

(Editores)  
Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso

# RECURSOS MINERALES Y MEDIOAMBIENTE: UNA HERENCIA QUE GESTIONAR Y UN FUTURO QUE CONSTRUIR

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020





# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

HOMENAJES



Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso  
(editores)

*Recursos minerales y  
medioambiente: una herencia  
que gestionar y un futuro  
que construir*

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Álvarez García, Rodrigo; Ordoñez Alonso, Almudena (editores). (2020). *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2020 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

[www.publicaciones.uniovi.es](http://www.publicaciones.uniovi.es)

ISBN: 978-84-17445-95-9

DL AS 1451-2020



Jorge Loredo Pérez



## Índice

PRÓLOGO .....	13
<i>Santiago García Granda, Rector de la Universidad de Oviedo</i>	

### SEMBLANZA PERSONAL

Bosquejo a vuelapluma de Jorge Loredo Pérez, alumno, colega, colaborador y, sobre todo, amigo entrañable .....	17
<i>J. García-Iglesias.</i>	
Jorge Loredo: un compañero de viaje y un maestro de vida.....	21
<i>N. Roqueñí.</i>	
Casi un cuarto de siglo trabajando con Jorge: una experiencia de vida.	25
<i>A. Ordóñez.</i>	
Jorge Loredo: un gran hombre, un gran científico, un gran maestro y, ante todo, una gran persona.....	29
<i>M. I. Rucandío.</i>	

### ARTÍCULOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

¿Se está gestando una nueva crisis del petróleo?.....	33
<i>I. Álvarez.</i>	
Mineralogía, textura y geoquímica de depósitos minerales y residuos mineros: una herramienta de interés en estudios de contaminación de suelos.....	45
<i>R. Álvarez, J. Álvarez-Quintana y A. Ordóñez</i>	
Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular .....	59
<i>C. Ayora, S. Orden, F. Macías y J. M. Nieto</i>	

Mineralogía magnética aplicada al estudio de los yacimientos; repaso sobre el magnetismo de los minerales y ejemplos de aplicación: el metasomatismo ferrífero de la dolomía encajante de las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida e historia de los «gossans» de la Faja Pirítica Ibérica.....	71
<i>L. Barbanson y M. Essalbi</i>	
Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular – Aplicación al proyecto Carlés .....	83
<i>C. Castañón, A. Martín-Izard, I. Diego y D. Arias</i>	
Determinación de niveles de fondo y referencia de elementos traza en suelos: un enfoque metodológico avanzado .....	93
<i>E. Chacón, A. Callaba, P. Fernández-Canteli, F. Barrio-Parra, M. Izquierdo-Díaz y E. de Miguel</i>	
Historia de las aguas minerales y termales .....	105
<i>M. M. Corral, M. E. Galindo, J. Á. Díaz, C. Ontiveros y J. M. Fernández.</i>	
Mobility of Thallium and other trace elements in mine drainage waters from two carbonate-hosted Lead-Zinc ore deposits in the northeastern Italian Alps .....	115
<i>S. Covelli, E. Pavoni, N. Barago, F. Floreani, E. Petranich, M. Crosera, G. Adami &amp; D. Lenaz</i>	
Comentarios heterodoxos sobre el cambio climático .....	129
<i>J. R. Fernández</i>	
The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage.....	141
<i>J. Fernández, E. Álvarez, J. M. Baltuille &amp; J. Martínez</i>	
Metodologías de fraccionamiento secuencial como herramienta útil para la evaluación de la movilidad de mercurio y arsénico y su impacto en la cuenca minera de Asturias .....	153
<i>R. Fernández-Martínez, A. Ordóñez, R. Álvarez e I. Rucandio</i>	
Recursos geotérmicos en Asturias .....	167
<i>C. García de la Noceda</i>	
Análisis de la presencia de mercurio en diferentes compartimentos ambientales del estuario del río Nalón como consecuencia de la minería..	179
<i>E. García-Ordiales, N. Roqueñí, P. Cienfuegos, S. Covelli y L. Sanz-Prada</i>	
Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva.....	193
<i>S. González-Nistal, R. Álvarez y F. Ruíz</i>	

Escombreras asociadas a minería de sulfuros: pasivo ambiental y potencial activo económico desde una perspectiva de minería circular .....	205
<i>J. A. Grande, J. M. Dávila, J. C. Fortes, M. Santisteban, A. M. Sarmiento, F. Córdoba, M. Leiva, M. L. de la Torre, A. Jiménez, J. Díaz-Curiel, B. Biosca, A. T. Luís, N. Durães, E. A. Ferreira da Silva, M. J. Rivera, J. Aroba, B. Carro, J. Borrego y J. A. Morales.</i>	
Mercurio en Almadén – datos recientes (2000-2020) sobre su presencia en el medioambiente y sus implicaciones.....	219
<i>P. L. Higuera, J. M. Esbrí, E. García-Ordiales y J. D. Peco</i>	
Evaluación medioambiental temprana de riesgos a la salud, a la seguridad y al propio medioambiente por proyectos geo-energéticos .....	245
<i>A. Hurtado y S. Eguilior</i>	
European dimension of the social license to operate in mining.....	257
<i>K. Komnitsas</i>	
El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería .....	265
<i>J. F. Llamas</i>	
Las aguas subterráneas y los acuíferos: su carácter estratégico en escasez y periodos de sequía.....	277
<i>J. Antonio López-Geta</i>	
Comportamiento del agua de mina en instalaciones geotérmicas: Análisis de un caso particular .....	297
<i>C. Loredó</i>	
Una tecnología para reducir las emisiones: el almacenamiento geológico de CO <sub>2</sub> .....	309
<i>R. Martínez Orío y P. Fernández-Canteli</i>	
Perspectivas sobre reducción de emisiones de mercurio originadas en la producción de energía .....	321
<i>M. R. Martínez Tarazona, M. A. López Antón y R. García</i>	
Almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas subterráneas cerradas: situación actual y balances de energía .....	333
<i>J. Menéndez</i>	
Contribución del yacimiento de Carlés a la mineralogía española .....	345
<i>M. Mesa</i>	
La descarbonización de las industrias minerales en el Principado de Asturias .....	357
<i>A. Olay</i>	

