

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

STRATEGY CCUS

El almacenamiento geológico de CO₂ como solución viable para un futuro sostenible y su aplicación en la cuenca del Ebro





Autor Principal: Jesús García Crespo (IGME)

Otros autores: Paula Canteli (IGME); Roberto Martínez (IGME); Julio Carneiro (UEVORA); Fernanda de Mesquita (BRGM); Peter Brownsort (UEDIN); Romain Viguier (UEDIN); Andrew Cavanagh (UEDIN)

1. RESUMEN

STRATEGY CCUS es un proyecto de tres años financiado por la Unión Europea dentro del programa Horizonte 2020 para apoyar el desarrollo de energía e industria bajas en carbono en el sur y este de Europa. Se centra en ocho regiones europeas seleccionadas por su nivel de emisiones de CO₂ y potencial para la captura, utilización y el almacenamiento geológico. El proyecto tiene como objetivo alentar y apoyar iniciativas en estas regiones mediante la elaboración de un plan de desarrollo local y modelos de negocio adaptados a las necesidades de la industria. Estas ocho regiones, en conjunto, representan un 45% de las emisiones producidas por la generación de energía e industria europea durante 2016.

Dentro del proyecto, se ha adoptado una metodología básica para la definición de agrupaciones industriales regionales válidas para la captura, transporte, utilización y almacenamiento (CAUC) (industrial cluster for CCUS, ICCUS) donde deben quedar definidas (Figura 1):

- Qué emisiones de CO₂ pueden ser de interés (fuentes, volumen, riqueza)
- Cómo puede ser capturado y transportado el CO₂
- Qué uso podemos dar a este CO₂ y qué volumen se puede utilizar
- Dónde almacenar el CO₂ restante y qué características tienen que cumplir estos almacenes geológicos

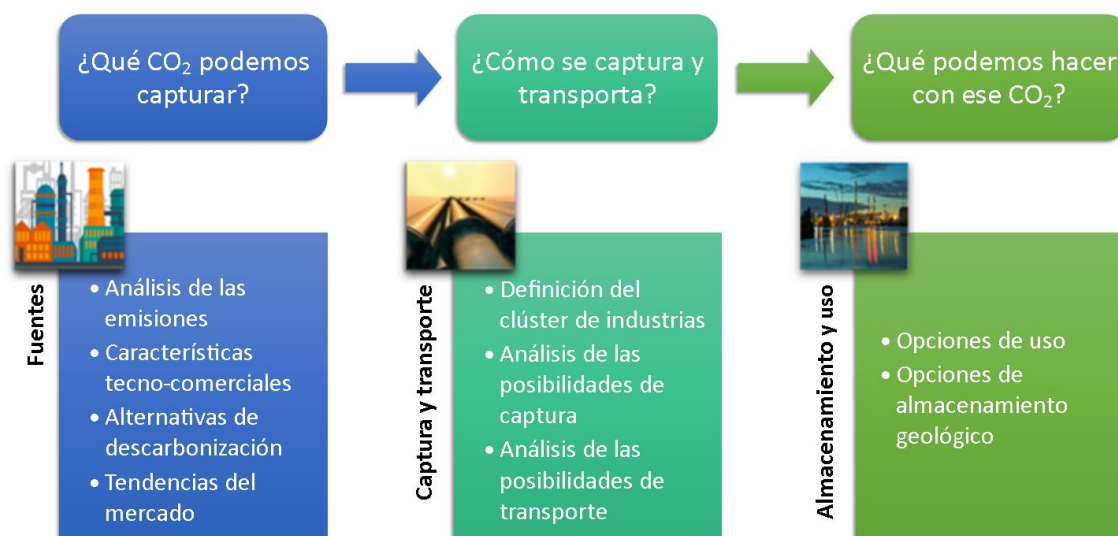


Figura 1. Metodología para la definición de clústeres

Dentro del proyecto, se han recopilado los datos e información necesarios para la definición de los clústeres regionales (Figura 2). Esta base de datos georreferenciada es la base para la definición de los clústeres y el análisis de los posibles diferentes escenarios [6].

