



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Almacenamiento geológico de CO₂: Selección de formaciones favorables.

Autor: Antonio J. Prado Pérez

Institución: CIEMAT

E-mail: antonio.prado@ciemat.es

Otros autores: R. Campos (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente-URJC. Departamento de Geología y Biología), C. Ruiz (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente), M. Pelayo (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente), F. Recreo (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente), L. Lomba (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente), A. Hurtado (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente), S. Eguilior (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente), L. Pérez del Villar (CIEMAT. Departamento de Medio Ambiente).



RESUMEN:

El almacenamiento geológico de CO₂ en estado supercrítico, (31.1°C y 7.38 MPa) en formaciones geológicas profundas es una de las opciones tecnológicas que actualmente se están considerando para la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y contribuir así a mitigar el cambio climático global. Es también, dentro de las opciones posibles, la que en el ámbito internacional está cobrando mayor relevancia. En la fase actual (2005-2007) del Proyecto Singular Estratégico 'Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂', promovido por el Ministerio de Ciencia e Innovación, se ha realizado un estudio acerca de los criterios de selección de almacenamientos y de las opciones para almacenar CO₂ en el territorio español. Como resultado de ese trabajo se ha desarrollado una metodología general para seleccionar potenciales formaciones almacén y evaluar la capacidad de almacenamiento de CO₂. Este estudio ha requerido, en primera instancia, la identificación y selección de formaciones y/o estructuras geológicas que cumplan los criterios de idoneidad necesarios para garantizar la seguridad a largo plazo del CO₂ inyectado. Las grandes cuencas sedimentarias ofrecen, en general, escenarios favorables para el almacenamiento definitivo de CO₂, bien como formaciones permeables profundas con aguas salobres, o bien como estructuras que han contenido petróleo o gas. En la Península Ibérica se han estudiado las cuencas del Duero, Almazán y Ebro, utilizando la información generada en las campañas de exploración de petróleo, que está contenida en el Archivo Nacional de Hidrocarburos. Se han seleccionado una serie de formaciones que, por sus características relativas a disposición tectoestructural, extensión, profundidad, porosidad y permeabilidad, entre otros parámetros, podrían constituir futuros almacenamientos. Se ha prestando también una especial atención a las formaciones sello, que garantizarían la estanqueidad de los diferentes almacenes. Estas formaciones se han modelizado mediante un SIG para la delimitación de áreas y volúmenes idóneos para inyectar CO₂ y se ha realizado una estimación preliminar de sus respectivas capacidades de almacenamiento, que si bien constituyen aún aproximaciones, permiten apostar por el potencial del territorio nacional para almacenar CO₂ a escala industrial.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la temperatura media, la disminución del volumen de hielo, la subida del nivel medio del mar la variabilidad de las temperaturas medias (Figura 1 y 2), y los episodios climáticos extremos que se suceden en la última década, son sólo algunas de las evidencias de la realidad del cambio climático actual, causado, principalmente, por la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero (IPCC. 2005).

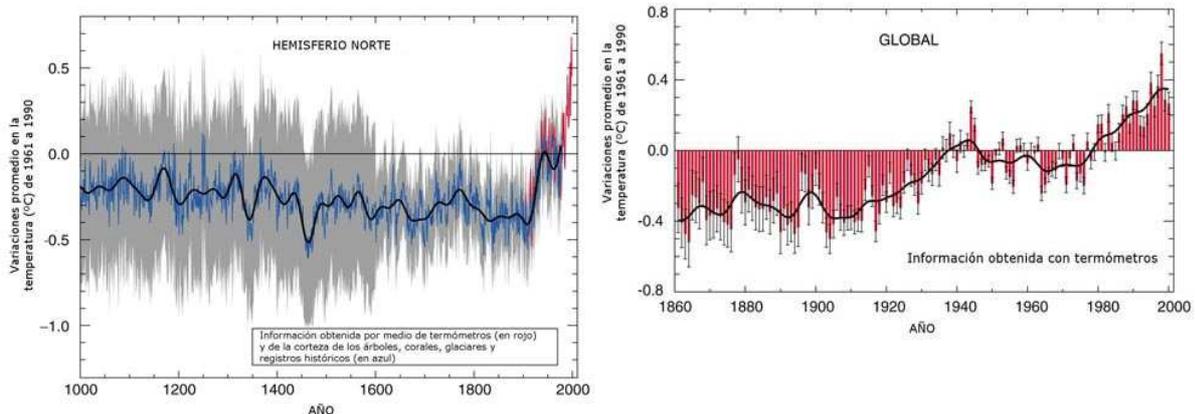


Figura 1. Variaciones en la temperatura media de la superficie de la Tierra durante los últimos 1000 años (Watson *et al*, 2001).

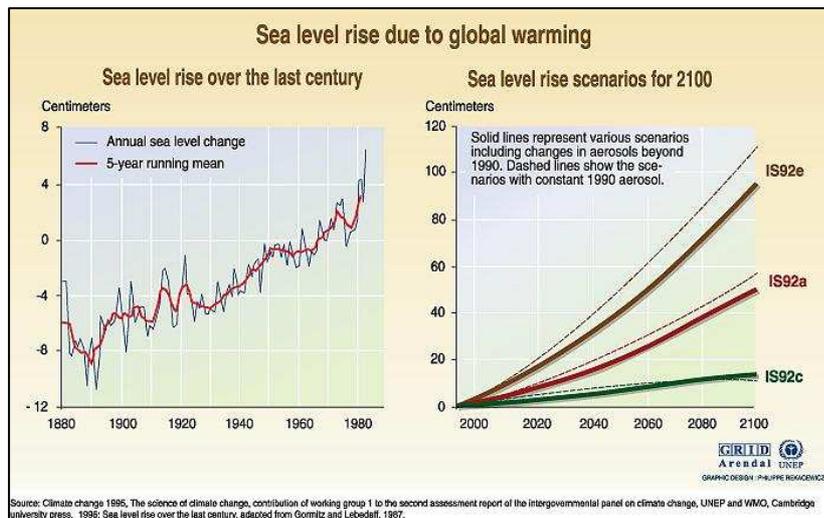


Figura 2. Ascenso del nivel del mar en el último siglo y predicciones para el presente (Watson *et al*, 2001).

Estas evidencias han llevado a adoptar diferentes medidas para controlar el cambio climático que están recogidas en el Protocolo de Kyoto, firmado en Diciembre de 1997, y aprobado unánimemente por el Parlamento Español en el año 2002. El Protocolo de Kyoto compromete al Estado Español 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% superior a las de 1990, lo que ha planteado la necesidad urgente de tomar iniciativas para reducir o evitar que el CO₂ de las emisiones



antropogénicas alcance la atmósfera. Estas medidas están fomentando el desarrollo de nuevas tecnologías para capturar las emisiones de CO₂, transportarlo y almacenarlo en formaciones geológicas.

Entre los almacenes geológicos posibles destacan, por su aceptación en el ámbito internacional y por su potencial de almacenamiento, las formaciones permeables profundas, los yacimientos de hidrocarburos (petróleo y gas) agotados o en vías de agotamiento, y las minas de carbón de difícil explotación.

En este contexto, en el año 2005 nace el subproyecto nº 3 “Almacenamiento geológico de CO₂” dentro del Proyecto Singular Estratégico “Tecnologías avanzadas de generación, captura y almacenamiento de CO₂”, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, actualmente de Ciencia e Innovación. Este subproyecto tuvo como objetivo principal definir la metodología más adecuada para seleccionar, a escala nacional, aquellas cuencas, formaciones, o estructuras geológicas con capacidad potencial de almacenar CO₂ de forma permanente (10³-10⁴ años) (IPCC 2005), así como llevar a cabo una estimación preliminar de la capacidad de almacenamiento total disponible en España.

Mediante la integración del estudio de las zonas geológicas de rango mayor del territorio nacional y los criterios generales de selección de emplazamientos a escala regional se han preseleccionado, como objetivos principales, las grandes cuencas sedimentarias. Dentro de las cuales se han estudiado la cuenca del Duero (Prado *et al.*, 2008 a y b; Hurtado y Eguilior 2008 y Hurtado 2008) la cuenca del Ebro (Campos *et al.*, 2008), y la subcuenca de Almazán (Ruiz y Lomba., 2008 a, b y Ruiz *et al.*, 2008). Estas cuencas se seleccionaron tanto por: i) su situación geotectónica, que conlleva una baja fracturación y baja o nula actividad sísmica; ii) por el gran espesor del relleno sedimentario Mesozoico y Terciario, que facilita la posibilidad de encontrar formaciones almacén de carácter siliciclástico o carbonatado, así como formaciones sello, principalmente de naturaleza evaporítica y/o arcillosa; y iii) por la importante información disponible del subsuelo, procedente de la exploración de hidrocarburos. Por todo esto, se han considerado dichas zonas como idóneas para desarrollar una metodología de trabajo que permita identificar, seleccionar, modelizar y valorar las áreas y formaciones que cumplan una serie de criterios favorables para ser seleccionadas como emplazamientos de un almacenamiento geológico de CO₂.

2. OBJETIVOS

Los tipos de formaciones geológicas potencialmente favorables para albergar CO₂ están siendo estudiados en el ámbito internacional.

En esta dinámica, como fase inicial o previa a la identificación de formaciones favorables, se deben establecer los criterios de selección de este tipo de formaciones, para realizar posteriormente los estudios regionales necesarios con el fin de preseleccionar las diferentes áreas potencialmente favorables y realizar un estudio detallado de las mismas. En este último punto es donde se enmarca el presente trabajo, el cual tiene dos objetivos fundamentales:

El primero, consiste en realizar un *inventario de las posibles formaciones favorables para almacenar CO₂*, integrando los datos disponibles sobre las zonas preseleccionadas y los criterios geológicos de favorabilidad, tanto a escala de cuenca como de formación.

El segundo objetivo tiene un carácter marcadamente práctico, ya que ha consistido en realizar una estimación de la capacidad teórica de almacenamiento de cada uno de los almacenes previamente seleccionados, mediante el cálculo del volumen de roca total y asumiendo unas condiciones geológicas predeterminadas para cada almacén.

De la integración y análisis de estos dos objetivos se han obtenido unos resultados que puedan orientarnos sobre la viabilidad práctica de almacenar CO₂ en formaciones geológicas profundas en España, y más concretamente en las cuencas del Duero y del Ebro.

3. MARCO GEOLÓGICO

Durante el Terciario, la Placa Ibérica resultó intensamente deformada como consecuencia de su desplazamiento hacia el este debido a la apertura del Atlántico y a su posición entre las placas Euroasiática y Africana (Pozo y Gonzalez Casado, 1999) En este contexto, además de la formación de las cadenas alpinas, tuvo lugar la formación de varias cuencas sedimentarias. En las zonas del interior peninsular se formaron las cuencas cratónicas interiores del Duero y Tajo, mientras que las cuencas del Ebro y Guadalquivir corresponden a cuencas de antepaís por su situación respecto a los orógenos alpinos.

