

Introducción al almacenamiento geológico de CO₂.

Roberto Martínez Orío. *Ingeniero de Minas. Jefe de Servicio de Hidrogeología Profunda.*

Instituto Geológico y Minero de España.

Isabel Suárez Díaz. *Ingeniera de Minas. Jefa de Proyectos Técnicos. Instituto Geológico y Minero*

de España.

El almacenamiento geológico de CO₂ es la última etapa de un proceso tecnológico denominado Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) cuya finalidad es separar el dióxido de carbono de la corriente de gases generada en una gran fuente emisora estacionaria, comprimirlo y transportarlo hasta un emplazamiento donde pueda ser confinado de forma permanente en altas cantidades. Este artículo presenta las características fundamentales de esta última etapa, así como su potencial de aplicación en el contexto europeo y nacional.

1 Introducción

Siendo la última etapa de las tecnologías CAC, el almacenamiento geológico de CO₂ supone un proceso crucial para el despliegue de estas tecnologías, ya que el resto del proceso carece de sentido si no se dispone de un potencial almacén. En este sentido, cabe reseñar que los países con pocos recursos de hidrocarburos, como es el caso de España tendrán una dificultad añadida a resolver, dado que la información y, por tanto, el conocimiento del subsuelo en estos países será, sin lugar a dudas, menor que en aquellas regiones donde la existencia de recursos de petróleo o gas haya justificado una mayor inversión en exploración.

En este contexto, es necesario recalcar la importancia de apoyar y promover la inversión en exploración del subsuelo nacional con el objetivo de alcanzar un conocimiento suficiente del subsuelo, que permita abordar la localización de los emplazamientos más prometedores para el almacenamiento. Es necesario recordar aquí que existe un consenso mundial en torno a las formaciones geológicas con más posibilidades para llegar a ser almacenes geológicos de CO₂: yacimientos de hidrocarburos, acuíferos salinos profundos y capas de carbón no minables.

1.1 Yacimientos de hidrocarburos

Se trata de depósitos que contienen recursos de petróleo o gas y que han sido aprovechados hasta un cierto porcentaje. Intuitivamente, parece claro que si la Naturaleza ha sido capaz de contener un fluido o gas durante larguísimos periodos de tiempo (varios millones de años), no hay motivos para pensar que no puedan contener por periodos similares otro fluido como el CO₂. Si bien la realidad no es tan simple, debido a los regí-

menes de presión y a la presencia de numerosos pozos que no estaban presentes de forma original en el yacimiento, lo cierto es que la inyección de dióxido de carbono se ha llevado a cabo de forma habitual en la industria del petróleo y el gas en las últimas tres décadas, si bien con el objetivo de presurizar de nuevo yacimientos parcialmente agotados.

1.2 Acuíferos salinos profundos

Son formaciones geológicas llenas de agua salada, no útiles para consumo humano. En sentido estricto, son acuíferos, ya que son capaces de contener y transmitir agua, pero no deben confundirse con depósitos de agua potable, se trata de aguas salinas que no pueden ser consumidas ni empleadas para riego. Aunque son las formaciones con mayor potencial de almacenamiento a escala mundial (NETL, 2005), es en estas formaciones donde menos experiencia se tiene en cuanto a proyectos de demostración existentes en el mundo. En cualquier caso, representan el potencial español y de su exploración y utilización depende el despliegue efectivo de las tecnologías CAC en España.

1.3 Capas de carbón no minables

Una opción viable es la de almacenar el dióxido de carbono en capas de carbón profundas que no vayan a ser aprovechadas por la minería. Si bien se trata de una alternativa muy interesante en países con grandes reservas y consumos de carbón (China, India, Estados Unidos, etc.) y, por tanto, el desarrollo tecnológico puede tener un gran potencial económico, en España su aplicación será poco intensa, ya que presentan varias dificultades, dado que las capas suelen ser poco potentes y su continuidad suele verse afectada por pequeñas fallas y plegamientos, procesos tectónicos que contribuyen además a reducir la permeabilidad a través de dichas formaciones (Llamas, 2009)