Notas sobre liderazgo .....	367
<i>J. C. Rodríguez-Ovejero</i>	
Viabilidad económica ambiental para la recuperación o reducción del consumo de agua de plantas de procesamiento de oro .....	377
<i>J. Soto, J. Melendez y P. Cienfuegos</i>	
La explotación minera del karst fósil en la sierra del Aramo: del Calcolítico al siglo xx .....	391
<i>M. Suárez</i>	

# UNA TECNOLOGÍA PARA REDUCIR LAS EMISIONES: EL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>

*Roberto Martínez Orío y Paula Fernández-Canteli*

Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España

## RESUMEN

Las emisiones de origen antrópico de los llamados Gases de Efecto Invernadero (*Greenhouse Gases*) se han identificado como uno de los causantes directos del calentamiento global del que se deriva el Cambio Climático. Desde mediados de la primera década del siglo, el Instituto Geológico y Minero de España viene contribuyendo al desarrollo de la investigación de almacenes geológicos de CO<sub>2</sub>, cuya finalidad es la utilización del espacio subterráneo para almacenar, de forma permanente, el dióxido de carbono generado en las grandes fuentes de emisión. Los escenarios para la transición energética diseñados por la Comisión Europea, así como por diversos organismos internacionales como el IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) reflejan, con diversos grados de incidencia, que el empleo de estas tecnologías será imprescindible en las próximas décadas para cumplir los objetivos de reducción de emisiones, manteniendo una alta capacidad industrial que garantice los niveles de prosperidad y desarrollo de los que ahora disfrutamos. En este sentido, a través de los sucesivos Programas Marco de Investigación (6<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> Framework Programme, Horizon 2020 Programme), la Comisión Europea ha financiado diversos proyectos de desarrollo tecnológico, con el objetivo de garantizar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental del almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Pese a ello, y tras una primera etapa esperanzadora, en España no se ha mantenido constante el apoyo por parte de la Administración a esta tecnología, siendo soslayada en los últimos documentos estratégicos sobre la mitigación del Cambio Climático, poniendo en jaque el futuro a medio plazo de algunos sectores clave de la industria española.

## 1. INTRODUCCIÓN

En 1991, el estado noruego impuso a ciertas actividades industriales una tasa de 205 NOK (coronas noruegas), unos 35 dólares al cambio de enton-

ces, por cada tonelada de CO<sub>2</sub> que fuera emitida a la atmósfera. La empresa pública Statoil (hoy Equinor) operaba entonces el campo de gas Sleipner, una de las actividades afectadas por dicha tasa, donde el gas producido contenía un 20% en volumen de dióxido de carbono. Hasta ese momento, la práctica habitual era tratar el gas en la misma plataforma mediante un proceso industrial de adsorción con aminas, separando el CO<sub>2</sub> —que era emitido directamente a la atmósfera— y enviando el gas natural tratado a tierra firme para su comercialización. Ante la situación creada por el nuevo impuesto, Statoil decidió explorar una vía alternativa al pago directo, inyectando el CO<sub>2</sub> separado en una formación geológica profunda con objeto de evitar su difusión en la atmósfera y la tasa impositiva. Durante el Proyecto JOULE (3<sup>rd</sup> Framework Programme, 1993-1995), se demostró la viabilidad técnica y económica del proyecto, por lo que en 1996 se inició la inyección de 1 millón de toneladas de CO<sub>2</sub> al año. La tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS en literatura anglosajona) había nacido.

En 2020, Equinor sigue operando Sleipner al mismo ritmo que planteó desde su inicio. El fin de las operaciones, previsto originalmente para 2021 y actualmente extendido a 2024, no se deberá a un problema técnico en el almacén ni a un agotamiento de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, sino al abandono del campo de gas. Desde el inicio se han desarrollado proyectos de investigación (SACS, CO2Store, CASTOR...) para comprobar el comportamiento del CO<sub>2</sub> inyectado en el subsuelo, valorar las herramientas de seguimiento y control, validar los modelos de funcionamiento de la roca de sello, prever la microsismicidad inducida en el terreno... Sleipner ha demostrado la viabilidad de almacenar CO<sub>2</sub> a gran escala en el subsuelo, así como la capacidad de monitorizar desde superficie los fenómenos físico-químicos que regulan su comportamiento.