3.1. La cuenca del Duero

La cuenca del Duero está localizada en el Macizo Hespérico (Figura 3), tiene una extensión de aproximadamente 50.000 km² y es la cuenca cenozoica más extensa de la Península Ibérica. Geológicamente se define como una cuenca intraplaca, de evolución compleja, originada durante el Cretácico terminal-Paleógeno, debido posiblemente a la reactivación de los sistemas tardihercínicos de fracturas (Alonso Gavilán. et al., 1983)

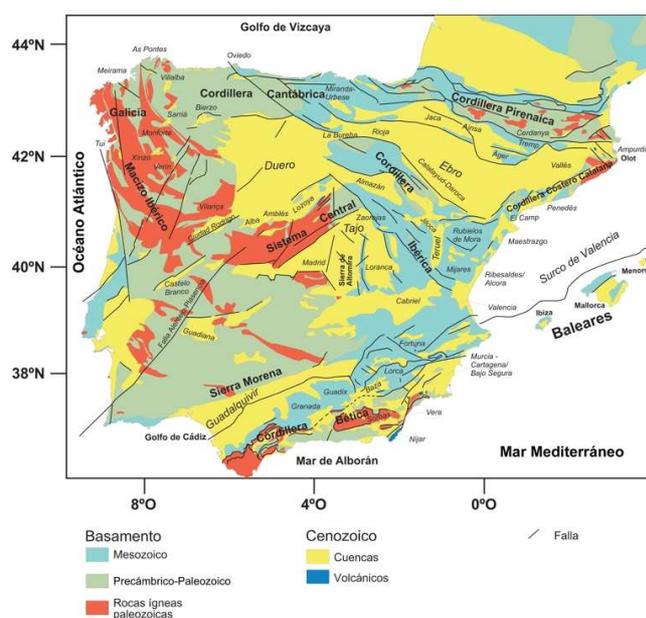


Figura 3. Ubicación de las Cuenecas Cenozoicas en el contexto estructural de la Península Ibérica (tomado de Vera, J.A. (2004), adaptado de Andeweg, 2002).



Los bordes de la cuenca han tenido gran influencia en la génesis y posterior desarrollo de la misma, ya que, dentro de un contexto compresivo generalizado, cada uno evolucionó de manera totalmente independiente durante el Terciario. En términos generales, los márgenes norte y este tienen un relleno similar a los de las cuencas de antepaís, mientras que los márgenes oeste y sur presentan una tectónica de bloques que se inclinan progresivamente hacia el centro de la cuenca, principalmente en el sector occidental. El sector norte funcionó, desde el Eoceno, como una cuenca de antepaís, relacionada con la evolución alpina de la Cordillera Cantábrica (Alonso Gavilán et al., 1996), manifestando el sector este un comportamiento similar al de la Cordillera Ibérica, si bien la subcuenca de Almazán, perteneciente a este sector, muestra un desarrollo y evolución, durante el Paleógeno, de cuenca tipo *Piggy-back* (Guimerá et al., 1995; Casas Sainz et al., 2000). También el sector sur, margen norte del Sistema Central, se comportó como una cuenca de antepaís durante el Oligoceno-Mioceno inferior (Capote et al., 2002). Tanto el sector oeste como la zona limítrofe del sector sur se caracterizaron, principalmente durante el Paleógeno, por una tectónica de *horsts* y *grabens* a favor de fallas SO-NE y sus conjugadas (Alonso Gavilán, 1981).

Este comportamiento geodinámico es el causante de la morfología asimétrica de la cuenca en la que los márgenes sur y oeste experimentaron una ligera subsidencia a favor de fallas, mientras que en los márgenes norte y este se desarrollaron grandes cabalgamientos que generaron una subsidencia notablemente mayor.

Como consecuencia de este comportamiento diferencial, el zócalo de la cuenca se hundió progresivamente hacia el norte y este, generándose en estas zonas los mayores espacios de acomodación y por tanto los mayores espesores.

Dentro de la cuenca del Duero se ha estudiado, de manera individualizada, la cuenca de Almazán por tener entidad geológica propia (Ruiz y Lomba, 2008 a). Ésta, en su mayor parte representa la extensión sureste de la cuenca del Duero, constituyendo una de las subcuencas en las que se divide la misma. Tiene una extensión de 4150 km² y se sitúa al sur del macizo de Cameros, al noreste del Sistema Central y está orlada, en sus límites oriental y meridional, por la Cordillera Ibérica (Figura 3). Se trata de una cuenca de tipo *Piggy Back* desarrollada sobre el bloque de techo del cabalgamiento de Cameros (Huerta, 2006), en la que los sedimentos terciarios del relleno se encuentran flanqueados por afloramientos de rocas de edad mesozoica. El relleno de la cuenca comienza en el Paleógeno. Al comienzo de la sedimentación la cuenca estuvo dividida en subcuencas, las cuales, a lo largo de su evolución, se unieron formando una única cuenca. La geometría de la misma es asimétrica (Alonso et al., 1983) debido al diferente comportamiento de los bordes, de manera que los del norte y este están caracterizados por la presencia de una falla con importante desplazamiento, mientras que los bordes sur y oeste se resuelven con escalonamiento de bloques (Rey Moral, 2003).

En cuanto a la estratigrafía, a grandes rasgos, la cuenca del Duero y subcuenca de Almazán presentan dos grandes unidades: el sustrato paleozoico-mesozoico, y el relleno terciario (Figura 4). No obstante, esta simplificación puede resultar excesiva, por lo que aquí distinguiremos un zócalo, formado por los materiales Paleozoico-Precámbricos del Macizo Ibérico, seguido de una cobertera de materiales Mesozoicos que comienzan con la serie Triásica la cual aparece de manera local adosado al margen suroccidental y en la cuenca de Almazán. A esta serie le siguen los depósitos carbonatados y margosos del

Jurásico, sobre los que se depositaron las primeras facies con amplia representación en toda la cuenca, estas son las series Cretácicas tanto en facies siliciclásticas (Fm. Utrillas), como carbonatadas de edad Cenomaniense-Senonense. Por encima se situaría, de manera homogénea en toda la cuenca, la facies de transición finicretácica - paleocena, denominada Facies Garumn. Finalmente y concordante con esta facies se produjo la sedimentación del gran paquete terciario, con depocentros de más de 2500 m de profundidad, que es lo que constituye el relleno de las actuales cuenca del Duero y subcuenca de Almazán. Este relleno presenta características netamente continentales, con materiales predominantemente siliciclásticos, así como carbonatados y yesíferos, depositados principalmente en las zonas centrales (Prado *et al.*, 2008 a; Ruiz y Lomba 2008 a).

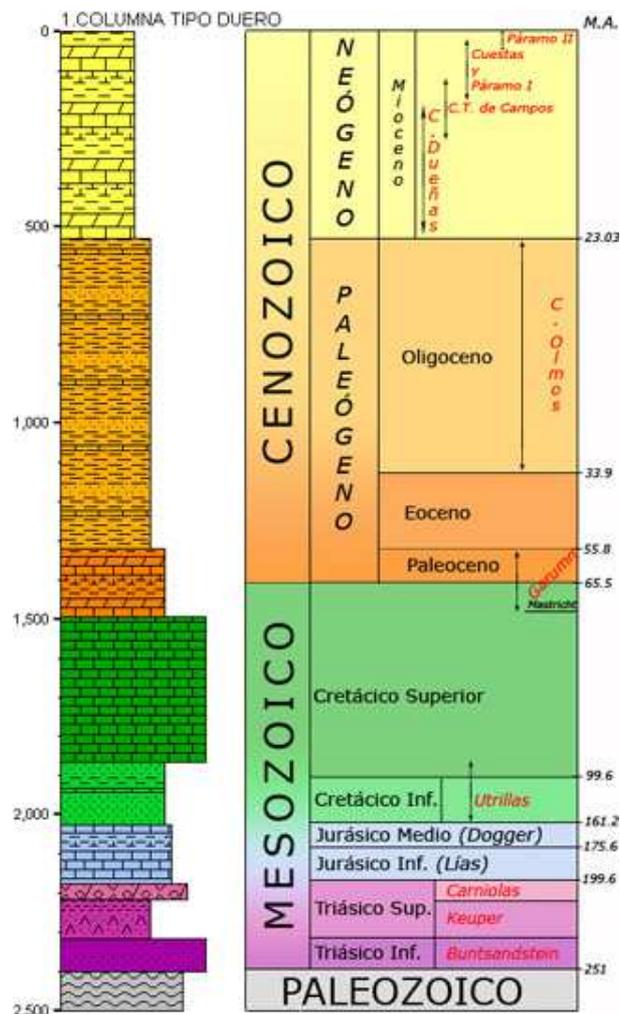


Figura 4. Serie sedimentaria completa de la cuenca del Duero (Prado *et al.*, 2008 a).

3. 2. La Cuenca del Ebro

La cuenca del Ebro se localiza en la parte nororiental de la Península Ibérica, constituye un área de forma aproximadamente triangular y está enmarcada por las cadenas montañosas alpinas: Costero Catalana, Cordillera Ibérica y Pirineos. Por su extremo



occidental se comunica con la cuenca del Duero a través del corredor de La Bureba, en la provincia de Burgos (Figura 3).

Constituye la cuenca de antepaís del orógeno pirenaico y la mayoría de sus características estructurales están relacionadas con su evolución tectónica (Arlegui y Simón, 1998). En la zona de contacto de la cuenca del Ebro con el borde sur del orógeno pirenaico está representado por una franja de pliegues y cabalgamientos con desplazamiento hacia el sur, que tienen como nivel de despegue dominante los materiales de la facies evaporítica del Tríasico medio y superior. (Seguret, 1972; Cámara, 1997; Cámara y Klimowitz, 1985; Klimowitz y Torrecusa, 1990)

La geometría del relleno sedimentario consiste 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, con los materiales más antiguos recubriendo el margen pirenaico y los más modernos hacia el margen ibérico (Riba *et al.*, 1983). La profundidad del sustrato pre-Terciario se incrementa hacia el norte, alcanzando valores de 4000 m bajo el nivel del mar en los Pirineos (Riba *et al.*, 1983)

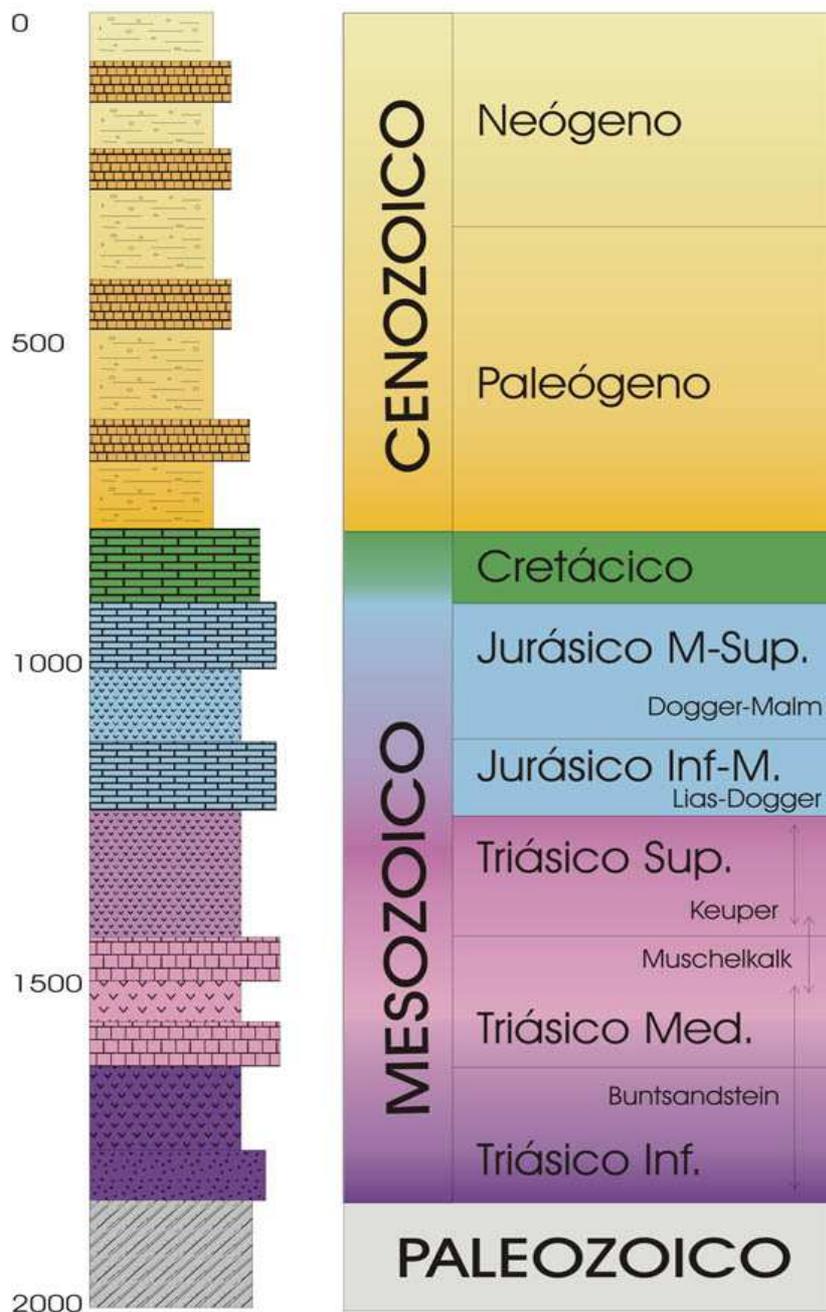


Figura 5. Serie sedimentaria completa para el sector central de la cuenca del Ebro.