2 Condiciones de almacenamiento geológico

A partir de este momento, nos referiremos aquí a las condiciones de almacenamiento en acuíferos salinos, por ser el

principal potencial de aplicación en España. Sin embargo, muchas de estas condiciones son aplicables a los yacimientos de hidrocarburos, y señalaremos las diferencias principales. El caso de los carbones es diferente y necesitaría de otro artículo específico y, probablemente, más especializado, por lo que no se detallará aquí. Simplemente añadiremos que el proyecto europeo 'GeoCapacity' estimó para las capas de carbón españolas una capacidad de almacenamiento de 200 millones de toneladas de CO₂ (Martinez et al, 2007)

Las condiciones de almacenamiento vienen definidas por las propiedades del fluido y por los mecanismos físicos y químicos que regirán su comportamiento y llevarán a asegurar su confinamiento permanente. Un aspecto fundamental es la profundidad a la que se localizará la formación almacén, que albergará el CO₂. La profundidad mínima se suele fijar en el entorno de los 700 m, y por debajo de ella debe inyectarse el CO₂. Esta profundidad es consecuencia de la necesidad de que el CO₂ inyectado se encuentre en unas condiciones que aseguren un estado físico-químico conocido como supercrítico, de forma que se optimiza la capacidad de almacenamiento. Mientras que 1 tonelada de CO₂ en superficie, en condiciones normales (0 °C y 1 bar), ocupa 509 m³, esta misma tonelada en estado supercrítico ocuparía 1,39 m³. El estado supercrítico del CO₂ se alcanza al traspasar su punto crítico a 73,2 bares de presión y 31,1 °C, condiciones que son naturales en las profundidades comentadas con anterioridad, siempre que existan gradientes geotérmicos normales (incremento de 3 °C de temperatura por cada 100 m de profundidad). En este estado supercrítico el CO₂ tiene la viscosidad propia de un gas pero con una densidad mayor (>467

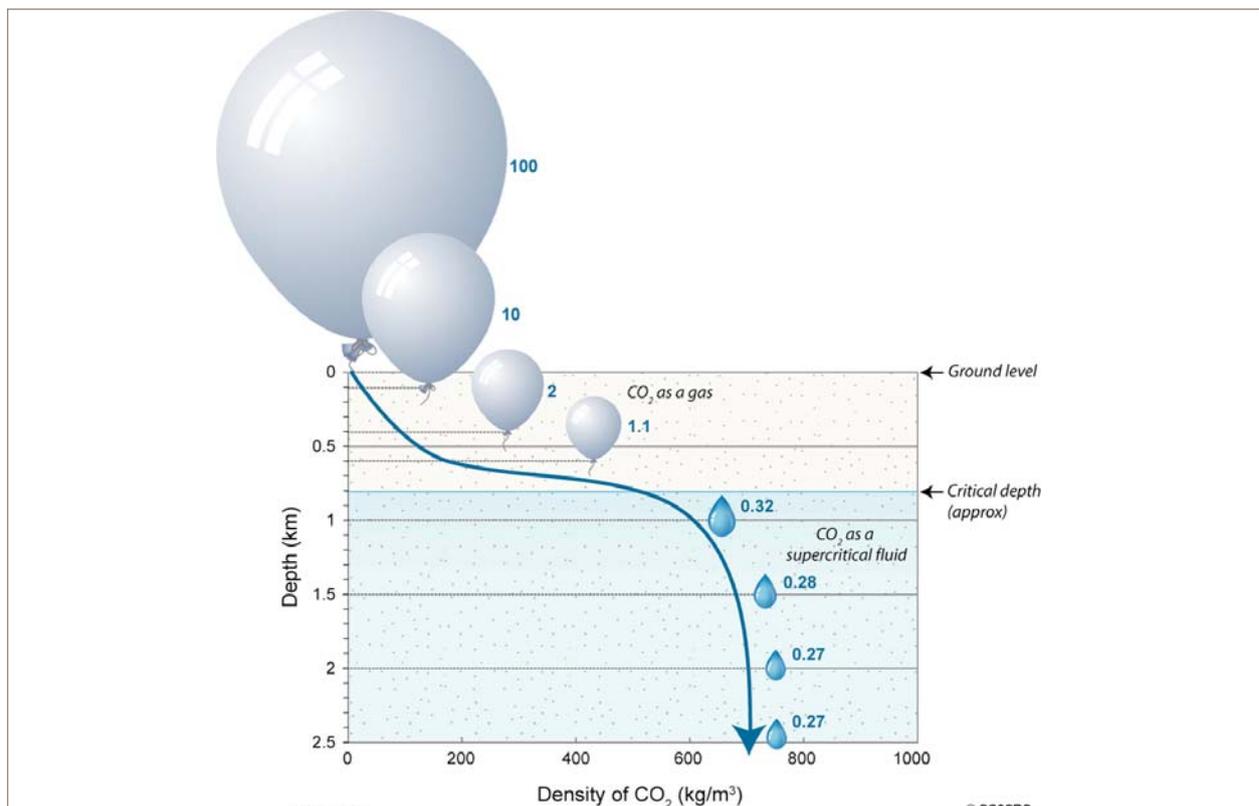
kg/m³), favoreciendo la capacidad de almacenamiento total y el ritmo de inyección, lo que permite enfrentarse a las enormes cantidades de CO₂ generadas en las grandes fuentes estacionarias.