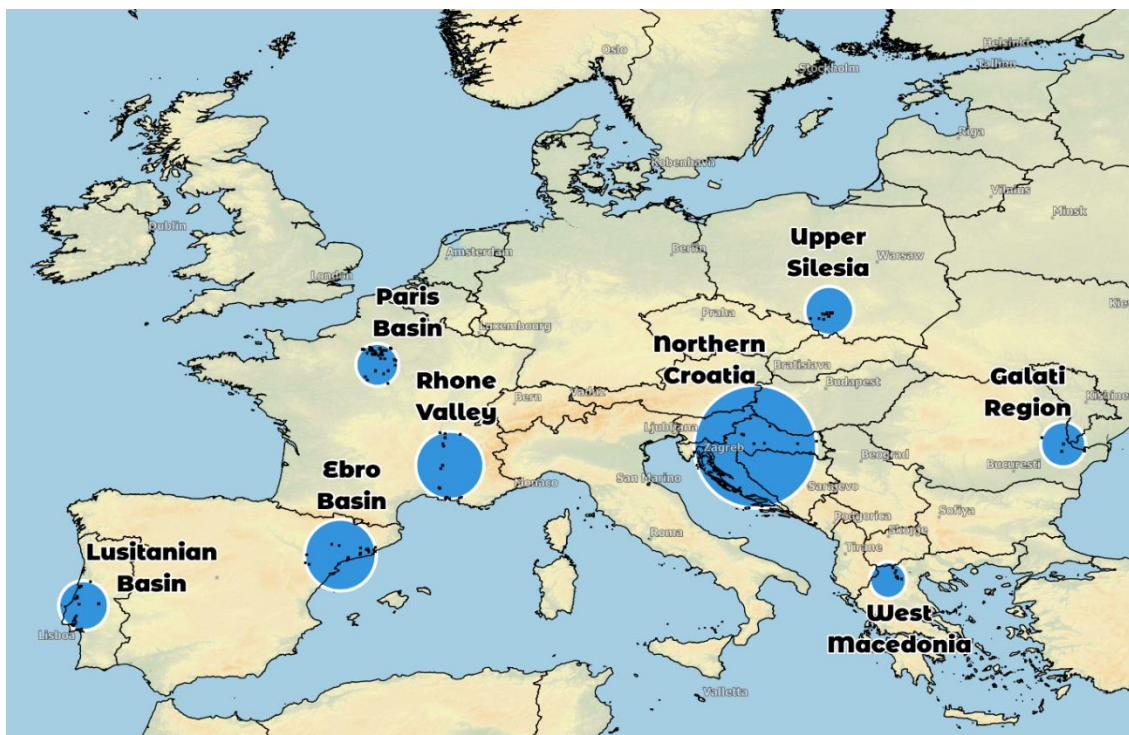


Figura 2. Regiones estudiadas en el proyecto STRATEGY CCUS

En el caso de España, se ha seleccionado como zona de estudio la denominada *Cuenca del Ebro*, un área que incluye principalmente las provincias de Tarragona y Teruel. La selección de esta zona se debe a que reúne todos los elementos clave para el estudio: potencial industrial, tanto como fuentes emisoras como para posible uso del CO₂ (cementerías, químicas, cerámicas, petroquímicas, papeleras y residuos sólidos urbanos, por ejemplo), amplia red de transporte y potencial para corredores de CO₂ con Francia y Portugal, tanto por tierra como por mar; y gran capacidad de almacenamiento geológico de acuerdo con las estimaciones hechas por el IGME dentro del proyecto ALGECO2 [1] y recogidas en el proyecto europeo GeoCapacity.

Sin embargo, un clúster industrial representa más que una simple agrupación de empresas e instalaciones industriales: la posibilidad de cumplir con el objetivo de emisiones cero con un coste compartido permite mantener la presencia de esta industria en la zona; alentar nuevas inversiones en industrias baja en carbono, desarrollo de tecnologías de uso y aprovechamiento; y mantener la economía de la zona y el bienestar social a través del empleo y la mejora de la calidad del aire local.

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención no 837754.

2. ÁMBITO GEOGRÁFICO Y OBJETIVOS

El área para el estudio se ha elegido atendiendo a dos criterios principalmente, que son la presencia de fuentes puntuales emisoras de CO₂ importantes y la existencia de estructuras geológicas con potencial de almacenamiento. Para el primero de ellos se ha realizado una selección de los emisores de la zona industrial de Tarragona, así como focos del área industrial de Barcelona y otros puntos más dispersos situados en las provincias de Teruel y Lleida. Se ha

definido un área de radio 150km en torno al núcleo industrial principal que constituye Tarragona (Figura 3).