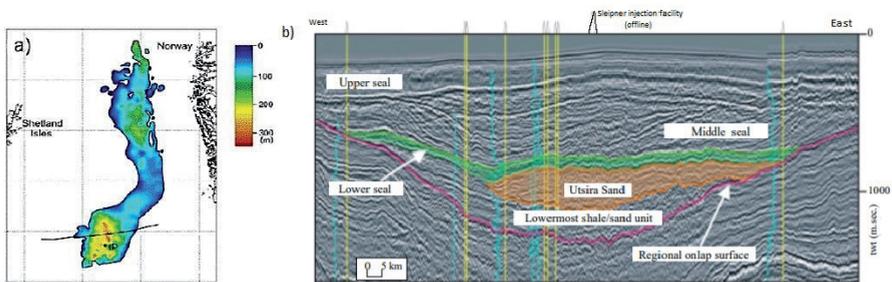


Fig. 1. Extensión en planta (a) y sobre sección sísmica (b) de la formación Utsira, donde se almacena el CO<sub>2</sub> capturado en Sleipner (Furre et al., 2017)

Desde principios del siglo XXI, los sucesivos informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) contemplan la tecnología CCS como una de las principales opciones de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> necesarias para estabilizar la concentración atmosférica de este gas y evitar un incremento excesivo de la temperatura global. Aunque, en un principio, se estimó que la aplicación fundamental de esta nueva tecnología sería en centrales térmicas de generación eléctrica mediante carbón —llegando a ser

considerada la herramienta que permitiría la conservación de la actividad minera del carbón en las cuencas españolas y europeas—, la crisis económica de 2008 y sus consecuencias han cambiado esta perspectiva debido a la prácticamente total desaparición del carbón de los «mix» energéticos europeos. Sin embargo, y al contrario de lo que se podría pensar, esta situación no ha dado lugar a una limitación en la importancia de la tecnología de captura y almacenamiento ya que es y será esencial para reducir drásticamente las emisiones de las centrales de generación eléctrica mediante gas natural, y de algunos sectores industriales en los que la producción de CO<sub>2</sub> es inherente a los procesos productivos (cemento, amoníaco, acero...).

Es importante tener en cuenta que las tecnologías CCS son una de las medidas propuestas para la reducción de las emisiones, y que por sí sola no es suficiente, siendo necesaria una estrategia a corto, medio y largo plazo en la que se combinen las tecnologías CCS con la reducción de las emisiones desde el foco, la eficiencia energética, el cambio a energías renovables y nuevos usos del CO<sub>2</sub>, entre otras. Dicho de otro modo: una estrategia que no tenga en cuenta las tecnologías CCS no permitirá alcanzar los objetivos establecidos para frenar el cambio climático, al omitir una de las herramientas básicas propuestas.

En su último informe de 2019, el IPCC asume que, para cumplir los objetivos de emisiones propuestos para este siglo, desde hoy hasta 2100 deben capturarse y almacenarse alrededor de 1200 Gt de CO<sub>2</sub>. En Europa, la Comisión Europea estima que en 2050 deben estar almacenándose anualmente entre 80 y 300 Mt de CO<sub>2</sub> para cumplir los objetivos de limitar el incremento de temperatura global a 1,5 °C.

## **2. PRINCIPIOS DEL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>**

El almacenamiento geológico es la etapa final de un proceso tecnológico que se inicia con la captura y separación del dióxido de carbono de la corriente de gases generada en una gran instalación de generación eléctrica o de producción industrial. El CO<sub>2</sub> capturado es, posteriormente, transportado (mediante tuberías o buques, por ejemplo), hasta un emplazamiento previamente seleccionado en el que el CO<sub>2</sub> se inyectará, a través de uno o varios pozos, en una formación geológica que debe cumplir una serie de características imprescindibles. El CO<sub>2</sub> quedará confinado, de forma permanente, en dicha formación geológica.

### **2.1. Condiciones del almacenamiento geológico**

Dado que el objetivo fundamental de todo el proceso es el confinamiento permanente del CO<sub>2</sub>, el emplazamiento seleccionado para el almacenamiento debe de asegurar que este no escapará de la formación geológica almacén hacia formaciones superiores en las que puede haber otros recursos geológicos (principalmente, agua dulce) o hacia la superficie, lo que convertiría el proceso en ineficaz. Teniendo en cuenta que el dióxido de carbono tenderá a fluir hacia los espacios de menor presión, es imprescindible que la formación almacén se encuentre «taponada» por otra formación que evite la migración del fluido y, por tanto, asegure su confinamiento. Dicha formación es conocida como sello y, típicamente, será una formación arcillosa o margosa.

Para asegurar la eficiencia del almacenamiento y que da respuesta a los grandes volúmenes de emisiones que se producen en las fuentes estacionarias, es necesario que la formación almacén asegure dos condiciones; por una parte, que su capacidad de almacenamiento sea suficiente para todo el volumen necesario y, por otra, que sea suficientemente permeable al  $\text{CO}_2$  como para que el ritmo de inyección sea similar al de emisión. Para cumplir el primer objetivo, la roca almacén debe tener una porosidad lo más alta posible y para cumplir el segundo, esa porosidad debe estar conectada y ser efectiva.