En cuanto a las propiedades petrofísicas de la formación, se trata, fundamentalmente, de una porosidad elevada y una permeabilidad suficiente para permitir una adecuada inyectabilidad en el estrato. La formación almacén puede ser, muy genéricamente, de dos tipos: Formaciones siliciclásticas; es decir, arenas, areniscas y conglomerados, generalmente dotadas de una alta porosidad primaria, y formaciones carbonatadas, calizas y dolomías, donde se encuentran valores más altos de porosidad por fractura y por disolución.

Dado que el dióxido de carbono, como cualquier otro fluido, tenderá a ascender por diferencia de densidad, es necesaria la presencia de una formación sello, que ejerza un mecanismo de entrapamiento denominado 'estructural' (Bachu et al, 2005). En cuanto a las propiedades de esta formación sello, ha de ser impermeable y tener características plásticas que le permitan absorber los incrementos de presión producidos durante la inyección, sin que pueda producirse ningún tipo de rotura o fractura en su extensión. Por lo tanto, las formaciones más favorables son las que presentan litologías tipo arcillas, margas y yesos con espesores representativos.

Cabe reseñar que las propiedades adecuadas de las formaciones almacén y sello se suponen en el caso de los yacimientos de hidrocarburos que han sido capaces de contener fluidos

■ Figura 1. Evolución de la densidad del dióxido de carbono en función de la profundidad.



largo tiempo y, además, han permitido ritmos de producción rentables. Una diferencia fundamental es que los campos de hidrocarburos en vías de agotamiento están despresurizados y, por tanto, la capacidad de incrementar la presión en ellos es superior. Sin embargo, la presencia de abundantes pozos de producción puede suponer un riesgo elevado, dado que podrían suponer vías de fuga para el CO₂ inyectado si no son bien conocidos.

En cuanto a la geometría de las formaciones en el subsuelo, existen diferentes tipos de estructuras geológicas que cumplen las condiciones para que puedan funcionar como almacenes geológicos de CO₂. La forma más representada para los almacenamientos es la de los anticlinales, donde el par de formaciones almacén-sello forman un domo que favorece el entrapamiento estructural. Pero existen muchas otras posibilidades, dada la compleja realidad geológica (Figura 2), tales como monocinales, donde se encuentran las formaciones buzando ligeramente en una determinada dirección. Las barreras laterales para el CO₂ en este tipo de trampas son aquellas que hacen imposible seguir desplazando el agua salada de formación que existe en el almacén, y pueden ocasionar un aumento peligroso de la presión. Existen también barreras estructurales, como una falla que pone en contacto las formaciones almacén con las de sello, o barreras estratigráficas donde lo que ocurre es un cambio en los ambientes sedimentarios que produce una deposición de estratos con propiedades ya no adecuadas para el almacenamiento.

Para determinar estas, y otras, características de los potenciales almacenes de CO₂ es necesaria una extensa recopilación de datos de carácter geológico, geofísico, hidrogeológico y geoquímico, que permitan una aproximación cada vez más fiable a la

realidad del subsuelo. Como en la mayor parte de las prospecciones de carácter geológico-minero, el coste y el detalle de las herramientas se irán incrementando según se vayan confirmando las posibilidades estimadas por las herramientas más económicas. Es necesario recalcar que estas investigaciones son costosas y tienen cierto riesgo, especialmente en países con escasas reservas de hidrocarburos como es el caso de España, si bien se estima que el coste total de la etapa de almacenamiento no supere el 20% del coste total del proceso (Plataforma Europea de Emisión Cero, ZEP, 2006).