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: 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.

Para el relleno terciario de la cuenca, se han definido ocho unidades tectosedimentarias a partir de los materiales autóctonos aflorantes (Pérez, 1989; Pérez et al., 1985; González, 1989; Muñoz, 1992 y 1993; Arenas, 1993; Villena et al., 1996 a y b; Angulo et



al., 2000, Luzón, 2001; Luzón y González, 2000; Luzón et al., 2002; Muñoz *et al.*, 2002). Las tres primeras unidades son paleógenas, la cuarta se sitúa en la transición Paleógeno-Neógeno y las cuatro restantes son miocenas y se encuentran separadas por rupturas sedimentarias.

La serie mesozoica que se dispone bajo los sedimentos terciarios está constituida, en términos genéricos, por una sucesión alternante de secuencias siliciclásticas y carbonatadas 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 como para constituir posibles almacenes (Figura 5). 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 carbonatados del Muschelkalk, Jurásico y Cretácico, que con una 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 en las cuencas sedimentarias analizadas, entre 0 y 10 fracturas /100 km² (CSN, 2006), unido a la baja actividad sísmica, hacen de ellas áreas en principio favorable para el AGP de CO₂.

4 - METODOLOGÍA

4.1 - Identificación y selección de formaciones favorables

La identificación y selección de potenciales formaciones geológicas para almacenar CO₂ se ha centrado exclusivamente en aquellas que son permeables y profundas, realizándose de acuerdo con criterios de idoneidad geológica, e ignorando otros de tipo socio-económicos (Ruiz et al., 2007 y 2008).

Se ha partido de la reinterpretación de la información obtenida de los sondeos de exploración de hidrocarburos realizados en las cuencas del Duero y Ebro, principalmente entre los años 60 y 80. Estas campañas de exploración generaron una importante documentación (Lanaja, 1987; ITGE, 1990), que se encuentra disponible en el Fondo Documental del Archivo de Hidrocarburos gestionado por el IGME. Con esta documentación se ha elaborado una síntesis de todos los sondeos de cada zona (Campos et al., 2008, Prado et al., 2008 a, Ruiz et al., 2008 a y Hurtado y Eguilior 2008), que finaliza con una columna estratigráfica general para cada área (Figuras 4 y 5) y que incluye también datos relativos a la litología, profundidad, potencia, porosidad y a la salinidad de las aguas.

Con el fin de disponer de una primera aproximación sobre la distribución en profundidad de los distintos niveles estratigráficos y sus cambios laterales de facies, se ha partido de las correlaciones estratigráficas entre sondeos profundos realizadas por las compañías de exploración de hidrocarburos (ITGE, 1990), añadiéndoles algunos sondeos que no se consideraron inicialmente.



En segundo lugar, se ha hecho uso de los mapas de isobatas disponibles, tanto de la formación almacén como de su sello correspondiente, obtenidos de la interpretación de perfiles sísmicos y de distintos sondeos. Asimismo, se ha trabajado con las interpretaciones sismoestratigráficas de algunas líneas sísmicas, así como con cortes estratigráficos que han ayudado a entender la estructura en profundidad de estas formaciones.

Todos estos datos de la geología del subsuelo se han integrado mediante *ArcGis* para la cuenca del Duero y Almazán y mediante *Surfer* para la cuenca del Ebro, a fin de obtener, en ambos casos, unos mapas de isobatas de las formaciones preseleccionadas. De esta manera se han obtenido modelos de distribución 2D de los intervalos estratigráficos identificados como favorables en los pasos anteriores, facilitándose así la aplicación posterior de criterios específicos para la identificación y delimitación de las áreas potencialmente favorables, así como para una estimación preliminar de las capacidades de almacenamiento de CO₂.

La representación en el SIG de la estructura en profundidad de las formaciones favorables se realizó partiendo de un Modelo Digital del Terreno de las cuencas del Duero y Almazán, con una resolución de 1km x 1km, y con datos procedentes del Proyecto GLOBE (Globe Land One-kilometer Base Elevation) del National Oceanic & Atmospheric Administration / National Geophysical Data Center (NOOA/NGDC) A este modelo topográfico se le asoció la síntesis geológica de los mapas a escala 1:50.000, la posición de los sondeos en la zona, así como la traza de gran parte de las líneas sísmicas que se llevaron a cabo durante la exploración de hidrocarburos en la cuenca (SIGEOF).

Sobre esta información se han aplicado los diferentes criterios geológicos recogidos en Ruiz et al., (2007 y 2008) Dichos criterios contemplan dos escalas de actuación, a escala de cuenca o regional, y a escala local o de formación.

A nivel regional se han aplicado: i) criterios *tectónicos y estructurales*, buscando zonas tectónicamente lo más estables posible; ii) criterios *estratigráficos*, buscando formaciones que, por sus condiciones litoestratigráficas, puedan ser consideradas para su estudio como potenciales almacenes geológicos, y iii) criterios *geotérmicos*, que van a influir sobre la profundidad de inyección, la capacidad de almacenamiento y el comportamiento del CO₂ en el medio (Ruiz et al., 2007 y 2008).

A nivel de formación, el primer criterio usado ha sido de tipo *litoestratigráfico*, buscándose formaciones almacén confinadas por otras impermeables capaces de evitar la liberación rápida del CO₂. Es decir, se ha tratado de identificar, a lo largo de la columna estratigráfica de los sondeos profundos de la zona, pares almacén/sello en los que: i) la roca almacén estuviera constituida por litologías preferiblemente siliciclásticas, aunque también se han contemplado las carbonatadas, y ii) la roca sello estuviera compuesta principalmente por arcillas y/o evaporitas, dadas su alta capacidad de sellado. En segundo lugar, se ha aplicado un criterio de tipo *petrofísico*, buscando formaciones almacén que presentaran, según los datos de sondeos, una porosidad efectiva superior al 10 %, así como una buena permeabilidad. Como tercer paso, se ha considerado la *potencia* de las formaciones almacén y sello, ya que, a mayor potencia, mayor capacidad de almacenamiento. De forma similar, para una misma capacidad de confinamiento del sello, una mayor potencia del mismo favorecerá la estanqueidad a largo plazo del CO₂.

En cuanto a la profundidad del techo de la formación almacén, se sabe que se deben superar los 31°C de temperatura y los 7,4 MPa de presión para garantizar el estado supercrítico del CO₂, ya que ello permitirá optimizar la capacidad de almacenar CO₂ y dificultar su escape (Holloway y Savage, 1993; Hendriks y Blok, 1993). Esto implica que, para un gradiente geotérmico en torno a 25°C/km y en condiciones de presión hidrostática, el techo de la formación almacén debe superar los 800 m de profundidad (Ruiz *et al.* 2008)

Por último, se ha elaborado un inventario de formaciones favorables para almacenar CO₂ en el subsuelo de las cuencas del Duero, Almazán y Ebro, con la descripción de las principales características de cada una de ellas (Figura 6), (apartado 5-a).

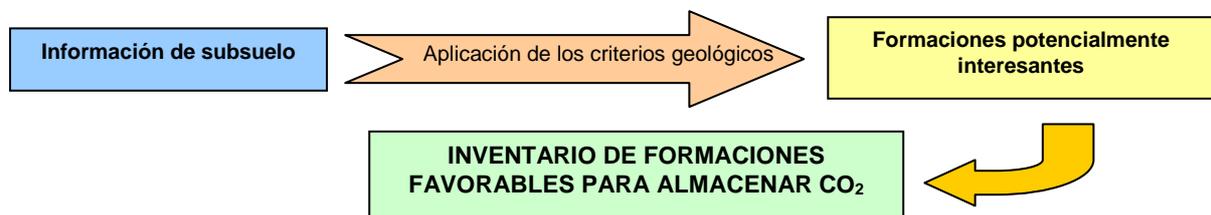


Figura 6. Esquema metodológico para la selección de las formaciones favorables.

4.2 - Estimación de la capacidad de almacenamiento

Con el propósito de disponer de una estimación cuantitativa de la capacidad de almacenamiento de cada una de las formaciones almacén preseleccionadas, ésta se ha realizado en tres etapas sucesivas. En la primera se han realizado estimaciones a *escala de cuenca*, cubicando la capacidad de almacenamiento de las formaciones seleccionadas en la cuenca del Duero. Posteriormente, en la cuenca del Ebro, se restringió el área de los almacenes seleccionados a las profundidades más idóneas para el almacenamiento, lo que llevó a un cálculo más local y, finalmente, se realizó una estimación a *escala de formación* en la cuenca de Almazán, eligiendo específicamente una estructura favorable en la Fm. Utrillas, que había sido objeto de investigaciones previas durante la etapa de prospección de hidrocarburos, ya que se trataba de una posible trampa estructural y de la que se disponía de una información más detallada. De esta manera, se ha desarrollado una metodología que abarca varios niveles de actuación, tanto a nivel de cuenca, como a nivel de estructuras más concretas. Los resultados así obtenidos pueden orientar sobre la viabilidad práctica de la opción de almacenar CO₂ en formaciones geológicas en las cuencas estudiadas.

Para comenzar, se ha realizado una estimación de la capacidad de almacenamiento teórico a nivel regional en las formaciones preseleccionadas en la cuenca del Duero. Mediante los datos disponibles del Fondo Documental del Archivo de Hidrocarburos del IGME se han elaborado unas estructuras numérica de datos que representan cómo varía la cota del techo de las formaciones preseleccionadas (Modelo Digital de elevaciones o MDE) (Figuras 7 y 8).