Adicionalmente, en este punto se debe valorar una de las peculiaridades del  $\text{CO}_2$  como fluido, y es su comportamiento ante incrementos de presión y temperatura. En condiciones normales, 1 tonelada de  $\text{CO}_2$  ocupa un volumen superior a los  $500 \text{ m}^3$ , por lo que el almacenamiento de millones de toneladas requeriría en superficie de espacios enormes. Sin embargo, cuando alcanza presiones del entorno de los 70 bares y temperaturas superiores a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , la densidad del  $\text{CO}_2$  aumenta notablemente, ocupando la misma tonelada alrededor de  $1,4 \text{ m}^3$ . En estas condiciones, una formación con un 20% de porosidad efectiva, podría almacenar 1 tonelada de  $\text{CO}_2$  en  $7 \text{ m}^3$  de roca. Cabe añadir que, en esas condiciones de presión y temperatura, el dióxido de carbono conserva una viscosidad similar a la de las condiciones normales. Por tanto, si el almacén geológico se encuentra en dichas condiciones de presión y temperatura, el  $\text{CO}_2$  presentará una densidad similar a la de un líquido, lo que reduce la necesidad de volumen de almacenamiento, pero conservará una viscosidad similar a la de un gas, por lo que se difundirá fácilmente en la roca almacén, facilitando la permeabilidad del medio al fluido. A este estado se le denomina estado supercrítico (Figura 2). Por este motivo, los almacenes geológicos de  $\text{CO}_2$  se buscan a una profundidad mínima de 800 metros, que asegura que se alcancen las condiciones supercríticas para el almacenamiento.

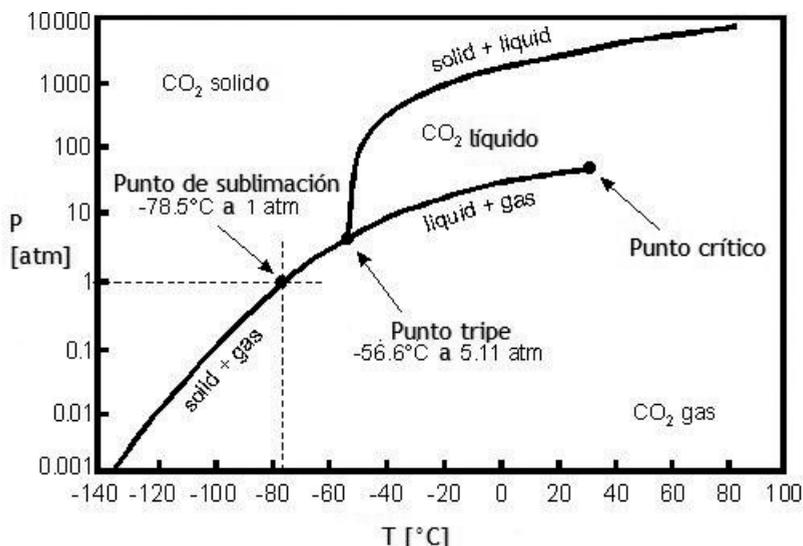


Fig. 2. Diagrama de fases del  $\text{CO}_2$  (Jaime-Muñoz et al., 2015)

## 2.2. Tipos de almacén geológico

Por la experiencia previa disponible, especialmente la procedente del sector del petróleo y el gas, se consideran, esencialmente, tres tipos de formación geológica adecuados para el almacenamiento geológico profundo:

Yacimientos de hidrocarburos agotados o en vías de agotamiento. En aquellos yacimientos en los que ha existido una producción histórica de petróleo, gas o ambos, se tiene la seguridad de que la propia naturaleza ha sido capaz de almacenar, durante millones de años, fluidos en la roca almacén taponada por un sello y también que la citada roca almacén tiene una permeabilidad suficiente como para permitir que los hidrocarburos se hayan extraído mediante pozos. En campos muy maduros se corre el riesgo de que los propios pozos de explotación de hidrocarburos, que pueden ser muy abundantes y algunos antiguos, sirvan de vías de fuga para el CO<sub>2</sub>, por lo que se requiere de un sellado efectivo para dichos pozos y verificar su integridad.

Capas de carbón profundas. A partir de ciertas profundidades, el carbón no es objeto de minería, ya que las técnicas son demasiado complejas o costosas y la explotación no es rentable, teniendo en cuenta que el carbón más superficial es abundante y que su consumo, al menos en Europa, está en retroceso. El carbón es un material muy poroso, aunque poco permeable, y como tal tiene más afinidad por el CO<sub>2</sub> que por otros gases que se encuentran de manera natural en el seno de las capas, como el metano o los óxidos de nitrógeno. En este tipo de almacén se da la particularidad de que la misma roca almacén ejerce como sello, pero presenta la dificultad de trabajar en una formación poco permeable que puede requerir de técnicas de fractura hidráulica para incrementar artificialmente dicha permeabilidad. En el caso de España, además, las capas de carbón suelen ser poco potentes y presentar buzamientos que dificultan la operación, por lo que, en general, se las considera de menor interés.

Acuíferos salinos profundos. Se trata de formaciones geológicas similares a las que albergan los yacimientos de hidrocarburos, pero cuyos sistemas porosos se encuentran rellenos de agua salada. Son más abundantes que los otros tipos de almacén, y su capacidad estimada puede ser superior en dos o más órdenes de magnitud. Sin embargo, al haber carecido históricamente de interés económico, el grado de conocimiento que se dispone de sus estructuras subterráneas es mucho menor y, por tanto, mayor su riesgo exploratorio. Son la opción más viable en países con escasez de recursos petroleros, como es España.