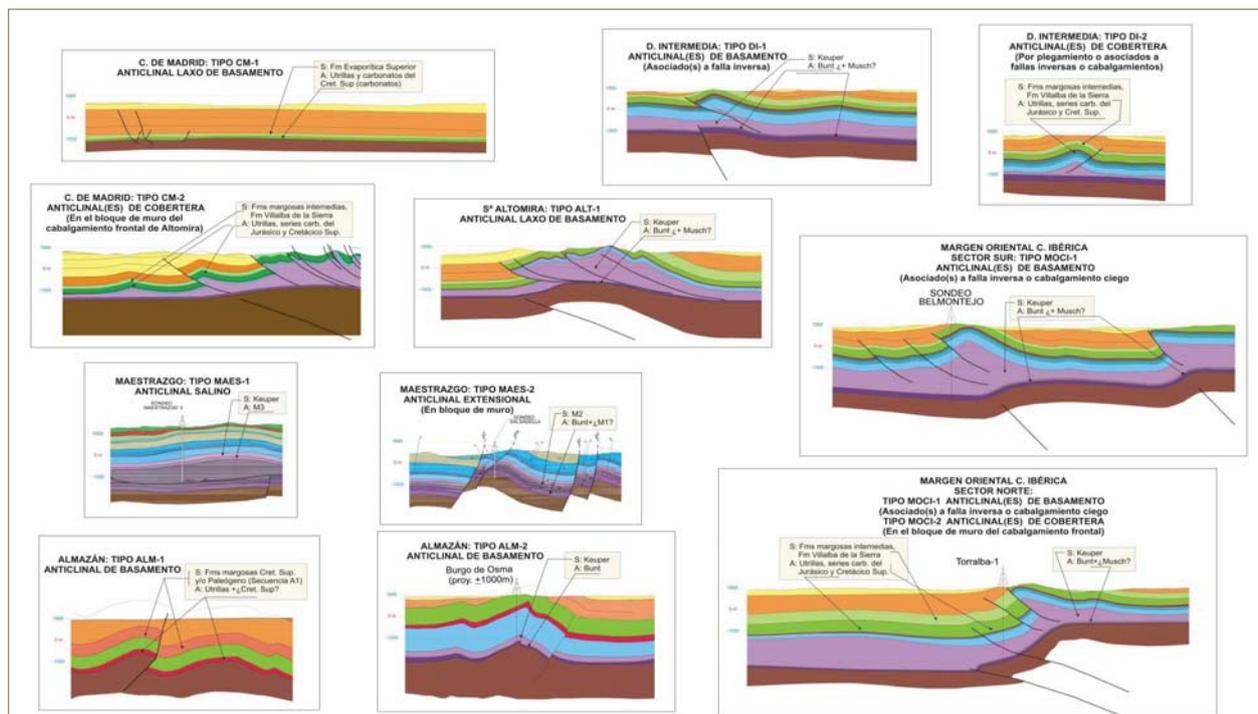
3 Estrategia de despliegue de tecnologías de almacenamiento de CO₂

El Gobierno de España estableció un Plan de acción para la Captura y el Almacenamiento Geológico de CO₂, en el marco de la Estrategia Española Contra el Cambio Climático para los horizontes 2007-2012-2020.

Los objetivos a escala nacional para el Almacenamiento, son tres principalmente:

1. La trasposición de la Directiva Europea sobre Almacenamiento Geológico de CO₂, Directiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, a la legislación española y que ya se ha llevado a cabo con resultado de aprobación de la Ley 40/2010 sobre Almacenamiento de CO₂, publicada en el BOE el 30 de diciembre de 2010.
2. Generación de una infraestructura general de almacenes geológicos, misión que se le encomienda al Instituto Geológico y Minero de España, organismo público de investi-

■ Figura 2. Principales tipos de estructuras favorables para el almacenamiento geológico.



gación perteneciente entonces al Ministerio de Ciencia e Innovación, y especialista en el estudio de las Ciencias de la Tierra.

3. Creación y fomento de grupos tecnológicos que sean capaces de poder desarrollar y trabajar en un almacenamiento geológico para el CO₂ a escala comercial, objetivo encomendado al consorcio Ciuden-Endesa, a consecuencia del cual se desarrolla el Proyecto Compostilla, financiado por el Programa EEPR de la Unión Europea.