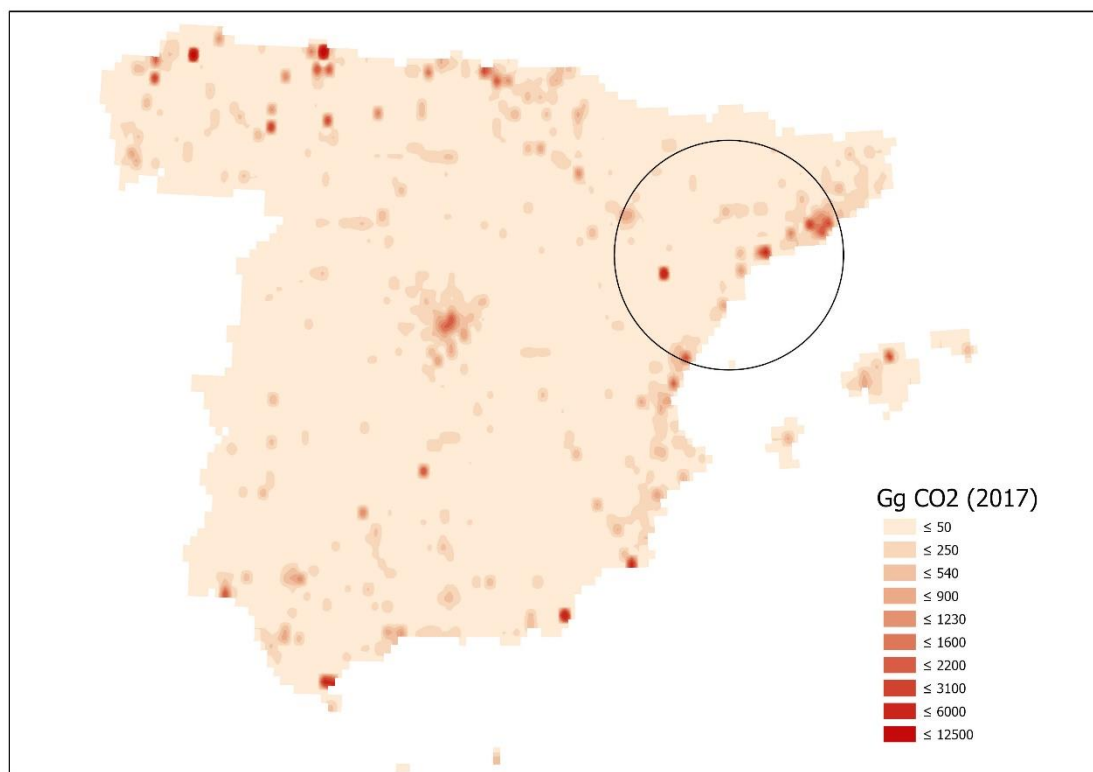


Figura 3. Concentración de emisiones de CO₂ para el año 2017 (elaborado a partir de datos de [2])

Los datos recopilados sobre la captura, el transporte, la utilización y las condiciones de almacenamiento se incluyen en una base de datos y constituyen la base para la evaluación de la viabilidad de la implantación de clústeres de CAUC.

Se han seleccionado las estructuras geológicas con formaciones adecuadas para almacenar CO₂, dentro de la misma área. Los datos utilizados provienen de proyectos de investigación que ha realizado el IGME con anterioridad con el objeto de buscar almacenes geológicos con el mismo fin.

3. METODOLOGÍA UTILIZADA

Son cinco aspectos los que se abordan:

- Emisiones y sectores, centrándose en aquellos con posibilidades de incorporar la captura de CO₂.
- Capacidad de almacenamiento, considerando las estimaciones de proyectos previos.
- Condiciones espaciales para el desarrollo de la red teniendo en cuenta la distribución geográfica de los focos y los almacenes y las condiciones de transporte.
- Opciones de utilización de CO₂, considerando solamente aquellas actividades en

funcionamiento o planeadas que puedan tener un impacto significativo en la reducción de emisiones de CO₂.

- Potencial de desarrollo de CAUC.

Este último aspecto tiene en consideración una serie de características necesarias [5] que reflejan las fortalezas y debilidades de cada clúster y que sirven para describir los clústeres potenciales para CAUC (Cuadro 1). Además de estas características técnicas se deben tener en cuenta los aspectos sociales de aceptación y apoyo por parte de los grupos interesados, el público y las autoridades.