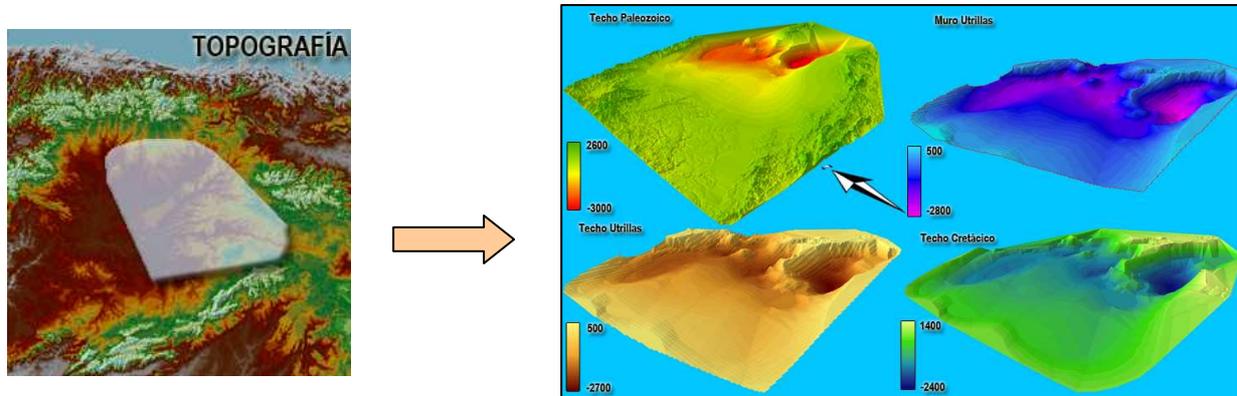


FIGURA 7. MDE del Techo Paleozoico; del muro de la Fm. Utrillas; del Techo de la Fm. Utrillas y del techo del Cretácico (Prado et al., 2008 a y b)

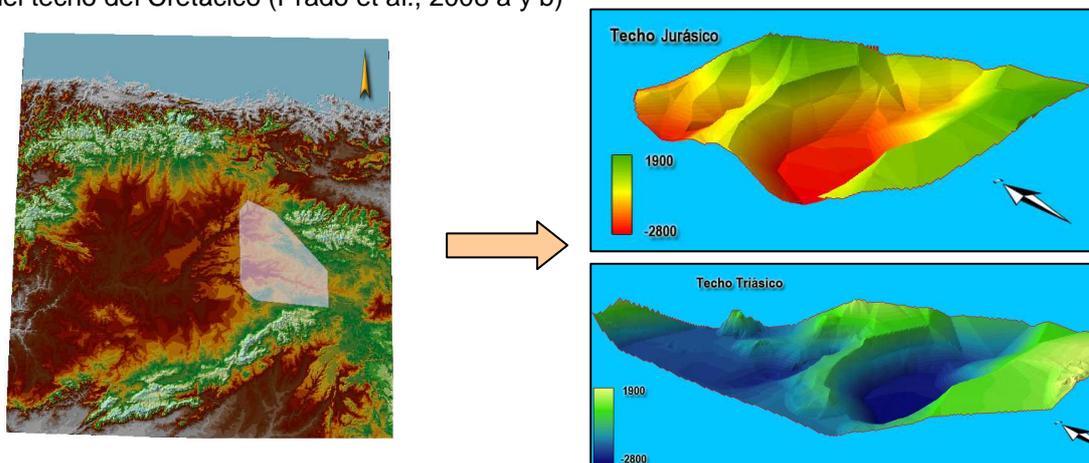


FIGURA 8. MDE del techo Jurásico y del techo Triásico (Prado et al., 2008 a y b).

El interés principal de dichos MDE estriba en la posibilidad que ofrecen a la hora de representar, visualizar y analizar los datos del subsuelo. En este caso, estos modelos han permitido estudiar el subsuelo de la cuenca del Duero, posibilitando la visualización directa de diversas características del mismo. En cuanto a las posibilidades analíticas que nos ofrecen estos modelos, hay que destacar la capacidad de cálculo. Así, en este trabajo, se ha podido cuantificar el volumen de roca (V_R) comprendido entre cada MDE elaborado, pudiendo calcular, de este modo, la capacidad de almacenamiento de cada una de las formaciones sedimentarias delimitadas por dos de estas superficies. Esta estimación del volumen de roca (V_R) disponible para el almacenamiento de CO_2 , en cada uno de los niveles almacén seleccionados en cada cuenca es un paso imprescindible para calcular la capacidad real ($Q_{(A)}$) de almacenamiento de una formación determinada.

Para realizar dicha 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 (ϕ) de un 15 %, para los almacenes siliciclásticos (los datos existentes en los sondeos eran sensiblemente superiores), y un 5 %, para los carbonatados, porosidad mínima admisible para considerar una formación como almacén. En cuanto a la eficiencia de



almacenamiento (h_{st}) de CO_2 , hay que mencionar que ésta depende del tipo de roca, del fluido y del tipo de almacén y de la estructura del mismo (Bradshaw et al., 2007). Así, los resultados finales del proyecto JOULE II, en el que se comparan escenarios de inyección muy variados en medios porosos, permitieron concluir que no puede considerarse como capacidad de almacenamiento el volumen total de poros del almacén, sino que la eficiencia del almacenamiento es mucho menor, y dependiendo del tipo de estructura puede ser el 2 % del volumen total de poros, para almacenes confinados; el 6 %, en almacenes fracturados y almacenes con capa sellante superior horizontal muy extensa; o variable entre el 2 y el 17 %, en capas con buzamiento mediano que presentan una zona de rebosamiento inferior o “spill point”. Sin embargo, en el caso de almacenes con una hidrodinámica muy grande, la capacidad puede considerarse casi ilimitada. Por ello, y en vista de las condiciones especiales de cada cuenca, se considera correcto asumir un valor del 4 % para la cuenca del Duero y un 10 % para la cuenca del Ebro. Asimismo, se ha incluido en el cálculo la densidad del CO_2 en estado supercrítico ($\rho_{CO_2} = 700 \text{ kg m}^{-3}$), supuesta para un gradiente geotérmico de 25°C/km y una temperatura superficial de 15°C (Bachu y Carroll, 2004).

Estas fases de trabajo han permitido obtener unos resultados que pueden orientar sobre la viabilidad de almacenar CO_2 en formaciones geológicas profundas en las cuencas estudiadas.

5 - RESULTADOS

5.1 - Formaciones favorables para el almacenamiento de CO_2

5.1.1 Cuenca del Duero

En la cuenca del Duero se han preseleccionado los siguientes almacenes (Figura 9):

A₁ :Las areniscas del *Buntsandstein*.

A₂ :La formación *Utrillas* (Albiense inferior-medio).

A₃ :El *Cretácico superior carbonatado* (*Cenomaniense-Senonense*).

Almacén A₁ – Formado por los materiales del **Buntsandstein**, que aparecen como una facies detrítica roja, formada por una base conglomerática bastante compacta y una alternancia de areniscas y arcillas a techo. Esta formación ha sido atravesada por seis sondeos a profundidades entre 1.255 m (San Pedro-1), y 3.270 m (Rojas). La potencia de varía entre los 51 m que aparecen en el sondeo Burgo de Osma y los 455 m de Gormaz, presentando, en algunos tramos, niveles arcillosos, lo que puede reducir la porosidad media de la formación, la cual varía entre 6 y 26% en el sondeo de El Gredal. El sello de esta formación lo constituyen los materiales margosos y evaporíticos del Keuper, que tienen una potencia muy variable, entre 118 y 1.431 m. Para este almacén no se disponen de datos acerca de la salinidad de las aguas.

Almacén A₂ - Constituido por la **Facies Utrillas** de edad Albiense inferior. Esta formación es realmente la primera serie mesozoica que tiene una amplia representación en la cuenca, ocupando, a diferencia del Triásico y el Jurásico, casi todo el subsuelo de la cuenca. Son depósitos constituidos fundamentalmente por materiales detríticos de origen fluvial, alternando con arcillas y, ocasionalmente, lignitos. En cuanto a su geometría, los mayores espesores se encuentran adosados a los márgenes que eran tectónicamente



activos durante el depósito de la serie, observándose un acuñamiento hacia el margen occidental. En la subcuenca de Almazán, la formación presenta, junto al Cretácico superior carbonatado, una estructura en sinclinorio fosilizada por sedimentos cenozoicos. Esta formación aflora en el borde de la cuenca, y alcanza una profundidad de 2.632 m en el sondeo Villameriel. De los sondeos estudiados, catorce la atraviesan a una profundidad mayor de 800 m, concretamente entre 866 m (Quintana Redonda) y 2.632 m (Villameriel). Su potencia varía entre 55 m y 496 m (La Cuenca). Los valores de la salinidad del agua intraformacional, tomados en los sondeos San Pedro 1 y 2, son altos, ascendiendo a 50.000 ppm y 41.250 ppm de NaCl equivalente, respectivamente. Sin embargo, los sondeos Peña e Iglesias han atravesado aguas con baja salinidad (< 3.000ppm , valor muy inferior al mínimo aceptable como criterio de selección). Como materiales sello hay que destacar los niveles de arcillas del Cenomanense que aparecen en algunos sondeos. En general, la formación Utrillas presenta buenas condiciones hidráulicas y alta porosidad.

Almacén A₃– Formado por los materiales carbonatados del **Cretácico superior**, que en la cuenca del Duero comprende el Senonense y el Cenomaniense. El Senonense está compuesto principalmente por calizas dolomíticas, margas y, en menor medida, arenas; mientras que el Cenomanense lo está por calizas, margas y, a veces, intercalaciones de arenas y arcillas hacia la base. Como se puede comprobar, son depósitos fundamentalmente carbonatados, por lo que será la porosidad secundaria, debida a procesos de disolución y fracturación, la responsable de que estos materiales puedan tener una capacidad suficiente de almacenamiento. Aparece en todos los sondeos analizados de las cuencas del Duero y de Almazán, a una profundidad que varía desde la superficie, en algunos sondeos realizados en el borde de la cuenca, hasta los 2232 m de profundidad, en el punto donde se realizó el sondeo Villameriel. La potencia de esta formación es considerable, variando entre 17 m (Hontomín-2) hasta los 565 m encontrados en el sondeo Aldehuela (C. Almazán). Esta variación de espesores es debida al comportamiento geotectónico de los bordes de la cuenca, el cual produjo una subsidencia diferencial, lo que provoca que los mayores espesores del paquete Cretácico (tanto superior como inferior) se depositaran adosados a los márgenes norte y este, acuñándose progresivamente hasta desaparecer en las proximidades del borde occidental. Desafortunadamente, los datos de los sondeos estudiados incluyen solamente valores cualitativos de la porosidad de dicha formación, siendo recomendable estudiar la posible porosidad secundaria por disolución de los materiales carbonatados predominantes de esta formación. En tres sondeos, la salinidad del agua intraformacional indica que ésta es ligeramente salina con <15.000 ppm de NaCl, mientras que en los sondeos San Pedro 1 y 2 el agua intraformacional del Cretácico superior es muy salina, con concentraciones de NaCl comprendidas entre 18.000 y 60.000 ppm. El sello de esta formación almacén está constituido por materiales del Terciario y de las facies del Garumn, con potencias comprendidas entre 309 m y 2.232 m, de los que entre 20 m y 307 m corresponden al Garumn. Estos depósitos, en general, son de composición muy variable, generalmente de naturaleza siliciclástica.