Asimismo, la Plataforma Tecnológica Española del CO₂ ha editado sucesivos documentos acerca de la I+D+i necesaria para implantar las tecnologías CAC en España en los próximos años. Particularmente, en Diciembre de 2011 ha difundido un plan específico para la investigación y despliegue de las tecnologías de almacenamiento de CO₂, que hace especial hincapié en la potenciación de consorcios que desarrollen experiencias piloto que permitan la comprobación in situ del funcionamiento de las herramientas de caracterización geológica (PTECO₂, 2011)

En cualquier caso, la investigación en este campo debe tener como objetivo dotar al sector productivo de capacidad para desarrollar de forma fiable los modelos descritos en la Ley 40/2010, descritos a continuación (CNE, 2012):

- **Modelo Geológico-Estructural 3D:** refleja la posición de la superficie de cierre del almacén, la estructura, composición de la cobertera y la ubicación de posibles fallas significativas. El modelo define, en la medida de lo posible, la arquitectura externa e interna del conjunto almacén-sello objeto de secuestro de CO₂ y define las posibles vías de escape del CO₂ almacenado. Complementado con datos de presión, temperatura, porosidad y permeabilidad de las formaciones almacén y sello, permite establecer simulaciones y poder evaluar las estrategias de inyección (nº de pozos, localización, espaciado, orientación, intervalos de inyección, etc.).
- **Modelo de Flujo o de Simulación:** es un elemento clave en la caracterización del almacén que proporciona predicciones cuantitativas del comportamiento dinámico de sus fluidos y permite definir los procesos básicos en el sistema, las fases en las que se van a encontrar sus fluidos, establecer estimaciones de capacidad, de una posible segregación de una montera de gas ('gas cap') de CO₂.
- **Modelo Geoquímico:** permite establecer el grado de reactividad entre el CO₂, el agua de formación y los minerales que constituyen las formaciones involucradas, evaluando los posibles impactos geoquímicos en el almacén y en la formación confinante. La reactividad del CO₂ con las rocas puede dar lugar, por ejemplo, a importantes cambios mineralógicos, disoluciones y precipitaciones, que pueden inducir, a su vez, relevantes alteraciones petrofísicas (sobre todo permeabilidades) que pueden alterar significativamente el modelo previsto de inyección. La reactividad del CO₂ con los fluidos de formación puede dar lugar a variaciones en sus densidades, viscosidades y, en el caso de hidrocarburos,

miscibilidades. El CO₂ también puede ser soluble, a largo plazo, en el agua de formación. Se pueden esperar cambios en las condiciones termodinámicas, presión de poro y reacciones cinéticas.

Estos modelos, además de ser fundamentales en el desarrollo de la ingeniería del almacenamiento, serán objetivo de validación mediante el monitoreo de la evolución del almacén y servirán como base para la elaboración de medidas correctoras en caso de desviación sobre los modelos establecidos. Las características de los planes de monitoreo y control no serán descritas aquí, dada la complejidad de sus diferentes etapas, que harían necesaria una amplia argumentación sobre cada una de ellas. Simplemente señalaremos que el control se debe iniciar antes del comienzo de otras operaciones y se prolongará hasta mucho después del final de las mismas.