Cuadro 1. Características que describen el potencial de los clústeres para CAUC

GRUPO	Característica / factor	Comentario para clúster
EMISIONES	Distribución de la ubicación de las emisiones	¿Qué tan "agrupada" está el área? ¿Hay pocos o muchos focos de emisión en las instalaciones?
	Distribución del volumen de emisión	¿Hay emisores "ancla", varios emisores grandes, muchos emisores pequeños?
	Perfil de volumen de emisión	¿Las instalaciones están en riesgo / cerrando, o se está realizando una inversión, hay variación estacional?
	Tipo y calidad de las emisiones	¿Hay emisiones de proceso significativas, hay emisiones de alta concentración, hay contaminantes problemáticos?
AREA	Carácter de área industrial	¿Es urbano o remoto, grande o pequeño, disperso o denso?
	Importancia de la industria	¿Es el área predominantemente industrial, es la industria el principal empleador en el área?
	Reconocimiento de clústeres	¿Existe una mentalidad de clúster, un historial de enfoque de clúster, resultados de estudios existentes?
INDUSTRIAS	Integración de la industria	¿Existe una cultura común, organismos intersectoriales, interdependencia de servicios, recursos compartibles, etc.?
	Alternativas de descarbonización	¿Qué alcance / viabilidad para la eficiencia energética, electrificación o biomasa, hidrógeno?
	CCU	¿Qué potencial para CCU, es "determinante", p. ej. demanda de EOR o disponibilidad de gas de síntesis?
	Motivación para la descarbonización	¿La industria dará prioridad a la descarbonización?
	Motivación para CCS	¿Puede la industria beneficiarse de la CAC?
INFRAESTRUCTURA	Opciones de recolección de CO ₂	¿Existen corredores de tuberías, enlaces ferroviarios, terminales de CO ₂ líquido (L-CO ₂), existen restricciones geográficas o de otro tipo en las rutas de recolección?
	Opciones de consolidación de CO ₂	¿Hay sitio disponible para los <i>hubs</i> de unión, p. ej. para almacenamiento intermedio, procesamiento centralizado, compresión o licuefacción?
	Infraestructura de CO ₂ existente	¿Existe alguna experiencia u operaciones de captura, transporte o utilización?

	Opciones de reutilización de infraestructura	¿Existen oleoductos, puertos, terminales relevantes?
ALMACENAMIENTO	Accesibilidad de almacenamiento	¿Está el área cerca de sitios de almacenamiento de CO ₂ potenciales conocidos?
	Capacidad de almacenamiento	¿El almacenamiento accesible tiene capacidad, inyectividad y seguridad adecuadas?
	Flexibilidad de almacenamiento	¿Existen alternativas al sitio de almacenamiento primario?
	Integración de desarrollo de almacenamiento	¿Existe una organización interesada / capaz de desarrollar almacenamiento?

Para el **estudio de las emisiones** se han recopilado datos estructurados en tres niveles:

- Nivel 1. Información básica sobre instalaciones industriales, ubicación y emisión necesaria para el análisis inicial de emisiones. Procedente de fuentes públicas, es la información inicial necesaria para la definición de los clústeres. Son datos como la identificación de la industria, ubicación, sector, emisiones de CO₂ declaradas, etc.
- Nivel 2. Información técnica básica sobre los procesos y las propiedades de los gases de combustión necesarios para desarrollar opciones de clústeres de captura, además de cualquier conocimiento de las tecnologías de captura adecuadas. Incluye datos de concentración de CO₂, flujo, temperatura, presión o tipo de combustible utilizado.
- Nivel 3. Información técnica y de producción más detallada para el análisis técnico económico y del ciclo de vida en instalaciones industriales seleccionadas, como datos detallados acerca de la composición de los gases emitidos, la producción y los consumos de materias primas.

Estos datos se han obtenido principalmente del Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR) [2]. Esta base de datos incluye información muy completa por cada foco de emisión, de la cual se han extraído las emisiones a la atmósfera y datos como la ubicación y consumos de materias primas. No obstante, en muchos casos la información no está completa o es insuficiente para alcanzar los tres niveles citados, por lo que se solicitó a la Dirección General de Calidad Ambiental de Cataluña y a la de Aragón información complementaria. También se recabó información de la agrupación de fabricantes de cemento de España (Oficemen) para las instalaciones de las industrias cementeras.

Parte de los parámetros se ha conseguido de otras fuentes, como la base de datos de grandes plantas de combustión (LCP) de la EEA, del proyecto Hotmaps (Heating and Cooling Open Source Tool for Mapping and Planning of Energy Systems), del Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE) y de las autorizaciones ambientales publicadas en los boletines oficiales.