## 2.3. El almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> a escala global

A la fecha (junio 2020), hasta 59 instalaciones a gran escala se encuentran realizando diferentes operaciones de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, de las cuales 21 se encuentran en un régimen de funcionamiento normal, con una capacidad de almacenamiento de 43 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, mientras que otras 3 se encuentran en una fase avanzada de construcción. Europa, que en su momento fue pionera en esta tecnología a través del mencionado campo de Sleipner y la posterior apertura de Snohvit, también en Noruega, ha cedido el paso a otros grandes actores globales, como Esta-

dos Unidos, China o Australia, que ahora lideran el desarrollo tecnológico y la implementación a escala industrial.

Si en una primera etapa los proyectos surgieron de forma aislada y sin un patrón claro de ubicación, en los últimos años se está imponiendo una idea de despliegue de la tecnología centrada en los principales nodos industriales del mundo (Figura 3), en los que los proyectos se beneficiarían de las sinergias entre las instalaciones de gran emisión, que tienden a ubicarse en un entorno cercano. Esta aproximación (*hubs and clusters* en literatura anglosajona), donde las industrias emisoras comparten infraestructuras de transporte y almacenamiento con la consiguiente reducción de costes, se relaciona con la idea expuesta previamente de que las tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> pueden ser una solución óptima para la descarbonización de diferentes procesos industriales en los que la emisión de CO<sub>2</sub> es inherente a la obtención del producto final.

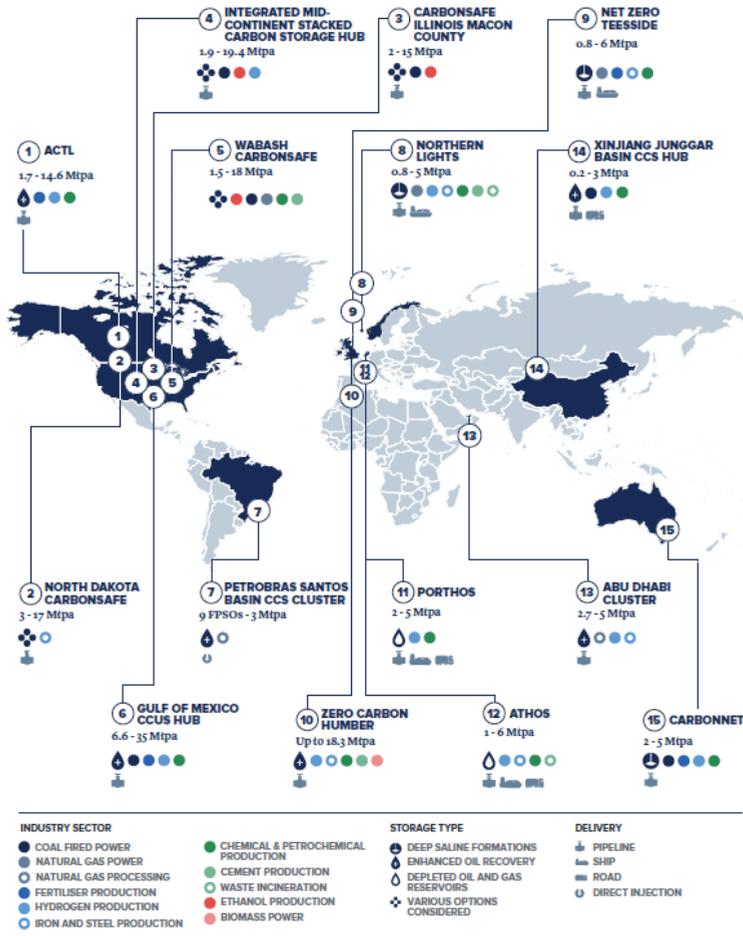


Fig. 3. Principales hubs and clusters definidos a escala global (Global CCS Institute, 2019)

Es razonable preguntarse si existe una capacidad de almacenamiento suficiente como para responder a los objetivos de reducción de emisiones que se plantean a escala global. Las últimas estimaciones oscilan entre las 5000 y las 30000 Gt (Tabla 1) de capacidad con distintos intervalos de confianza, si bien el potencial por explorar sigue siendo enorme.

Tabla 1. Capacidad de almacenamiento en el mundo (Global CCS Institute, 2019)

País - Región	Capacidad (Gt)	Grado de fiabilidad
Estados Unidos	2000 - 21000	Alto
Europa (Mar del Norte)	200	Alto
Europa (resto)	300	Alto
China	1200 - 4100	Medio
Canadá	200 - 430	Medio
Australia	220 - 410	Medio
Brasil	2000	Bajo
Resto del mundo	550 - 600	Medio - Bajo

### 3. EL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub> EN ESPAÑA

En los años 2003 y 2004, el Instituto Geológico y Minero de España y la empresa ELCOGAS S. A. realizaron el primer estudio del potencial de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España (Proyecto ALCO2, Programa PROFIT, Ministerio de Ciencia y Tecnología), localizado en el entorno de la central que la citada empresa operaba en Puertollano (Ciudad Real). Desde entonces, la investigación de la capacidad de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España ha atravesado distintas etapas, que podemos resumir en 3:

#### 3.1. Despegue y expansión (2003 - 2011)

Al citado estudio llevado a cabo por IGME y ELCOGAS, siguieron varios proyectos de investigación, orientados en dos objetivos principales; en primer lugar, identificar y cuantificar el potencial de almacenamiento en el subsuelo del territorio español y, en segundo, desarrollar la investigación e innovación tecnológica que permitiera demostrar la viabilidad técnica de la operación de almacenamiento.