4 Posibilidades de almacenamiento de CO₂

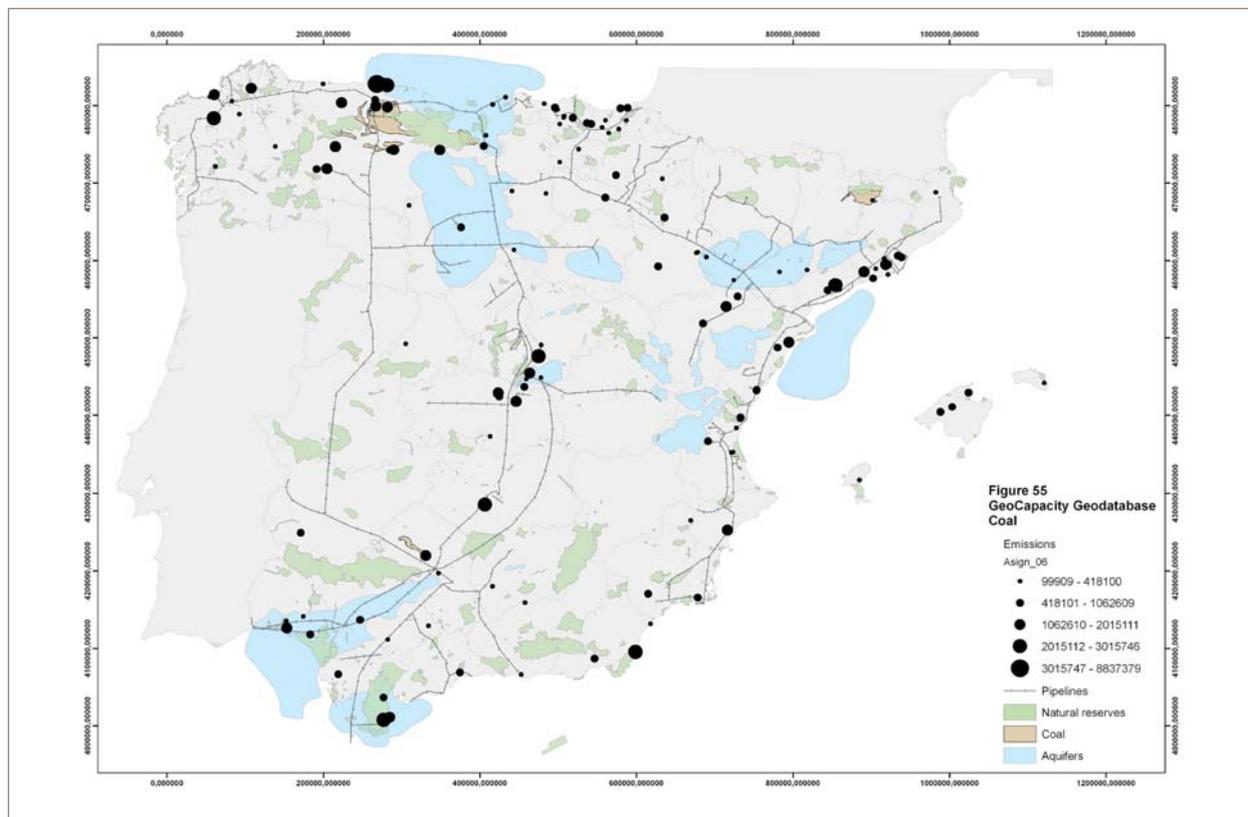
El primer trabajo de selección de emplazamientos para almacenamiento de CO₂ que cubrió todo el territorio nacional fue el Proyecto Europeo 'GeoCapacity', financiado por el VI Programa Marco de la Comisión Europea. Este proyecto aplicó una metodología homogénea a todo el territorio, incluyendo algunas áreas de la plataforma continental, y obteniendo unos primeros rangos de capacidad de todas las estructuras seleccionadas. En este caso, la aproximación fue de carácter regional (Figura 3), si bien en algunos casos, por contar con información particular de detalle, se valoraron algunas estructuras con mayor precisión. Cabe resaltar que en el marco de este proyecto la información se aportó desde 24 países europeos, y ha sido compilada en una base de datos común para todos ellos, dentro de un Sistema de Información Geográfica que incluye también los grandes centros de emisión y las principales redes de transporte.

Los resultados de 'GeoCapacity', lógicamente con las reservas que un proyecto a tan gran escala puede presentar, dieron como resultado un rango de capacidad para los acuíferos salinos profundos en territorio nacional que varía entre 13 y 22 Gt de CO₂ (Zapatero et al, 2009). Las cifras para el total de Europa alcanzaron las 300 Gt para los acuíferos salinos y algo más 80 Gt para yacimientos de hidrocarburos.

Con posterioridad, el IGME ha desarrollado el 'Plan de selección y caracterización de áreas y estructuras favorables para el Almacenamiento Geológico de CO₂ en España', conocido como Plan ALGECO₂, en el que se ha llevado a cabo un estudio de mayor detalle de las zonas de interés descritas en 'GeoCapacity'.