Respecto a los posibles **almacenes geológicos**, se han utilizado los resultados de proyectos previos realizados por el IGME, principalmente del proyecto ALGECO2 llevado a cabo en el marco de la ley 40/210 de Almacenamiento Geológico de CO₂. Del total de lugares propuestos como susceptibles de ser almacenes geológicos, se han seleccionado los situados en el entorno de los focos emisores, dentro del área de estudio. Del mismo proyecto, se han extraído los datos requeridos para hacer las estimaciones, que se han agrupado en una serie de categorías, como ubicación, características geológicas, propiedades petrofísicas, condiciones de almacenamiento

esperadas, factor de eficiencia (SEF) y estimación de la capacidad. Este último es el factor determinante para establecer el criterio de selección de posibles almacenes geológicos de entre los candidatos. Partiendo de las capacidades estimadas con anterioridad, inicialmente se estableció el límite de 50Mt, resultando seleccionadas 7 estructuras.

Con el fin de unificar las estimaciones para las diferentes regiones que participan en el proyecto STRATEGY CCUS, se revisó la evaluación de los recursos con un enfoque en dos partes. Primero se utilizó una pirámide de recursos por niveles para la capacidad basada en el método del CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum). Después se siguió el método del Atlas noruego [3] de juicio experto para características distintas de la capacidad. Este se presta a un análisis BSA (Boston Square Analysis) de idoneidad y calidad de los datos para una variedad de aspectos, desde la calidad del sello y la inyectividad del yacimiento hasta las consideraciones sobre fallas y pozos (Figura 4). Los resultados se pueden incorporar a un análisis SRMS (Storage Resource Management System) y a una clasificación del grado de madurez del almacenamiento.

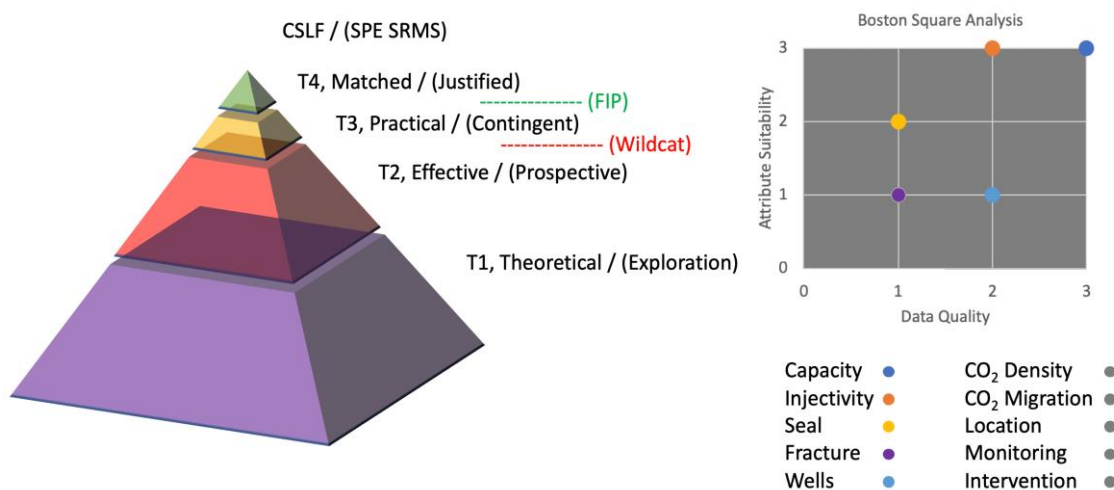


Figura 4. Pirámide de capacidad de cuatro niveles con terminología CSLF y SRMS y análisis Boston Square [5]

El enfoque de la estimación de la capacidad en pirámide consiste en cuatro niveles que reflejan el aumento de la madurez de los datos y el conocimiento de los almacenes potenciales, desde aproximaciones regionales hasta candidatos específicos.