En el primero de los objetivos, el IGME desarrolla varias iniciativas para mejorar el conocimiento del potencial de almacenamiento en España. Entre 2006 y 2008, se desarrolla el Proyecto GeoCapacity, financiado por la Comisión Europea, que permite una primera evaluación del potencial de almacenamiento en España, teniendo en cuenta los acuíferos salinos y las capas de carbón (Figura 4). Posteriormente, con la financiación del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, desarrolla un plan integral de identificación y evaluación del potencial de almacenamiento geológico en España (Plan ALGECO2), que es, aún hoy, el principal punto de referencia sobre la capacidad de almacenamiento del país.

Para la investigación y la innovación, el Gobierno español decidió la creación de la Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN), en estrecha colaboración con CIEMAT, cuya sede central se ubicó, y aún permanece, en Ponferrada. Además de otros objetivos en tecnologías de captura y transporte, CIUDEN ideó y

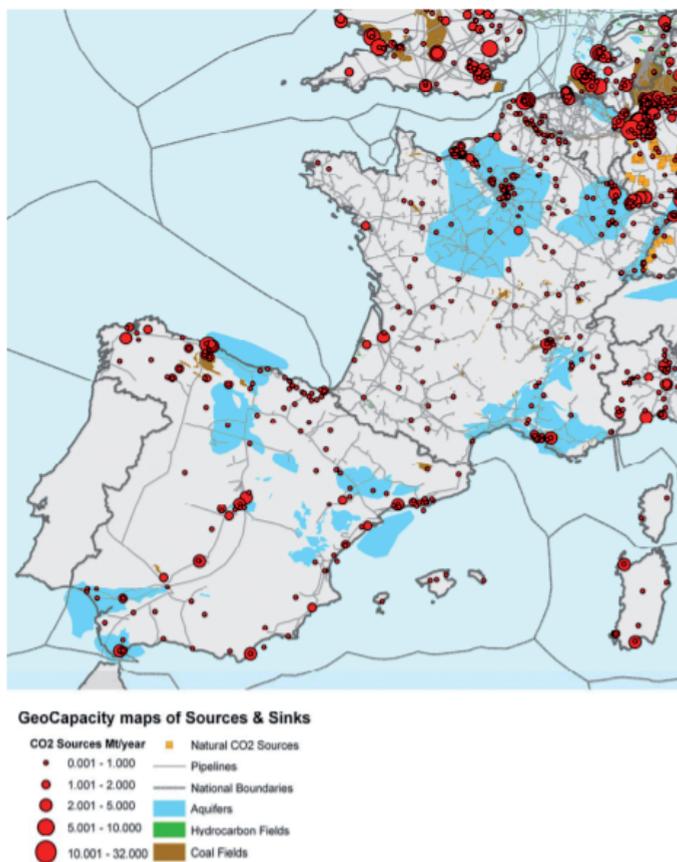


Fig. 4. Detalle del Sistema de Información Geográfica de GeoCapacity en la Zona Suroeste de Europa (Vangkilde-Pedersen et al., 2009)

desarrolló la Planta de Desarrollo Tecnológico (PDT) de Hontomín, en Burgos, que se proyectó como un ambicioso desarrollo con tres perforaciones con técnica petrolera y un gran centro de interpretación. Sin embargo, su desarrollo final se vería truncado, como se verá posteriormente.

Estas iniciativas debían converger en un gran proyecto de demostración industrial de la tecnología, que bajo el nombre provisional de OXYCFB300, debió desarrollar la empresa eléctrica ENDESA, y que tuvo un intenso programa de exploración en la provincia de León para localizar un almacén viable para el CO<sub>2</sub> que habría de capturarse en la central de Compostilla (Ponferrada). A pesar de ello, cuando en 2010 se llegó al punto en que había de decidirse la inversión en el proyecto de demostración, el proyecto fue hibernado por diversas circunstancias, la principal de ellas el bajo precio del CO<sub>2</sub> en el mercado de emisiones.

Es imprescindible señalar otros dos hitos en este periodo; por una parte, la creación en 2006 de la Plataforma Tecnológica Española del CO<sub>2</sub> (PTE-

CO<sub>2</sub>), que ha agrupado desde entonces a los principales actores públicos y privados en el desarrollo de las tecnologías CCS en España y, por otro, la aprobación de la Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento de dióxido de carbono, como trasposición a la legislación española de la correspondiente Directiva Europea, sentando las bases para un futuro desarrollo de un sistema de almacenes geológicos en España.