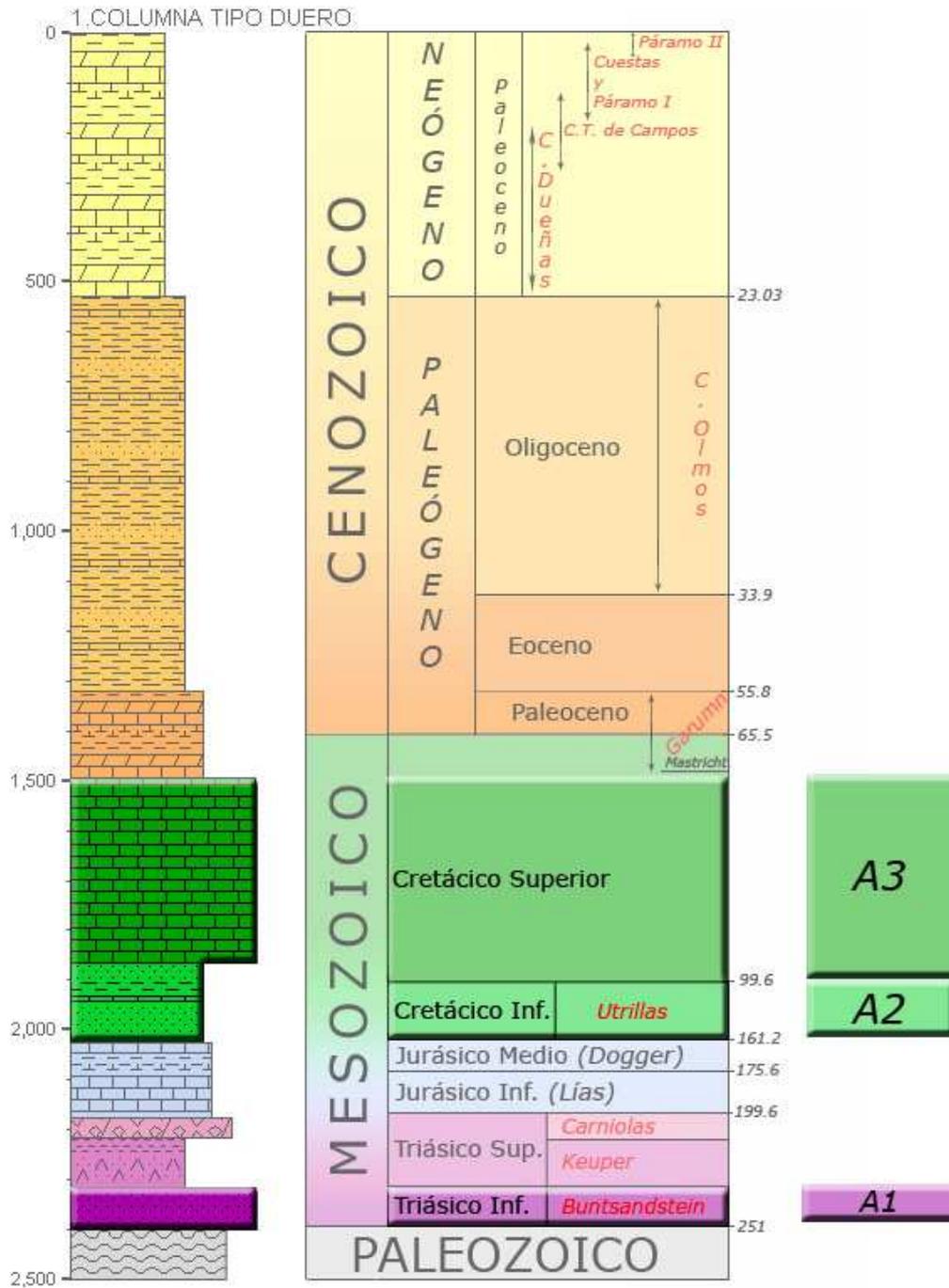


Figura 9. Columna estratigráfica sintética de la cuenca del Duero, en la que se delimitan las posibles formaciones almacén y sello. El espesor de las diferentes formaciones corresponde al valor medio de los espesores atravesados por los sondeos analizados.

5. 1. 2. La cuenca del Ebro

A partir de los datos del subsuelo aportados por los sondeos analizados y aplicando los criterios de idoneidad relativos a las características de las formaciones almacén y sello podemos descartar para el almacenamiento los materiales del Terciario y los del Paleozoico ya que 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.

Debido a ello y dado que las diferentes formaciones almacén se situarán en la serie mesozoica lo que se realizó en primer lugar fue delimitar la base del Terciario y el techo del Paleozoico (Figura 10).

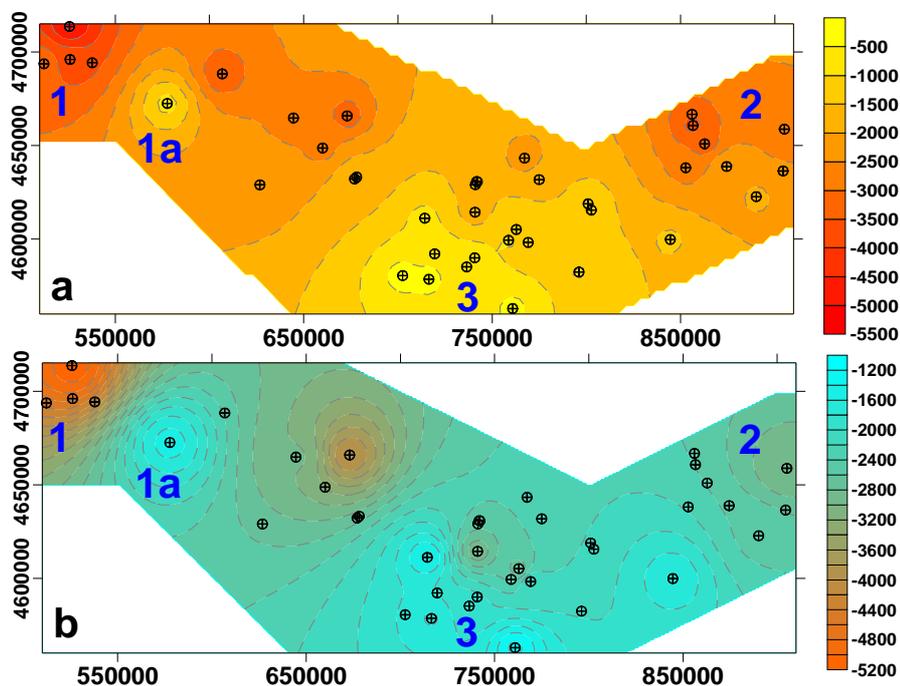


FIGURA 10. Mapas de isobatas de la base del Terciario (a) y del techo del Paleozoico (b). Sector Occidental (1); Sector Oriental (2); Sector Central (3).

De la observación de esta figura 10, y teniendo en cuenta que las profundidades de almacenamiento óptimas se sitúan por debajo de los 800 m, se deduce que en el Sector Occidental (1 en Figura 10) 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 los materiales terciarios, determinada por la existencia de indicios en el Oligoceno basal, que nos indica la falta de estanqueidad de estos materiales como sello de los almacenes que se situarían por debajo.

En la zona este del Sector Occidental se ha analizado un único sondeo (1a en Figura 10) con un recubrimiento terciario anómalamente poco potente, por lo que determinadas formaciones mesozoicas podrían situarse a una profundidad adecuada para constituir



almacenes. La continuidad lateral de éstas en torno a este sondeo estarán condicionadas, probablemente, por una estructuración materializada mediante fallas no detectadas en superficie.

El sector oriental de la cuenca del Ebro (2 en la Figura 10) es un sector poco favorable para albergar un almacenamiento geológico de CO₂ ya que presenta también un gran espesor de sedimentos terciarios (hasta 3000-3500 m). Además, presenta una importante complejidad estructural, y las formaciones mesozoicas muestran grandes variaciones en el espesor y escasa continuidad lateral.

El sur del sector central (3 en la Figura 10) 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 (Figura 11):

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

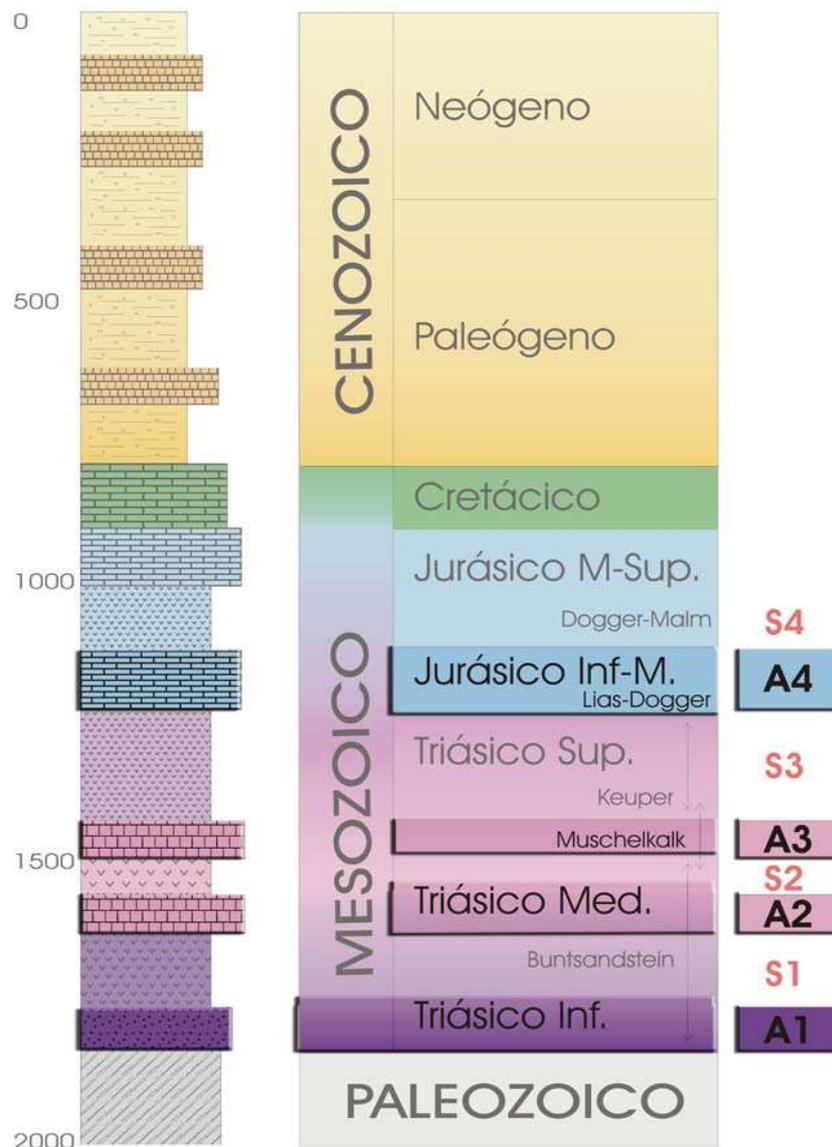


Figura 11. Columna estratigráfica parcial para la zona sur del sector central de la cuenca del Ebro, en la que se delimitan las posibles formaciones almacén y sello. El espesor de las diferentes formaciones corresponde al valor medio obtenido a partir de los espesores atravesados por los sondeos analizados.

Como posibles sellos se han definido las siguientes formaciones (Figura 11):

- 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.

El **almacén A₁** formado por conglomerados y areniscas en facies continentales, rojizas, del Buntsandstein y presenta una potencia media de 126 m, con variaciones entre 161 m en el sondeo Fraga a 17 m en el sondeo Lopín-1. Estos niveles se cortan a



profundidades comprendidas entre 1100 y 1900 m en los sondeos analizados y se presenta como un nivel de almacenamiento muy prometedor, no solo por la litología, profundidad y extensión, sino también por su estanqueidad, ya que presenta cuatro posibles sellos que lo aislarían de la superficie: **S₁** con una potencia media de 213 m, **S₂** con una potencia media de 223 m, **S₃** con una potencia media de 336 m y **S₄** con una potencia media de 367 m (potencias medias obtenidas como las medias de las potencias cortadas por los sondeos).