- Nivel 1 - Evaluación regional; equivalente a prospectivo (teórico), con SEF genéricos. Estimación de la unidad de formación y almacenamiento. Es una primera aproximación, con carga de datos baja y valores de eficiencia de almacenamiento global donde las condiciones de los límites están poco restringidas o son inciertas.
- Nivel 2 - Evaluación de descubrimiento; equivalente a contingente baja (efectiva), con SEF específicos. Estimaciones de unidades hijas. Segunda aproximación con carga de datos moderada y factores de eficiencia de almacenamiento regional específicos de la litología. Se establecen las condiciones de límite.
- Nivel 3 - Evaluación de prospectos; equivalente a pendiente/en espera (Práctica), datos detallados de posibles candidatos. Tercera aproximación con una carga de datos más exigente, incluidos los atributos secundarios de los principales factores utilizados para estimar la capacidad y los factores de eficiencia de almacenamiento local específicos de

la litología. Cada prospecto candidato requiere la adquisición de datos existentes o específicos suficientes para construir un geomodelo simple para una primera simulación y la consideración de la ubicación del pozo.

- Nivel 4 - Evaluación del sitio; equivalente a proyecto justificado/aprobado/en inyección (real). Son sitios de almacenamiento específicos, con una aproximación final antes de la operación. Esto tiene la mayor carga de datos y requiere un geomodelo detallado para los estudios de simulación de yacimientos. Los resultados de las simulaciones prueban la precisión de los factores de eficiencia del almacenamiento y proporcionan escenarios para maximizar la capacidad en función de la planificación y programación del pozo.

La evaluación de la capacidad se basa en el método de estimación P_{90} - P_{50} - P_{10} desde estimaciones del almacenamiento genérico a nivel de formación y de unidades hijas hasta estimaciones más detalladas y maduras de prospectos y yacimientos, es decir, se aplica en cada uno de los niveles de la pirámide. Depende de parámetros normalizados, como el volumen total, la porosidad, el espesor neto y la densidad del CO_2 , además del factor de eficiencia. Este valor representa la fracción de volumen de poros ocupada por el CO_2 y en sistemas salinos varía entre el uno y el dos por ciento, pudiendo alcanzar hasta el doce por ciento [3], pero depende de factores como el tipo de sistema (si es un sistema abierto, cerrado o semicerrado), del método de cálculo (analítico o simulado) o del tipo de simulación (estática o dinámica).

El método de cálculo de la capacidad empleado en el proyecto ALGECO2 es el utilizado ampliamente para las formaciones salinas:

$$M_{CO_2} = V \varnothing \rho_{CO_2} SEF$$

Donde:

- M_{CO_2} capacidad de almacenamiento de CO_2 (t)
- V volumen de la estructura (m^3)
- \varnothing porosidad media del almacén (%)
- ρ_{CO_2} densidad del CO_2 en condiciones del almacén (t/m^3)
- SEF coeficiente de almacenamiento (estimado o conocido)

La capacidad resultante se refiere al CO_2 en estado supercrítico, pues se seleccionaron ubicaciones con condiciones de presión y temperatura estimadas que permitieran conservarlo en ese estado. Se utilizó un factor de eficiencia genérico del 30%, como primera aproximación, con lo que los valores estimados de capacidad parecen optimistas. No obstante, la definición de las estructuras en profundidad es bastante detallada, gracias a los datos geofísicos de los que se disponía y que permitieron definir los límites de las trampas y calcular los volúmenes de forma bastante aproximada, pudiendo considerarlas como unidades hijas. Esto equivaldría a un nivel de conocimiento situado entre los niveles 1 y 2 de la pirámide.

Para afinar los valores de los coeficientes de almacenamiento y promover el grado de madurez al nivel 2, hemos recurrido a aplicar el método CO_2 -SCREEN propuesto por el NETL (National Energy Technology Laboratory) [4]. Consiste en una hoja de cálculo de Excel en la que se introducen valores de parámetros petrofísicos y se establecen rangos de factores de eficiencia y en la que se devuelven las estimaciones de recursos de almacenamiento de CO_2 . Está vinculada a un modelo GoldSim Player que calcula los recursos de almacenamiento de CO_2 prospectivos a

través de la simulación de Monte Carlo. A partir de los datos de área, espesor total, porosidad total, presión, temperatura y litología y medio sedimentario se obtuvieron la capacidad del almacén y el factor de eficiencia, con valores de percentiles P₁₀, P₅₀ y P₉₀. Para el conjunto de las 21 estructuras, la capacidad queda reducida en promedio en un 63% con respecto a los cálculos anteriores.

La puntuación de idoneidad y calidad de los datos para el análisis BSA se ha hecho de acuerdo con los criterios detallados en el Atlas noruego (Figura 5). Criterios similares se habían aplicado ya en el proyecto ALGECO2 con participación de expertos, por lo que esos resultados han sido la fuente principal para la calificación de los atributos.