### 3.2. Parón y declive (2011 – 2018)

La crisis de 2008 y su posterior, y grave, recesión, supusieron un notable parón en el desarrollo de la investigación sobre almacenamiento geológico. Las empresas del sector eléctrico vieron disminuir drásticamente el precio de los derechos de emisión, lo que alejó los umbrales de rentabilidad de las tecnologías. Las penalizaciones a la generación con carbón y la incertidumbre sobre su viabilidad en el futuro acabaron descartando los proyectos relacionados con las centrales térmicas. La PDT de Hontomín se redimensionó hacia un proyecto menos ambicioso, aunque más realista con las nuevas condiciones de mercado, apostando por la perforación con tecnología minera para reducir los costes de operación y una reorientación de los métodos de monitoreo para reducir los costes, iniciando finalmente las operaciones de inyección a finales de 2015 a una escala muy reducida.

El Plan ALGECO2, que se había proyectado con una fase final que incluía la perforación de algunos pozos de exploración en estructuras seleccionadas fue también reducido, quedando en una segunda fase que se centró en la modelización estática y dinámica de las estructuras más prometedoras seleccionadas en la primera fase, así como la edición del primer *Atlas español de estructuras de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>* (Suárez, 2014)

Entre los pocos aspectos positivos de esta etapa, cabe señalar la participación de IGME y CIEMAT en el Proyecto COMET (2010 – 2013), financiado por la Comisión Europea para el estudio de una red integrada de transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en España, Portugal y Marruecos, y que supuso un primer paso hacia el enfoque de *hubs and clusters* que se impondría poco después. Adicionalmente, y a través también de la financiación europea en el Proyecto CGS Europe (2011 – 2013), IGME y CIUDEN se incorporaron a la red de excelencia europea CO<sub>2</sub>GeoNet, que es, hoy en día, el principal referente independiente de expertos científicos en Europa sobre esta materia.

Durante estos años, la Comisión Europea decide reorientar la investigación en Europa sobre este tema, e incide en la necesidad de desarrollar proyectos piloto de pequeña escala para demostrar la viabilidad del almacenamiento en la zona continental (*onshore*). CIUDEN, CIEMAT e IGME, a través de CO<sub>2</sub>GeoNet, se implican en el Proyecto ENOS (2016 – 2020), cuyo objetivo coincide con esta nueva política de la Comisión.

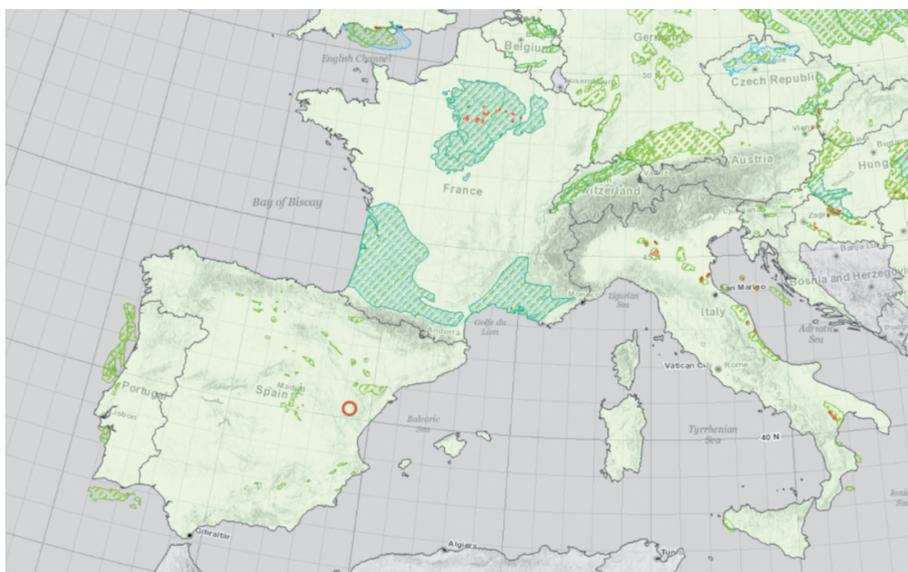
### 3.3. Lento resurgimiento (2019 - ¿?)

Los avances conseguidos en los proyectos antes mencionados y la lenta evolución positiva del precio del CO<sub>2</sub> en los mercados de emisión fueron, poco a poco, reactivando el interés por las tecnologías CCS. La adopción de los ambiciosos objetivos climáticos de la cumbre de París (COP-21, 2015) por

parte de la Unión Europea hacen necesario contar con todas las tecnologías disponibles en la reducción de las emisiones de los sectores regulados.

El enfoque de *hubs and clusters* se plasma en el Proyecto Strategy CCUS (2019 – 2021), en el que participan IGME y CIEMAT, cuyo objetivo es definir planes estratégicos para el desarrollo de tecnologías CCUS en el sur y este de Europa a corto, medio y largo plazo. Para ello, se han propuesto 8 regiones preferentes de 7 países, seleccionadas por la presencia de industrias emisoras de CO<sub>2</sub>, existencia de transporte, potencial para utilización de CO<sub>2</sub> e identificación de almacenes geológicos. Dichos planes estratégicos se desarrollarán en primer término a nivel local, basado en organización tipo clúster para, posteriormente, evaluar la posibilidad de establecer corredores transeuropeos creando una red de CO<sub>2</sub> similar a la del Mar del Norte.

En este periodo, se ha hecho pública, por parte del Joint Research Council, JRC, la primera base de datos europea de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, basada en el Proyecto CO2Stop, y que por fin está disponible como un atlas interactivo, a través de la Infraestructura Europea de Datos Geológicos (EGDI), gestionada por la Asociación de Servicios Geológicos Europeos, Euro-GeoSurveys.