El Almacén **A₂**, litológicamente corresponde a las dolomías y calizas dolomíticas de la base del Muschelkalk, presentan procesos paleokarsticos y una fuerte dolomitización. Estos niveles calcáreos presentan una potencia media de 78 m; con máximos y mínimos de 102 m en el sondeo Fraga y 30 m en el sondeo Senant-1, y a una profundidad media de 1200-1600 m. Es un nivel almacén con alta fiabilidad por la presencia de tres sellos posibles (**S₂**, **S₃** y **S₄**) que lo aislaran de la superficie.

El Almacén **A₃** lo constituyen las calizas dolomíticas y dolomías del techo del Muschelkalk, presenta una extensión considerable y una potencia media de 126 m, con valores máximos de 296 m en el sondeo Ebro-2 y mínimos de 84 m en el sondeo Senant-1. Se corta en los sondeos analizados entre las profundidades de 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, presente en todos los sondeos analizados, se sitúan inmediatamente por encima con una potencia media de 336 m y pueden sobrepasar los 750 m, como por ejemplo en el sondeo Ebro-2. Uno de los problemas que puede plantear la inyección en este nivel de almacenamiento **A₃**, y que se deberá estudiar detenidamente, es la posible conexión con otros sondeos próximos, en donde **A₃** aparece a muy poca profundidad, por ejemplo entre 277 y 364 m en el sondeo Caspe-1. En este caso, el CO₂ inyectado en el almacén **A₃** a una profundidad adecuada podría migrar a través de la formación, si no existiera algún impedimento, hacia profundidades menores.

El Almacén **A₄** en las dolomías vacuolares de la Formación Imón, de edad Retiense, situada estratigráficamente sobre el Keuper, presenta menor espesor, 68 m de potencia media, con máximas potencias en el sondeo Ebro-2 (73 m) y mínimas en el sondeo Bujaraloz-1 con 25 m de potencia. Se corta en los sondeos analizados a profundidades comprendidas entre los 1030 y 2050 m. Como nivel almacén posee un único sello de 367 m de potencia media aunque no está presente en todos los sondeos analizados. Es un buen nivel almacén, siempre teniendo en cuenta que puede presentar conexiones laterales con zonas desprovistas de cobertera-sello y por tanto con zonas de riesgo de escape tras una migración del CO₂.

5.2 - Capacidades de almacenamiento.

El primer paso por tanto ha consistido en el cálculo del volumen de roca V_R para cada formación almacén:



5.2.1 Cuenca del Duero:

Se ha calculado el Volumen de Roca para los almacenes A_2 (Fm. Utrillas) y A_3 (Cretácico superior), gracias a las posibilidades de cálculo que nos ofrecen los MDE elaborados para el techo y muro de cada formación (ver figuras 7 y 8)

$$\begin{aligned}V_R (A_2) &= 3.273,26 \text{ km}^3 \\V_R (A_3) &= 8.683,22 \text{ km}^3\end{aligned}$$

Según la expresión:

$$[1] \quad Q = V \cdot \rho_{CO_2} \cdot \phi \cdot h_{st}$$

Dónde:

Q es la capacidad de almacenamiento en kg

V es el volumen del almacenamiento en m^3

ϕ es la porosidad efectiva

ρ_{CO_2} es la densidad del CO_2 puro en condiciones de almacenamiento en kg/m^3

h_{st} es la eficiencia regional de almacenamiento

Las capacidades estimadas para los dos almacenes son:

$$\begin{aligned}Q_{(Utrillas)} &= 3,27 \cdot 10^{12} \text{ m}^3 \times 0,15 \times 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,04 \approx 1,374 \cdot 10^{13} \text{ kg} = \mathbf{13.740 \text{ Mt}} \\Q_{(Cretácico \text{ Sup.})} &= 8,68 \cdot 10^{12} \text{ m}^3 \times 0,05 \times 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,04 \approx 1,215 \cdot 10^{13} \text{ kg} = \mathbf{12.150 \text{ Mt}}\end{aligned}$$

5.2.2 Cuenca del Ebro:

El segundo nivel de actuación, como se ha comentado, se ha llevado a cabo en la cuenca del Ebro, en la que la cubicación se ha restringido, en cuanto a superficie, a los entornos próximos de los sondeos, para no sobreestimar la extensión lateral. En cuanto a la profundidad, se ha considerado la óptima para el almacenamiento, entre 800 y 1700 m.

Integrando entre el techo y muro de las formaciones almacén se han calculado los volúmenes de roca total para cada formación.

Se ha calculado el volumen de roca para: A_1 (areniscas y conglomerados del Buntsandstein); A_2 (dolomías de la base del Muschelkalk), A_3 (dolomías del techo del Muschelkalk) y A_4 (calizas retienses (Fm. Imón)):

$$\begin{aligned}V_R (A_1) &= 116,57 \text{ km}^3 \\V_R (A_2) &= 103,35 \text{ km}^3 \\V_R (A_3) &= 164,59 \text{ km}^3 \\V_R (A_4) &= 64,00 \text{ km}^3\end{aligned}$$

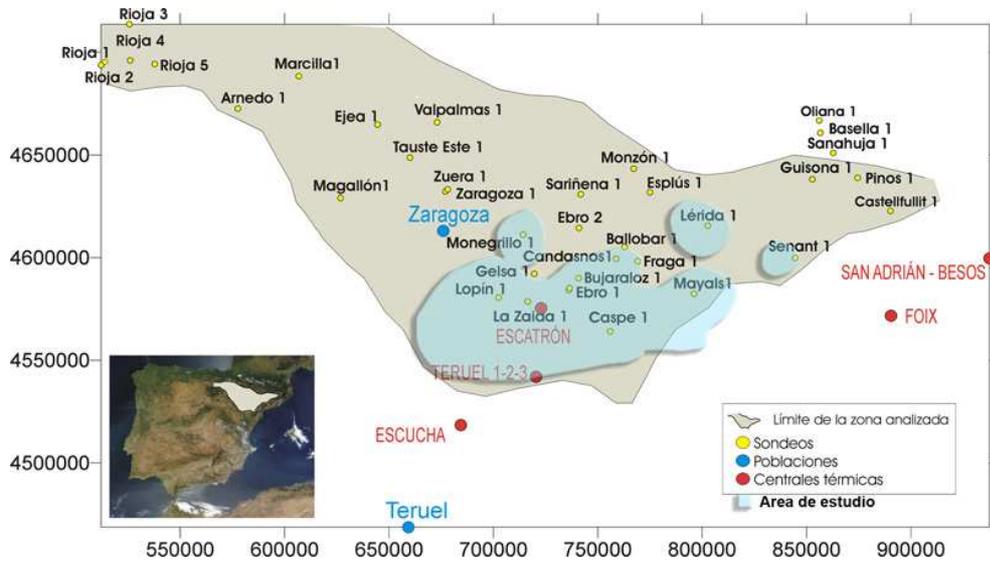


Figura 12 – Límites de la cuenca del Ebro con la posición de los sondeos analizados y áreas de especial interés para el cálculo de la capacidad de almacenamiento (en azul).

Una vez calculado el volumen de cada formación, se ha estimado la capacidad teórica de almacenamiento:

$$Q_{(Buntsandstein)} = 1,16 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 \times 0,15 \times 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,04 \approx 4,89 \cdot 10^{11} \text{ kg} = \mathbf{489 \text{ Mt}}$$

$$Q_{(Musch1)} = 1,03 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 \times 0,05 \times 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,04 \approx 1,45 \cdot 10^{11} \text{ kg} = \mathbf{145 \text{ Mt}}$$

$$Q_{(Musch2)} = 1,64 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 \times 0,05 \times 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,04 \approx 2,30 \cdot 10^{11} \text{ kg} = \mathbf{230 \text{ Mt}}$$

$$Q_{(Retiense)} = 6,4 \cdot 10^{10} \text{ m}^3 \times 0,05 \times 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,04 \approx 0,89 \cdot 10^{11} \text{ kg} = \mathbf{89 \text{ Mt}}$$

5.2.3 Cuenca de Almazán:

Finalmente, en la cuenca de Almazán, se trabajó a una escala más detallada y se eligió específicamente una estructura que había sido objeto de investigaciones previas, ya que se trataba de una posible trampa estructural de la que además se disponía de información detallada (Figura 13) (Ruiz y Lomba 2008 a y b).

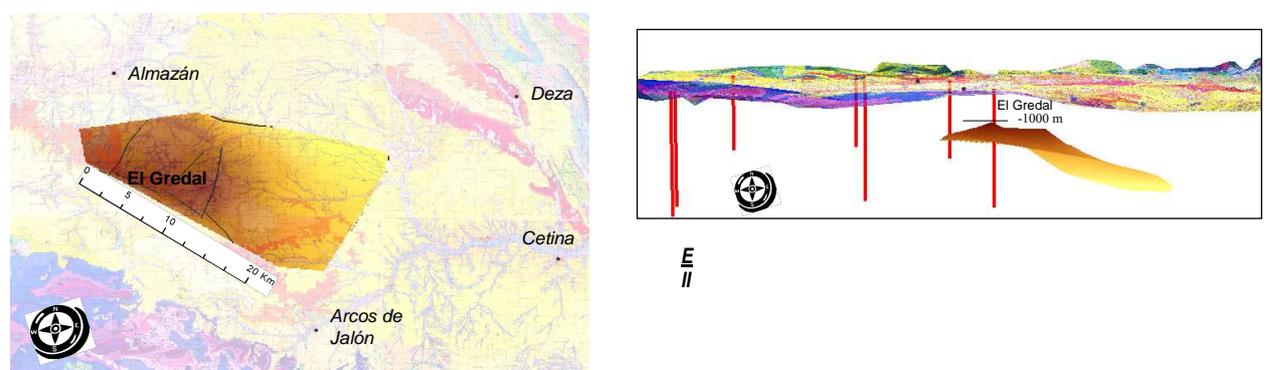


Figura 13. Localización y vista en planta y en perfil de la estructura de El Gredal.



Esta estructura, situada al SE de Almazán y que abarca unos 50 km², se alarga en sentido NO-SE y se eleva suavemente en dirección SO. En dirección S está interrumpida por una gran falla de desgarre de dirección ONO-ESE, que a la vez que produce un desplazamiento horizontal, hunde la estructura hacia el norte, proporcionando un cierre de la misma hacia el sur (Shell, 1982). El cierre noreste se produce contra una falla inversa.

La estructura está atravesada por el sondeo El Gredal, en el que el techo de la Fm Utrillas se alcanza a 1.000 m de profundidad (Figura 13). En dicho sondeo, la formación almacén presenta una potencia de 129 m, un sello basal constituido por 128 m de materiales del Keuper, a favor de los cuales se ha producido el despegue de los estratos, favoreciendo el desarrollo de dicha estructura. Por encima, aparecen unas margas, calizas y dolomías del Cretácico superior, que podrían actuar como sello superior, asociado a 775 m de cobertera terciaria. El cierre estructural es de unos 250 m a nivel del techo de la Fm Utrillas y 75 m a nivel del muro de la Facies Keuper. La estructura presenta algunas fallas de escala kilométrica que podrían estar afectando al almacén y al sello inferior (Ruiz y Lomba 2008 a).

Para calcular la capacidad de almacenamiento de CO₂ de la estructura se procedió de manera análoga a los casos anteriores.