Los trabajos desarrollados en ALGECO₂, financiado por el Instituto para la Reestructuración de la Minería del Carbón y el Desarrollo Alternativo de las Comarcas Mineras, IRMC, organismo perteneciente al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, han sido los siguientes:

■ **Figura 3. Mapa de localización de áreas favorables en para el almacenamiento según Proyecto 'GeoCapacity'.**



- Identificación de pares de formaciones almacén-sello.
- Análisis e interpretación de la información geocientífica.
- Realización de mapas de isobatas y de isopacas regionales.
- Estudios hidrogeológicos regionales a escala de Cuenca, con elaboración de modelos de funcionamiento hidrogeológico.
- Modelización geológica 3D.
- Cálculo de la capacidad de almacenamiento.
- Realización de sondeos cortos.
- Panel de expertos para identificación y valoración de criterios, con objeto de realizar la jerarquización de las estructuras seleccionadas.

Como resultado de estos trabajos se han publicado varios volúmenes que describen el desarrollo de los mismos en todo el territorio nacional y que suponen documentos de amplia utilidad para el sector empresarial en el desarrollo de sus estrategias de introducción de la CAC en sus planes de reducción de

emisiones. Una vez realizada la valoración de todas las estructuras seleccionadas y la valoración de las mismas en función del criterio de los expertos se han realizado diversos análisis de los resultados, algunos de los cuales se pueden ver en la siguiente tabla (García Lobón et al, 2011): BG=Béticas-Guadalquivir, IT=Ibérica-Tajo, CD=Cantábrica-Duero y PE= Pirineos-Ebro.

5 Conclusiones

El almacenamiento geológico de CO₂ es una opción aceptada internacionalmente como opción de mitigación del Cambio Climático. Las principales posibilidades a escala europea se centran en los yacimientos de hidrocarburos, especialmente en el Mar del Norte y en Europa del Este, y en los acuíferos salinos profundos, que están siendo objeto de estudio en todo el continente. Esta

■ **Tabla 1.**

CUENCAS	BG	IT	CD	PE	TOTAL
Número almacenes	19	31	34	19	103
Almacenes >50 Mt	13	13	19	10	55
Almacenes >50 Mt Alta favorabilidad / Alta fiabilidad	1	7	4	3	15
Almacenes >50 Mt Alta favorabilidad / Baja fiabilidad	7	0	3	7	17
1. Capacidad Alta favorabilidad / Alta fiabilidad (Mt CO ₂)	366	1.830	617	301	3.114
2. Capacidad Alta favorabilidad / Baja fiabilidad (Mt CO ₂)	1.975	0	1.219	942	4.136
Capacidad total 1+2 (Mt CO ₂)	2.341	1.830	1.837	1.243	7.251

última opción es la más prometedora en España y, por tanto, está siendo estudiada detenidamente por el Instituto Geológico y Minero de España a través de diversos proyectos nacionales y europeos.

Es necesario profundizar en el conocimiento de estas formaciones geológicas para incentivar al sector empresarial a invertir en tecnologías CAC, siguiendo las pautas establecidas por las Plataformas Tecnológicas relacionadas con esta tecnología en España y en Europa (PTECO₂ y ZEP). En cualquier caso, las cifras de capacidad de almacenamiento que se están obteniendo son, comparativamente con las cifras de emisión, suficientes para ser optimistas con el potencial de esta tecnología y apostar por su desarrollo en los próximos años, en consonancia con las previsiones de la Unión Europea.

Bibliografía

- National Energy Technical Laboratory. "Carbon Sequestration Technology Roadmap". NETL, 2005.
- Llamas, B. Captura y Almacenamiento de CO₂: Criterios y metodología para evaluar la idoneidad de una estructura como almacén de CO₂. Universidad de Huelva, 2009.
- Martínez, R. "Assessing storage capacity of European coal seams". Proyecto 'GeoCapacity', 2007.
- Bachu, S. "Methodologies for estimation of CO₂ storage capacity in geological media". CSLF, 2005.
- Christensen, N.P. y 26 autores más. "Strategic Deployment Document on CCS". Zero Emission Platform, 2006.
- PTECO₂. Grupo de trabajo de almacenamiento. "Agenda estratégica de I+D en almacenamiento geológico de CO₂". PTECO₂, 2011.
- Club Español de la Energía. Captura, transporte y almacenamiento de CO₂. CEE, 2011.
- Zapatero, M.A. El Proyecto Europeo 'GeoCapacity'. Aplicación al caso español. IGME, 2009.
- García Lobón, J.L. Plan de selección de formaciones y estructuras geológicas para almacenamiento de CO₂. Resumen ejecutivo. IGME, 2011.