanqueidad de los diferentes almacenes. Se proporciona una estimación de la capacidad de almacenamiento de cada formación, que si bien es aproximada, si puede ser un dato útil para la toma de decisiones futuras.

Palabras clave: Almacenamiento geológico profundo, CO₂, Cuenca del Ebro.

Abstract: *Deep geological storage (DGS) is one of the more relevant international initiatives in order to eliminate or reduce the anthropogenic CO₂ emissions to the atmosphere. The study of the possibilities of DGS of CO₂ inside Spanish territory is being performed through the Strategic Singular Project “CO₂ generation, capture and storage advanced technologies”, of the MEC. The potential final storage of CO₂ in Ebro Basin, has been studied through reinterpretation of deep boreholes information from the National Hydrocarbons Archive, managed by IGME. A number of formations have been selected that, by their position, extent, depth and porosity, could be a future storage. The study has also been conducted considering the characteristics of the geological formations above the CO₂ storage formations so as to guarantee the sealing of the storage. The study includes the approximate estimation of the storage capacity for each formation, which can be useful in future decision making.*

Key words: *Underground geological storage, CO₂, Ebro Basin.*

INTRODUCCIÓN

El Parlamento Español en el año 2002 aprobó por unanimidad la ratificación del Protocolo de Kyoto, lo que le compromete a *limitar el incremento de sus emisiones de gases de Efecto Invernadero hasta un máximo del 15% para el horizonte 2008 – 2012, con respecto a los niveles del año 1990*. En el año 2005 las emisiones eran un 52% superiores a las de 1990, lo que plantea la necesidad urgente de tomar iniciativas para reducir o evitar que el CO₂ de las emisiones antropogénicas alcancen la atmósfera. Ello implica el desarrollo de nuevas tecnologías, para la captura de las emisiones de CO₂, y su almacenamiento en formaciones geológicas.

Actualmente el estudio de las posibilidades de almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas se está canalizando a través del Proyecto Singular Estratégico (PSE): “Tecnologías Avanzadas de

Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂”, uno de cuyos objetivos inmediatos, es definir, en el territorio nacional, aquellas cuencas, formaciones o estructuras geológicas con capacidad potencial de almacenar CO₂ de forma permanente (entre 10³-10⁴ años), así como llevar a cabo una estimación preliminar de la capacidad total disponible de almacenamiento geológico de CO₂ en España.

El Ciemat, en trabajos previos y dentro del PSE, ha establecido los criterios de selección de emplazamientos a escala regional y de formación (Ruiz *et al.*, 2007). El trabajo que aquí se resume, es la continuación de este trabajo y su objetivo es la selección de las formaciones que puedan actuar como “almacén” en la Cuenca del Ebro, así como la estimación de la capacidad de almacenamiento de cada una de ellas.

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca del Ebro constituye la cuenca de antepaís del orógeno pirenaico cuya génesis está relacionada con una subsidencia originada por un comportamiento flexural de la litosfera. La geometría de su relleno sedimentario consiste, salvo en el sector occidental, en un prisma con sección en forma de cuña abierta hacia el norte, en la que los sedimentos terciarios presentan una tendencia al solapamiento expansivo hacia el sur.

En función de su estructura, de la evolución de la subsidencia y de la edad de los materiales aflorantes, la Cuenca del Ebro puede dividirse en tres sectores (Pardo *et al.*, 2004): un *Sector Occidental* intensamente subsidente, con espesores totales que superan los 5.000 m; un *Sector Central*, más amplio, menos subsidente y con estructura prácticamente tabular; y un *Sector Oriental*, donde no existe registro de relleno Neógeno, pero que fue netamente subsidente durante el Paleógeno.

La serie mesozoica que se dispone bajo los sedimentos terciarios está constituida, en términos genéricos, por una sucesión alternante de secuencias siliciclásticas y carbonáticas y/o evaporíticas, por lo que es factible encontrar por debajo de los 800 m (profundidad mínima de almacenamiento) formaciones continuas, extensas y suficientemente potentes que actúen como almacenes. Por ejemplo, los términos siliciclásticos del Buntsandstein, que presentan una considerable porosidad primaria, contienen una serie de minerales reactivos que favorecerán el atrapamiento mineral, o los términos carbonáticos del Muschelkalk, Jurásico y Cretácico, que con porosidad principalmente secundaria, favorecerán los procesos de disolución del CO₂, produciéndose un atrapamiento iónico.