El volumen total de roca almacén dentro de la estructura se obtuvo mediante el SIG, considerando una potencia total de 130 m y un cierre estructural de 250 m. Se consideró una porosidad efectiva del 15 %, inferior a la media determinada en el sondeo El Gredal, que fue del 28 %. Se supuso una densidad uniforme del CO₂ de 700 kg/m³ y un rango de eficiencia de almacenamiento entre el 2 y el 17 %.

$$V_{R(A1)} = 4,6 \text{ km}^3$$

Los resultados de capacidad, estimados en función de la eficiencia de almacenamiento considerada (2% y 17%), fueron los siguientes:

$$Q_{(2\%)} = 4,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \times 0,15 \times 700 \text{ kg m}^{-3} \times 0,02 \approx 9,66 \cdot 10^9 \text{ kg} = \mathbf{9,66 \text{ Mt}}$$
$$Q_{(17\%)} = 4,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \times 0,15 \times 700 \text{ kg m}^{-3} \times 0,17 \approx 82,1 \cdot 10^9 \text{ kg} = \mathbf{82,1 \text{ Mt}}$$

6 - CONCLUSIONES

Se ha elaborado un inventario de las formaciones que, por sus condiciones, estratigráficas, tectónico estructurales y petrofísicas, han sido consideradas como favorables para almacenar CO₂.

Hay que destacar que a escala de almacenamiento, las cuencas terciarias analizadas ofrecen amplias posibilidades en los términos litológicos siliciclásticos o carbonatados de la serie mesozoica, situada bajo los rellenos terciarios. Por una parte, las formaciones siliciclásticas presentes ofrecen la posibilidad de constituir un almacén en una roca con porosidad primaria considerable y una serie de minerales reactivos que pueden favorecer el atrapamiento mineral, y por otra, las formaciones carbonatadas, más abundantes en la serie mesozoica (Muschelkalk, Jurásico y Cretácico), ofrecen la posibilidad de almacenar en una roca con una porosidad principalmente secundaria, en la que se favorecerán los procesos de disolución del CO₂, dándose un atrapamiento iónico. Además, dentro de la



serie mesozoica, se presentan potentes tramos de rocas evaporíticas y arcillosas en el Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper y Jurásico, que pueden actuar como sellos suprayacentes a las rocas almacén. En ninguna de las cuencas estudiadas se han podido identificar unidades litológicas concretas y continuas en el Terciario, por lo que no se han considerado estos materiales para albergar CO₂. Sin embargo, sí podría servir como recubrimiento de un posible conjunto almacén-sello en niveles subyacentes, reforzando así las garantías de seguridad.

En la cuenca del Duero y subcuenca de Almazán, las formaciones seleccionadas como más favorables para almacenar CO₂ son tres:

- ALMACÉN 1 (**A₁**): Facies Buntsandstein, con los materiales margosos y salinos del Keuper como material sellante.
- ALMACÉN 2 (**A₂**): Formación Utrillas, con las arcillas de la base del Cenomanense como materiales confinantes.
- ALMACÉN 3 (**A₃**): Cretácico superior carbonatado, con los materiales terciarios como sello.

En la cuenca del Ebro, debido al gran espesor del relleno terciario, se descartan 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 se han seleccionado cuatro formaciones que pueden constituir niveles de almacenamiento:

- ALMACÉN 1 (**A₁**): Areniscas, conglomerados y microconglomerados del Buntsandstein, con los niveles arcillosos y evaporíticos del mismo Buntsandstein como sello.
- ALMACÉN 2 (**A₂**): Dolomías de la base del Muschelkalk, donde las sales y anhidritas, con niveles arcillosos, del Muschelkalk actuarían como materiales sello.
- ALMACÉN 3 (**A₃**): Dolomías del techo del Muschelkalk. Aquí, serían los materiales evaporíticos y arcillosos los que harían la labor de sello.
- ALMACÉN 4 (**A₄**): Calizas Retienses (Fm. Imón), con las anhidritas, calizas y dolomías del Jurásico inferior-Retiense como sello



Tabla 1: Resumen de las estimaciones de la capacidad de almacenamiento de CO₂ para las formaciones seleccionadas en las cuencas del Duero, Almazán y Ebro respectivamente.

| Cuenca | Tipo de estimación | Formación Almacén | | Capacidad (Mt de CO ₂) |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------|---|------------------------------------|
| Duero: (Ver Figura 14) | Regional | A2 | Fm. Utrillas | 13.740 |
| | Regional | A3 | Cretácico superior Carbonatado | 12.150 |
| Almazán (Ver Figura 14) | Local (estructura anticlinal) | A1 | Fm. Utrillas | $h_{st} = 2\%$ 9 |
| | | | | $h_{st} = 17\%$ 82 |
| Ebro (Ver Figura 14) | Regional - Local | A1 | Areniscas y conglomerados del Buntsandstein | 489 |
| | | A2 | Dolomías de la base del Muschelkalk | 145 |
| | | A3 | Dolomías del techo del Muschelkalk | 230 |
| | | A4 | Calizas Retienses | 89 |

El cálculo de la capacidad teórica de almacenamiento de CO₂, para cada uno de estos almacenes se ha realizado mediante la expresión $Q = V \cdot \rho_{CO_2} \cdot \phi \cdot h_e$ donde (**Q**) es la capacidad de almacenamiento en kg, (**V**) es el volumen del almacenamiento en m³, (**φ**) es la porosidad efectiva, (**ρCO₂**) es la densidad del CO₂ puro en condiciones de almacenamiento kg/m³ y (**h_{st}**) es la eficiencia regional de almacenamiento. Se han obtenido los valores reflejados en la Tabla 1 y en la figura 14 para cada uno de los almacenes preseleccionados.

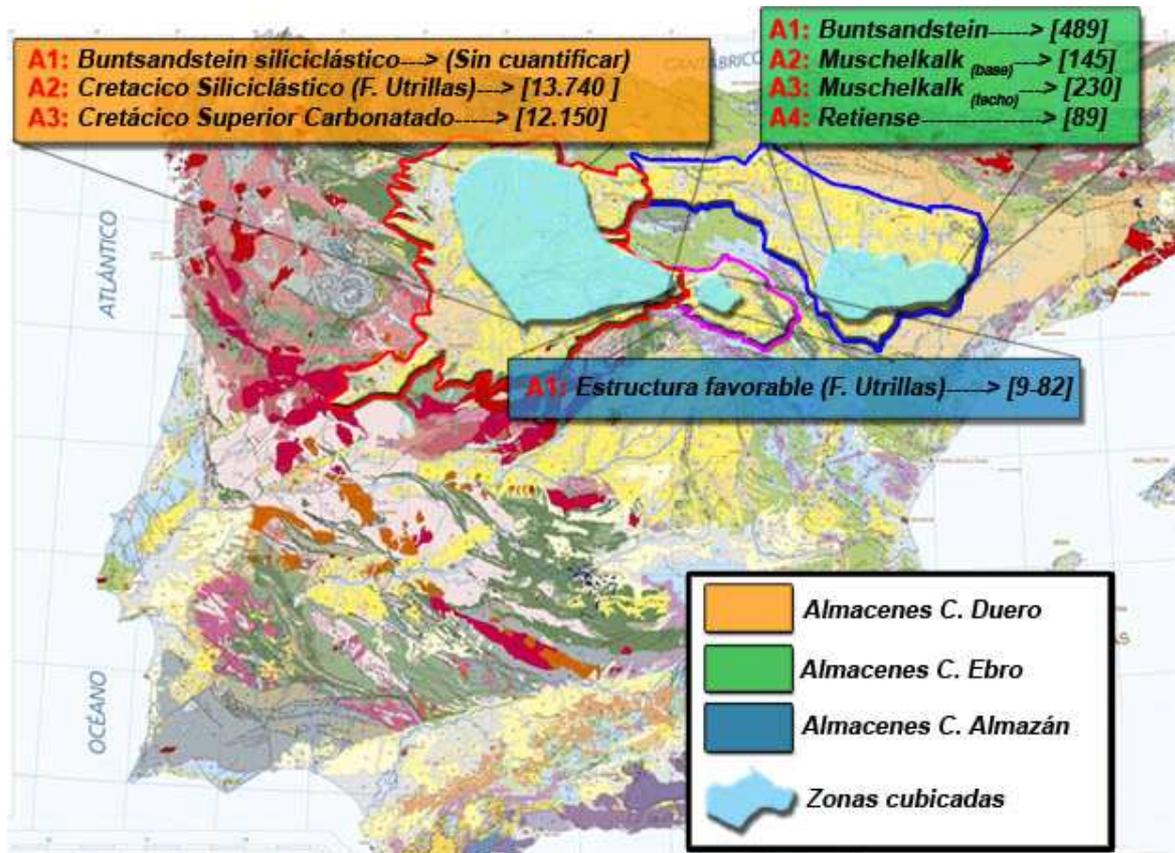


Figura 14. Mapa resumen con las estimaciones de capacidad de almacenamiento en megatoneladas de CO₂ para cada una de las zonas estudiadas.

Para hacerse una idea de lo que significan estos cálculos de capacidad, los valores se han normalizado respecto a unos valores conocidos, por una parte, la producción actual española de CO₂ emitida por las centrales térmicas que es 148 Mt/año para las estimaciones de capacidad de carácter regional (Duero), y por otra parte, las emisiones anuales de la central térmica de Compostilla en la provincia de León que son 10.9 Mt/año, para las estimaciones de capacidad realizadas a nivel local (Ebro y Almazán).

Tabla 2.- Equivalencias entre las capacidades calculadas y los años de producción de CO₂, respecto a la producción anual española para la cuenca del Duero (148 Mt de CO₂/año) y a la producción de la Central Térmica de Compostilla en León para las cuencas del Ebro y Almazán (10.9 Mt de CO₂/año) – www.carma.org

| C. Duero | | C. Ebro | | | | C. Almazán | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|------------------|---------------|
| Q (Cret.Sup.) | Q (Utrillas) | Q (Buntsands.) | Q (Musch1) | Q (Musch2) | Q (Retiense) | Q (2%) | Q (17%) |
| 12150 Mt | 13740 Mt | 489 Mt | 145 Mt | 230 Mt | 89 Mt | 9.66 Mt | 82.1 Mt |
| 82 años | 93 años | 45 años | 13 años | 21 años | 8 años | <1 año | 7 años |

Teniendo en cuenta estos valores de referencia, la cuenca del Duero podría, según las estimaciones realizadas, almacenar en el Cretácico superior el equivalente a 82 años de producción anual de CO₂ en todo el territorio español, y el equivalente a 93 años de producción en la Formación Utrillas. Por otra parte la cuenca del Ebro tendría capacidad,



a nivel local, de almacenar 45, 13, 21 y 8 años de la producción anual de la Central Térmica de Compostilla en los almacenes A1, A2, A3 y A4 respectivamente. Por último una única estructura analizada en la cuenca de Almazán tendría la capacidad de almacenar desde menos de 1 año a 7 años de la producción de la Central de Compostilla según la eficiencia del almacenamiento que se considere (2%-17%).

Finalmente es importante destacar que los valores de capacidad obtenidos, son aproximaciones teóricas que llevan asociadas una serie de incertidumbres directamente proporcionales a la escasez de datos existentes del subsuelo, por tanto deberán ser convenientemente ajustados, mediante una valoración detallada de la porosidad efectiva (ϕ), de la eficiencia del almacenamiento (h_{st}), que puede alejarse del valor teórico según el tipo de almacenamiento y estructura, y mediante una modelización de la geometría del almacenamiento, la cual influye directamente sobre el volumen total de roca disponible para el almacenamiento (V_R).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en la Unidad de Integración de Sistemas del Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT, en el marco del Proyecto Singular Estratégico PS-120000-2005-2 y dentro del subproyecto nº 3 "AGP de CO₂". Agradecer a los miembros del grupo de Almacenamiento Geológico de CO₂ del IGME, el habernos facilitarnos la información necesaria para la realización del trabajo a través del Fondo Documental del Archivo de Hidrocarburos.