Attribute	Criteria	Score	Comments
Storage Suitability	Capacity	3	Large volume, dominant high scores in checklist
		2	Medium - low volume, low score in some factors
		1	Dominant low values, or scores close to unacceptable
	Injectivity	3	High value for permeability * thickness (k*h)
		2	Medium k*h
		1	Low k*h
Seal Suitability	Seal	3	Good sealing shale, dominant high scores in checklist
		2	At least one sealing layer with acceptable properties
		1	Seal with uncertain properties, low scores in checklist
	Fracture	3	Dominant high scores in checklist
		2	Insignificant fractures, either natural or wells
		1	Low scores in checklist
	Wells	3	No previous drilling in reservoir, safe plugging of wells
		2	Wells penetrating seal, no leakage documented
		1	Possible leaking wells, need for evaluation
Other Suitability Attributes	CO ₂ Density	3 / 2 / 1	Supercritical, high density gas, or low density gas
	CO ₂ Migration	3 / 2 / 1	Low migration risk, moderate ris
	Location	3 / 2 / 1	Location suitability relative to other sinks and sources
	Monitoring	3 / 2 / 1	Suitability of site for performance monitoring
	Intervention	3 / 2 / 1	Suitability of site for remedial interventions
	Upside	3 / 2 / 1	Sutiability of site for growth as a storage hub
Data Quality	All Criteria	3	No previous drilling in reservoir, safe plugging of wells
		2	Wells penetrating seal, no leakage documented
		1	Possible leaking wells, need for evaluation

Figura 5. Rangos de referencia para la calidad de los principales atributos [5]

Para conocer las **condiciones espaciales** para el desarrollo de la red, se recopilaron datos geográficos, ambientales y de infraestructuras existentes que pueden condicionar el diseño de la red, procedentes de diversas plataformas como EMODNET, IGN, SIOSE, CNIG, MITECO, IDE Aragón, IDE GENCAT, IDE GVA, IHM y IEO. La información se ha estructurado en diferentes categorías: modelo de elevaciones del terreno, batimetría, usos del suelo, vías de comunicación, hidrografía, áreas protegidas, gasoductos, zonas de planeamiento, zonas de planificación marina, tipos de fondos marinos y zonas con otras restricciones.

Los datos espaciales anteriores, junto con los de ubicación de focos y almacenes, así como los atributos alfanuméricos correspondientes, se integraron en un SIG para su análisis.

4. EMISIONES Y SECTORES INDUSTRIALES

A partir de la base de datos del PRTR [2] se han seleccionado las fuentes emisoras incluidas en el área de estudio y cuyas emisiones de CO₂ superan las 100.000 toneladas en el año 2017, fecha de la última actualización al inicio del proyecto. El conjunto para realizar el estudio lo forman 26 fuentes de un total de 270 focos industriales (Figura 6).