Dentro de la serie mesozoica, existen además potentes formaciones constituidas por rocas evaporíticas y arcillosas en el Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper y Jurásico, que pueden actuar como sellos suprayacentes a las rocas almacén.

La baja o muy baja densidad de fracturación, entre 0 y 10 fracturas /100 km² (CSN, 2006), aunque ésta aumenta hacia los bordes de la cuenca, unido a la baja actividad sísmica, hacen de la Cuenca del Ebro un área en principio favorable para el AGP de CO₂.

SELECCIÓN DE FORMACIONES FAVORABLES

La selección de formaciones favorables se ha basado en la reinterpretación de la información derivada de los sondeos de exploración de hidrocarburos realizados en la Cuenca del Ebro, principalmente entre los años 60 y 80. Estas campañas de exploración generaron una importante documentación (Lanaja, 1987; ITGE, 1990), que, ahora, se encuentra disponible a través del Fondo Documental del Archivo de Hidrocarburos del IGME.

Para la selección, partimos del hecho de que los materiales del Terciario y los del Paleozoico, no presentan condiciones idóneas para el almacenamiento,

dados los frecuentes cambios laterales de facies en los primeros, así como por la ausencia de sellos continuos y fiables que pudieran delimitar el almacenamiento, en ambos. El nivel almacén, por tanto, será elegido entre los materiales mesozoicos, por lo que en primer lugar se ha procedido a delimitar la base del Terciario y el techo del Paleozoico (Fig. 1 a y b).

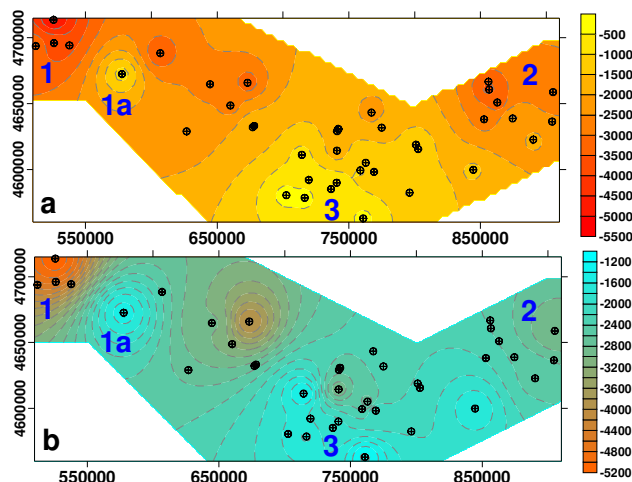


FIGURA 1. Mapas de isobatas de la base del Terciario (a) y del techo del Paleozoico (b). Sector Occidental (1); Sector Oriental (2); Sector Central (3).

De la observación de estos dos mapas de profundidades y teniendo en cuenta que las profundidades de almacenamiento óptimas se sitúan entre los 800 y 1700 m (2000 m máximo), se deduce que en el Sector Occidental (1 en Fig.1) no es posible contemplar un almacenamiento en las formaciones mesozoicas debido, a la enorme potencia de sedimentos terciarios (hasta 5000 m). Además se ha detectado una escasa porosidad de los materiales atravesados por los sondeos, causada por intensos procesos de diagénesis; igualmente se ha constatado una migración de hidrocarburos en el Terciario, determinada por la existencia de indicios en el Oligoceno basal, que nos indica la falta de estanqueidad de estos materiales.

En la zona Este del Sector Occidental se ha analizado un único sondeo (1a en Fig.1) con un recubrimiento terciario anómalamente delgado, por lo que determinadas formaciones mesozoicas podrían situarse a una profundidad adecuada. La continuidad lateral de éstas en torno a este sondeo estarán condicionadas, probablemente, por una estructuración que se materializa mediante rejuego de fallas no detectadas en superficie.