*Fig. 5. Detalle del Sistema de Información Geográfica de la base de datos europea basada en CO2STOP (EGDI, 2020)*

En el plano legislativo y político, los Acuerdos de París han traído como consecuencia una serie de obligaciones para los estados miembros de la UE, como es la redacción de estrategias nacionales frente al Cambio Climático, que deben traducirse en planes específicos para la transición energética y la adaptación al Cambio Climático. En este momento, España se encuentra en un estado avanzado de desarrollo de estos instrumentos, habiendo definido un nuevo Marco Estratégico sobre clima y energía (2021 – 2030), y remitido

a la Comisión Europea el borrador de Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), y a las Cortes Generales el anteproyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética. Aunque el PNIEC contempla la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> como una vía para la reducción de las emisiones de los sectores industriales y de generación eléctrica, no hay un desarrollo sobre su potencial de aplicación, ni se valora como tal en un anteproyecto de ley que no presenta regulaciones específicas de descarbonización para los sectores industriales, pese a que son responsables del 17% de las emisiones nacionales en 2019.

#### 4. CONCLUSIONES

En definitiva, las tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> están implantándose a escala mundial, aunque con diferentes ritmos según la región. Pese a que Europa fue pionera en el desarrollo de las tecnologías, hoy en día Estados Unidos, China y Australia concentran los proyectos de mayor envergadura. Los escenarios de los distintos organismos internacionales, desde la Agencia Internacional de la Energía, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático o la propia Comisión Europea, contemplan un papel importante de las tecnologías de captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> en todo lo que queda de siglo, y plantean que es la única opción para la descarbonización de sectores industriales como el cemento, el acero o la petroquímica en las próximas décadas.

En España se han producido avances y logros importantes en los últimos 15 años, teniendo una evaluación completa del territorio nacional en cuanto a estructuras y formaciones geológicas con capacidad de almacenamiento, derivada del Plan ALGECO2. Durante años, la PDT de Hontomín, pese a sus limitaciones, ha sido la única planta piloto activa de almacenamiento en tierra en Europa y muchos de sus trabajos han sido una referencia mundial. La participación de los organismos de investigación españoles, especialmente IGME y CIEMAT, en proyectos de los sucesivos Programas Marco de Investigación de la Comisión Europea, sitúa a España en una buena posición frente a los retos que se plantean en el corto plazo para el despliegue de las tecnologías en aplicación del enfoque de *hubs and clusters*, que puede tener en España alguna de sus regiones pioneras.

En este aspecto, cabría pedir de las autoridades nacionales una mayor implicación de estas tecnologías en los planes de descarbonización y una apuesta decidida por su aplicación en los sectores regulados por el Plan Nacional de Asignación de Emisiones, como única vía para sostener y fomentar el desarrollo del sector industrial de forma compatible con la reducción de sus emisiones.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen todo el trabajo de nuestros compañeros del Instituto Geológico y Minero de España a lo largo de los años en todos los proyectos que se mencionan en el texto, y especialmente a Miguel Ángel Zapatero e Isabel Suárez por su decisiva participación en el impulso inicial. Asimismo, agradecemos a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Mi-

nas y Materiales de Oviedo la posibilidad de participar en este libro, y en especial a Jorge Loredo y Fernando Pendás (*in memoriam*), su permanente colaboración en los trabajos, las actividades de formación y divulgación que se han realizado en todo este tiempo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EGDI, 2020. Base de datos CO2Stop. Disponible online:  
<https://data.geus.dk/egdi/#baslay=baseMapGEUS&optlay=&extent=1334190,1648050,6442560,4783160&layers=co2stop>
- Furre, A. K., Eiken, O., 2017. 20 years of monitoring CO<sub>2</sub> injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 114: 3916-3926.
- Global CCS Institute, 2020. *Global Status of CCS 2019: Targeting Climate Change*. Annual report, 83 p.
- Jaime-Muñoz, G., Cervantes, L., Benavides, A., Sastre, F., 2015. Discrete perturbation theory for continuous potential fluids. *The Journal of Chemical Physics*, 142(11): 114501
- Proyecto ALGECO2, 2020. Disponible online: <http://info.igme.es/geologiasubsuelo/AlmacenamientoCO2/Algeco2.aspx>.
- Proyecto ENOS. Disponible online: [www.enos-project.eu](http://www.enos-project.eu).
- Proyecto STRATEGY CCUS. Disponible online: [www.strategyccus.eu](http://www.strategyccus.eu).
- Suárez, I. (Ed.), 2014. *Atlas de estructuras susceptibles de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en España*. Ed. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.
- The Global CCS Institute. Disponible online: [www.globalccsinstitute.com](http://www.globalccsinstitute.com).
- Vangkilde-Pedersen, T., Lyng Anthonsen, K., Smith, N., Kirk, K., Neele, F., van der Meer, B., Le Gallo, Y., Bossie-Crodeanud, D., Wojcicki, A., Le Nindre, Y.M., Hendriks, C., Dalhoff, F., Christensen, N.P., 2009. Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide. The EU GeoCapacity project. En: Gale, J., Herzog, H., Braitsch, J. (Eds.), *Greenhouse Gas Control Technologies*, 9. Proceedings of the Ninth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT9). *Energy Procedia*, 1: 2662-2670.