REFERENCIAS

- Alonso Gavilán, G. 1981. Estratigrafía y sedimentología del Paleógeno en el borde suroccidental de la cuenca del Duero provincia de Salamanca. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 438 p. En. Vera, Editor 2004.
- Alonso, G., Armenteros, I., Carballeira, J., Corrochano, A., Dabrio, C., Jimenez, E., López, N., Olivé, A., del Olmo Zamora, P., Pol, C., Portero, J. M. 1983. La Depresión del Duero. En. *Libro Jubilar a R. Ríos*; IGME, 487-496.
- Alonso, J.L., Pulgar, J.A., García Ramos, J.C. y Barba, P. 1996. Tertiary basins and Alpine tectonics in the Cantabrian Mountain NW Spain. En. Tertiary basins of Spain P. F. Friend y C. J. Dabrio, Eds.
- Andewerg, B. 2002. Cenozoic tectonic evolution of the Iberian Peninsula. causes and effects of changing stress fields. Tesis Doctoral. Universidad Libre de Ámsterdam. 178pp.
- Angulo, A., Bracero, C. y Muñoz, A. 2000. Caracterización de las Unidades Tectosedimentarias de la Comarca de La Bureba Burgos, España y su correlación con las cuencas terciarias del Ebro y Duero. *Geotemas*, 1 2. 19-23.
- Arenas, C. 1993. Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la cuenca del Ebro zona aragonesa occidental. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 858 p.
- Arlegui, L.E. y Simón, J.L. 1998. Reliability of paleostress analysis from fault striations in near multidirectional extension stress fields. Example from the Ebro Basin, Spain. *Jour. Struct. Geol.*, 20. 827-840.



- Bachu, S. and Carroll, J.J. 2004. *In situ phase and thermodynamic properties of resident brine and acid gases CO₂ and H₂S 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. *CO₂ storage capacity estimation. Issues and development of standards*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 1, 62-68.
- Casas Sainz, A.M., Cortés Gracia, A.L. y Maestro González, A. 2000. Intraplate deformation and basin formation during the Tertiary within the northern Iberian Plate; origin and evolution of the Almazán Basin. *Tectonics*, 19. 258-289. En. Maestro González 2004.
- Cámara, P y Klimowitz, J. 1985. Interpretación geodinámica de la vertiente centro-occidental surpirenaica Cuencas de Jaca-Tremp. *Estudios Geol.*, 41. 391-404.
- Cámara, P. 1997. The Basque-Cantabrian basin's Mesozoic tectono-sedimentary evolution. *Mém. Soc. Géol. France*, 171. 187-191.
- Campos, R., Perucha, M. A. y Recreo, F. 2008 *AGP de CO₂. Selección de formaciones favorables en la Cuenca del Ebro*. Informe Técnico CIEMAT1131 133pp.
- Capote, R., Muñoz, J.A., Simón, J.L., Liesa, C.L. y Arlegui, L.E. 2002. *Alpine Tectonics I. The Alpine system north of the Betic Cordillera*. En. *Geology of Spain W. Gibbons y M.T. Moreno, Eds, Geol. Soc. London*, 385-397. En. Vera, Editor 2004.
- CSN 2006. *Determinación de Fallas de Primer Orden mediante análisis integrado de datos geológicos*. Proy. PRIOR. CSN. Col. Otros Documentos. 312pp.
- González, A. 1989. Análisis tectosedimentario del Terciario del borde SE de la Depresión del Ebro sector bajoaragonés y Cubetas Ibéricas Marginales. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 507 p.
- Guimerá, J., Alonso, A. y Mas, R. 1995. *Inversion of an extensional-ramp basin by a newly formed thrust. the Cameros basin N Spain*. En. *Basin Inversion J.G. Buchanan y P.G. Buchana, Eds.. Geol. Soc. London, Sp. Publ., 88. 433-453*. En. Vera, Editor 2004.
- Halloway, S and Savage, D., 1993. *The Potential for Aquifer Disposal of Carbon Dioxide in the UK*, *Energy Conversion and Management*, Vol. 34, N° 9-11, pp.925-932.
- Hendriks, C.A.. and Blok, K., 1993. *Underground storage of carbon dioxide*, *Energy Conversion and Management*, v.34.
- Huerta, P., Armenteros, I., Corrochano, A. 2006. *El Paleógeno de la Cuenca de Almazán. estratigrafía secuencial, sistemas fluviales y lacustres*. VI Congreso del Grupo Español del Terciario. Salamanca.
- Hurtado, A., Eguilior, S. 2008. *Estimación de la Capacidad de Almacenamiento Geológico de CO₂. Metodología y aplicación a la Cuenca del Duero Zona Centro-Oriental* Informes Técnicos CIEMAT 1141, 105 pp.
- Hurtado, A. 2008. *Método para el cálculo de la capacidad regional de almacenamiento geológico CO₂ basado en SIG y en la relación densidad-profundidad*. VII Congreso Geológico de España. Las Palmas de Gran Canaria. GEO-TEMAS. VOL.10. 1223-1226 S.G.E.
- IPCC, 2005. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.



- ITGE 1990. *Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España. Tomo V, Duero-Almazán*. Madrid, 20 mapas.
- ITGE 1990. *Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España. Tomo VI. Ebro-Pirineos*. Madrid, 36 p, 49 planos.
- Klimowitz J. y Torrescusa, S. 1990. *Nota sobre la estratigrafía y facies de la serie triásica en el Alóctono Surpirenaico*. En. Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la Zona de Levante F. Orti y J.M. Salvany, Eds., ENRESA – GPPG, Univ. Barcelona. 29-33.
- 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.
- Luzón, A. y González, A. 2000. *Sedimentology and evolution of a Paleogene-Neogene Shallow carbonate lacustrine system, Ebro basin, northeastern Spain*. En. Lake basins through space and time E.H. Gierlowski-Kordesch y K.R. Kelts, Eds., Amer. Assoc. Petrol. Geol., Studies in Geology, 46. 407-416
- Luzón, A. 2001. *Análisis Tectosedimentario de los materiales terciarios continentales del sector central de la Cuenca del Ebro provincias de Huesca y Zaragoza*. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 465 p..
- Luzón A., González, A., Muñoz, A. y Sánchez-Valverde, B. 2002. *Upper Oligocene-Lower Miocene shallowing-upward lacustrine sequences controlled by periodic and non-periodic processes Ebro Basin, northeastern Spain*. Jour. Paleolimnology, 28. 441-456
- Muñoz, A. 1992. *Análisis tectosedimentario del Terciario del sector occidental de la Cuenca del Ebro Comunidad de La Rioja*. Inst. Estudios Riojanos, Logroño. Ciencias de la Tierra, 15, 347 p.
- Muñoz, A. 1993. *Análisis del Pérmico y Tríasico en el subsuelo del tercio noroccidental de la Cordillera Ibérica y áreas adyacentes*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 374 p.
- Muñoz, A., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Pardo, G., Pérez, A. y Villena, J. 2002. *Ebro Basin northeastern Spain*. En. The Geology of Spain W. Gibbons y T. Moreno, Eds., Geol. Soc. London, 301-309.
- Pérez, A. 1989. *Estratigrafía y sedimentología del Terciario del borde meridional de la Depresión del Ebro sector riojano y aragonés y cubetas de Muniesa y Montalbán*. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 525 p.
- Pérez, A., Azanza, B., Cuenca, G., Pardo, G. y Villena, J. 1985. *Nuevos datos estratigráficos y paleontológicos sobre el Terciario del borde meridional de la Depresión del Ebro provincia de Zaragoza*. Estudios Geol., 41. 405-411.
- Pozo, M. y Gonzalez Casado, J.M. 1999. *Geología de la Península Ibérica y Canarias*. En. Ciencias de la Tierra. una introducción a la geología física. Tarbuk y Lutgens. Prentice Hall. 541p.
- Prado, A. J., Pérez del Villar, L., Pelayo, M. y Recreo, F. 2008 a. *Modelización del subsuelo de la Cuenca del Duero y selección de formaciones favorables para el almacenamiento de CO₂ en estado supercrítico*. Informes Técnicos CIEMAT 1130, 66 pp.
- Prado, A. J., Pérez del Villar, L. y Pelayo, M.. 2008 b. *Selección de formaciones favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ y cálculo de la capacidad de almacenamiento en la Cuenca del Duero*. VII Congreso Geológico de España. Las Palmas de Gran Canaria. GEO-TEMAS. VOL.10. 1235-1238 S.G.E.
- Rey, C. 2003. *Estudio Geofísico de una Cuenca Sedimentaria. La Cuenca de Almazán (Provincia de Soria). Implicaciones Tectónicas*. IGME, Madrid, 205 pp.



- Riba, O., Reguant, S. y Villena, J. 1983. Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la Cuenca terciaria del Ebro. En. Geología de España. Libro Jubilar J.M. Ríos J.A. Comba, Coord., IGME, Madrid, 2. 131-159.
- 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 CO₂. Criterios de selección de emplazamientos*. Informe Técnico CIEMAT 1085, 99 pp.
- Ruiz, C. y Lomba, L. 2008 a. *Formaciones favorables para el almacenamiento de CO₂ en la Cuenca de Almazán*. Informes Técnicos CIEMAT 1132, 116 p.
- Ruiz, C. y Lomba, L. 2008 b. *Identificación y modelización de formaciones y áreas favorables para almacenar CO₂ en la Cuenca de Almazán y estimación de la capacidad de almacenamiento de una estructura potencialmente favorable*. VII Congreso Geológico de España. Las Palmas de Gran Canaria. GEO-TEMAS. VOL.10. 1239-1242 S.G.E.
- Ruiz, C. Prado, A. J., Campos, R. Hurtado, A. Pelayo, M. Prado, P. de la Losa, A. Martínez, R. Ortiz, G. Sastre, J. Pérez del Villar, L. Eguiñor, S. Lomba L. y Recreo F. 2008. *Almacenamiento geológico de CO₂. Criterios de selección de emplazamientos*. IX Congreso Nacional de Medio Ambiente Madrid
- Shell 1982. *Informe Final del sondeo El Gredal-1. Permiso de exploración de Almazán*, Shell España, N.V., SE/EXP, Informe nº S-1035, Madrid.
- Vera, J.A. 2004. Geología de España. SGE-IGME, Madrid, 890 p.
- Villena, J., Pardo, G., Pérez, A., Muñoz, A. y González, A. 1996a. *The Tertiary of the Iberian margin of the Ebro basin. sequence stratigraphy*. En. Tertiary Basins of Spain, P.F. Friend y C.J. Dabrio Eds., Cambridge Univ. Press, 77-82.
- Villena J., Pardo, G., Pérez, A., Muñoz, A. y González, A. 1996b. *The Tertiary of the Iberian margin of the Ebro basin. paleogeography and tectonic control*. En. Tertiary Basins of Spain P.F. Friend y C.J. Dabrio, Eds, Cambridge Univ. Press, 83-88.
- Watson, R. T., Albritton, D.L., Barker, T., Bashmakov, I.A., Canziani, O., Christ, R., Cubasch, U., Davidson, O., Gitay H., Griggs, D., Halsnaes, K., Houghton, J., House, J., Kundzewicz, Z., Lal, M., Leary, N., Magadza, C., McCarthy, J. J., Mitchell, J.F.B., Moreira, J. R., Munasinghe, M., Noble, I., Pachauri, R., Pittock, B., Prather, M., Richels, R.G., Robinson, J.B., Sathaye, J., Schneider, S., Scholes, R., Stocker, T., Sundararaman, N., Swart, R., Taniguchi, T., y Zhou D. 2001 Climate Change 2001 Synthesis report. IPCC 207 pp.