El Sector Oriental de la Cuenca del Ebro (2 en Fig.1) es un sector poco favorable para albergar un AGP ya que presenta también un gran espesor de sedimentos terciarios (hasta 3000-3500 m). Además presenta una importante complejidad estructural, con grandes variaciones de espesor y escasa continuidad lateral de las formaciones mesozoicas.

El Sur del Sector Central (3 en Fig.1) sí presenta, *a priori*, condiciones idóneas para la elección de formaciones almacén, debido a que el espesor de los

sedimentos terciarios disminuye hacia el Sur de la Cuenca. Dentro de los materiales mesozoicos cortados por los sondeos en esta zona se han seleccionado como posibles almacenes las siguientes formaciones (Fig. 2):

- A1:** Areniscas y conglomerados del Buntsandstein.
- A2:** Dolomías de la base del Muschelkalk.
- A3:** Dolomías del techo del Muschelkalk.
- A4:** Calizas Retienses (Fm. Imón).

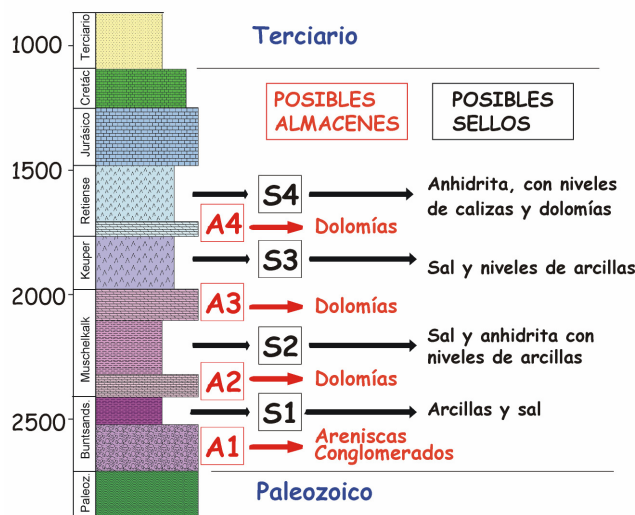


FIGURA 2. Columna estratigráfica parcial para la zona Sur del Sector Central con las posibles formaciones almacén y sello. El espesor de las diferentes formaciones corresponde a un valor medio obtenido a partir de los espesores en los sondeos analizados.

Como posibles sellos se han definido las siguientes formaciones (Fig. 2):

- S1:** Arcillas, anhidrita y sal del Buntsandstein
- S2:** Sal y anhidrita (\pm arcillas) del Muschelkalk
- S3:** Sal, anhidrita y niveles de arcilla del Keuper
- S4:** Tramo anhidrítico del Jurásico Inferior-Retiense.

De esta forma, por ejemplo, el almacén A1, con una potencia media de 126 m y a unas profundidades comprendidas entre 1100 y 1900 m en los sondeos analizados, se presenta como un nivel de almacenamiento muy prometedor, no sólo por la litología, profundidad y extensión, sino también por su estanqueidad, ya que presenta cuatro posibles sellos que lo aislarían de la superficie: S1, S2, S3 y S4 con potencias medias de 213 m, 223 m, 336 m y 367 m respectivamente.

El almacén A2, con potencia media de 78 m y a una profundidad media comprendida entre 1200 y 1600 m, también presentaría alta fiabilidad por la presencia de tres sellos posibles (S2, S3 y S4) que lo aislarían de la superficie.

El almacén A3 es el que probablemente presente mayores posibilidades en cuanto a extensión. Se presenta con una potencia media de 126 m, a unas profundidades comprendidas entre 1000 y 2400 m. La fiabilidad de este almacenamiento, aún teniendo únicamente dos sellos posibles, es alta, ya que

generalmente los materiales evaporíticos del Keuper se sitúan inmediatamente por encima, con potencias máximas de 750 m.

El almacén A4 (Fig.2) tiene menor espesor medio (68 m) y se sitúa a profundidades comprendidas entre los 1030 y 2050 m. Como nivel almacén posee un único sello (S4) no siempre presente.

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS ALMACENES SELECCIONADOS

La estimación del volumen de roca (V_R) disponible para el almacenamiento de CO_2 , en cada uno de los niveles almacén seleccionados (A1, A2, A3 y A4), es un paso imprescindible para poder calcular la capacidad real ($Q_{(A)}$) de almacenamiento de un nivel determinado.

Para la estimación de V_R , se ha seguido un proceso de cubicación mediante la integración entre dos superficies dadas (techo y muro de la formación) y el cálculo del volumen entre ellas. Este proceso se ha restringido, en cuanto a superficie, a los entornos próximos de los sondeos, para no sobreestimar la extensión lateral, y en cuanto a la profundidad, a la profundidad óptima de almacenamiento, 800-1700 m.

Un ejemplo de este cálculo se observa en la figura 3, en la que se reflejan los mapas de isobatas del techo y muro de la formación almacén A4, entre las profundidades 1000 y 1700 m. Los resultados para los cuatro almacenes son los que siguen:

$$\begin{aligned} V_R(A1) &= 116.57 \times 10^9 \text{ m}^3 \\ V_R(A2) &= 103.35 \times 10^9 \text{ m}^3 \\ V_R(A3) &= 164.59 \times 10^9 \text{ m}^3 \\ V_R(A4) &= 64.00 \times 10^9 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para realizar la estimación de capacidad ($Q_{(A)}$) se ha partido del volumen total de roca disponible (V_R) para cada formación almacén, se ha supuesto una porosidad útil media (P) de un 15%, y se ha supuesto también que el CO_2 es capaz de desplazar un 10% del agua contenida en los poros de la formación (D). Este último valor condiciona la eficiencia del almacenamiento y es muy dependiente del tipo de roca, del tipo de fluido y del tipo de almacén y estructura del mismo (Bradshaw et al., 2007). Así mismo se ha incluido en el cálculo la densidad del CO_2 en estado supercrítico ($\rho_{CO_2} = 650 \text{ kg m}^{-3}$) ya que está comprendida entre 600 y 700 kg m^{-3} para un gradiente geotérmico de 25°C/km y una temperatura superficial de 15°C (Bachu y Carroll, 2004).

Según la expresión $Q_{(A)\phi} = V_R \cdot P \cdot D \cdot \rho_{CO_2}$ la capacidad estimada para cada nivel almacén es:

$$\begin{aligned} Q_{(A1)600} &= 116,57 \cdot 10^9 \cdot 0,15 \cdot 0,1 \cdot 650 = 1136,56 \cdot 10^9 \text{ kg} \approx 1137 \text{ Mtm} \\ Q_{(A2)600} &= 103,35 \cdot 10^9 \cdot 0,15 \cdot 0,1 \cdot 650 = 1007,66 \cdot 10^9 \text{ kg} \approx 1008 \text{ Mtm} \\ Q_{(A3)600} &= 164,59 \cdot 10^9 \cdot 0,15 \cdot 0,1 \cdot 650 = 1604,75 \cdot 10^9 \text{ kg} \approx 1605 \text{ Mtm} \\ Q_{(A4)600} &= 64,00 \cdot 10^9 \cdot 0,15 \cdot 0,1 \cdot 650 = 624,00 \cdot 10^9 \text{ kg} = 624 \text{ Mtm} \end{aligned}$$

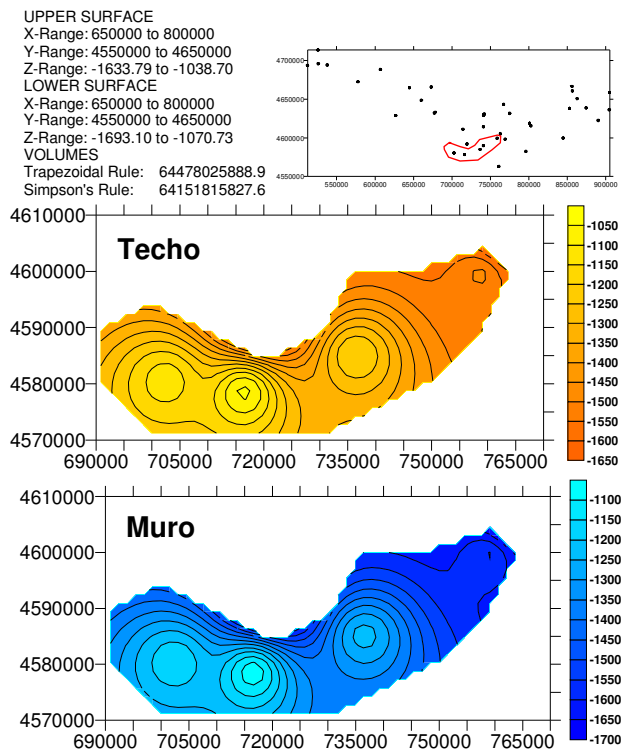


FIGURA 3. Mapas de isobatas del techo y muro de la formación almacén A4 y estimación del volumen total de roca disponible para almacenamiento entre 1000 y 1700 m de profundidad.

Estos valores de capacidad deberán ser ajustados, en primer lugar, mediante una valoración detallada de la porosidad efectiva (P), la cual puede presentar un valor mucho más pequeño que el 15% considerado, en segundo lugar, mediante la estimación de la eficiencia del almacenamiento (D), que, como ya hemos mencionado, puede alejarse del valor teórico considerado (10%), según el tipo de almacenamiento, y finalmente, los cálculos de capacidad deberán ser ajustados también, mediante una modelización de la geometría del almacenamiento, la cual influye directamente sobre el volumen total de roca disponible para el almacenamiento (V_R).

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan las posibilidades de un AGP de CO_2 en la Cuenca del Ebro descartándose los Sectores Oriental y Occidental, para centrarse en el Sur del Sector Central, en donde se pueden cumplir los requisitos requeridos en cuanto a profundidad del nivel de almacenamiento.

En este Sector Central se han seleccionado cuatro formaciones que pueden constituir niveles de almacenamiento: 1) en los términos siliciclásticos del Bunsandstein, con una capacidad de almacenamiento de 1137 Mtm, 2) en los dos términos dolomíticos del Muschelkalk, con una capacidad calculada de 1008 y 1605 Mtm respectivamente y 3) en las calizas del Retiense, con una capacidad de 624 Mtm. Estos valores de capacidad que se basan en el cálculo previo del volumen total de roca disponible, deberán ser ajustados

mediante una valoración detallada de cada uno de los almacenes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del PSE: PS-120000-2005-2 (3) "AGP de CO_2 ". Agradecer al IGME el acceso a los datos a través del FDAH y al Dr. Pérez del Villar del CIEMAT la lectura del manuscrito.

REFERENCIAS

- Bachu, S. and Carroll, J.J. (2004): *In situ phase and thermodynamic properties of resident brine and acid gases (CO_2 and H_2S) injected into geological formations in western Canada*, In: Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologie. Vol. 1, Vancouver, BC, September 2004.
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P. and Mathiassen, O.M. (2007): *CO_2 storage capacity estimation: Issues and development of standards*. International Journal of Greenhouse Gas Control, I, 62-68.
- CSN (2006): *Determinación de Fallas de Primer Orden mediante análisis integrado de datos geológicos*. Proy. PRIOR: CSN. Col: Otros Documentos. 312 p.
- ITGE (1990): *Documentos sobre la Geología del subsuelo de España. Tomo VI: Ebro-Pirineos*. Madrid, 36 p, 49 planos.
- Lanaja, J.M., Querol, R. y Navarro, A. (1987): *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la Geología de España*. IGME, Madrid, 465 p.
- Pardo, G., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Pérez-Rivarés, F.J., Vázquez-Urbez, M. y Villena, J. (2004): *La cuenca del Ebro*. En: Vera Ed. Geología de España. Cap.6. p 533-542.
- Ruiz, C., Recreo, F., Prado, P., Campos, R., Pelayo, M., de la Losa, A., Hurtado, A., Lomba, L., Pérez del Villar, L., Martínez, R., Ortiz, G. y Sastre, J. (2007): *Almacenamiento Geológico de CO_2 : Criterios de selección de emplazamientos*. Informe Técnico CIEMAT 1085, 99 p.