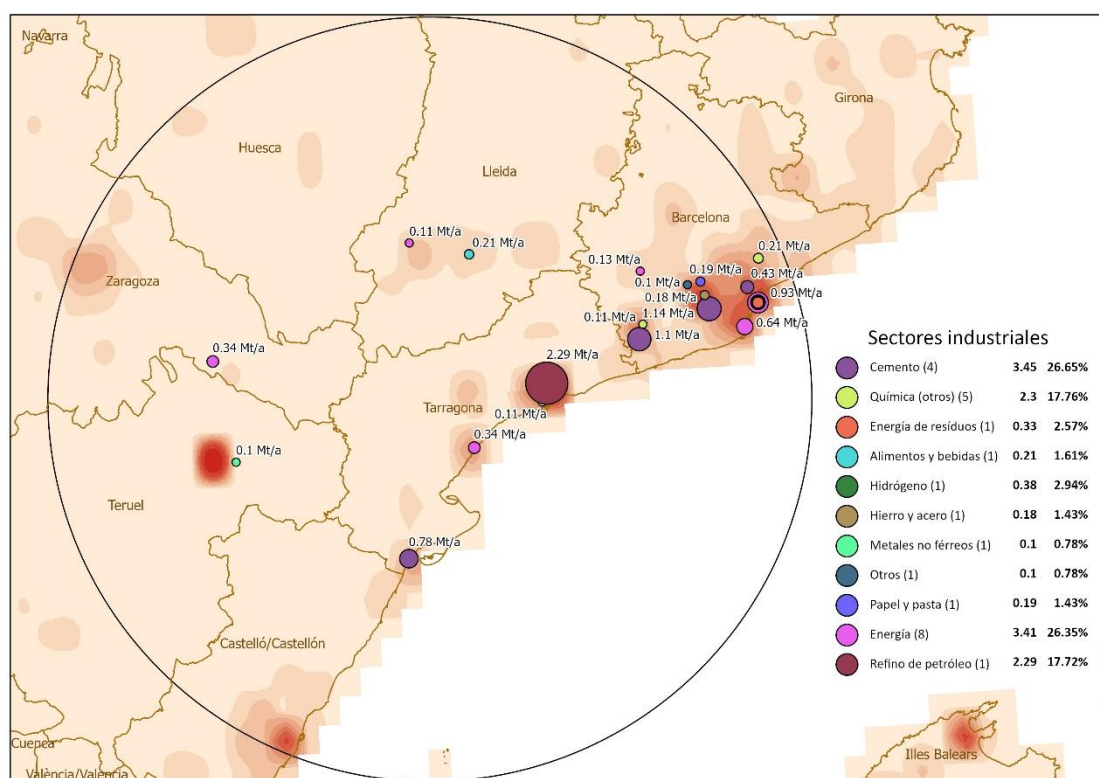


Figura 6. Focos de emisiones de CO₂ para el año 2017 (elaborado a partir de datos de [2])

El total de emisiones para las fuentes seleccionadas supone 17,74 Mt, siendo los sectores energético, cementero y químico los dominantes, tanto en número de instalaciones como en emisiones, que constituyen el 79%. La central térmica de Andorra es el mayor emisor de la zona, con 4,81 Mt, sin embargo su actividad cesó en junio de 2020, con lo que la refinería de Repsol de la Poble de Mafumet, en Reus, pasa a ser el principal foco con 2,29 Mt. Los siguientes focos en importancia son dos cementeras en los alrededores de Barcelona y una planta química en Reus, los tres con más de 1 Mt. Otros focos importantes se localizan principalmente en las áreas industriales de Barcelona y Reus, exceptuando la cementera de Alcanar con 0,78 Mt (Figura 7).

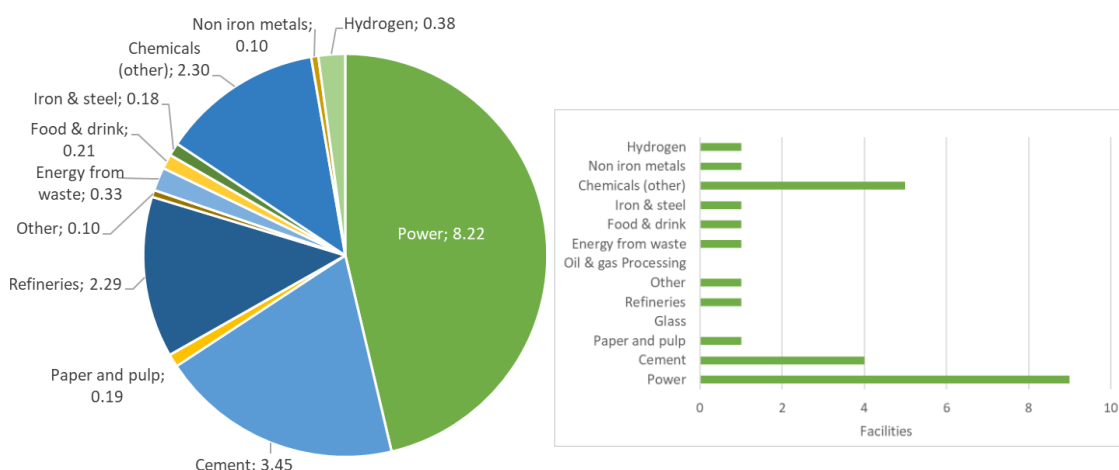


Figura 7. Emisiones (en Mt/año) e instalaciones por sectores en 2017 [6]

Con respecto a la tendencia de las emisiones, aparte de la importante reducción que supone el cierre de la central de Andorra, existe una reducción en el sector del cemento, mientras que en el resto parece haber una estabilización, salvo en tres focos en los que hay un aumento.

La principal fuente de las emisiones es la quema de combustibles fósiles, principalmente gas natural, utilizado en 15 instalaciones, seguido del coque de carbón y de petróleo, en 6. Después están el gas de refinería y petroquímico y otros combustibles gaseosos.

Las alternativas de descarbonización para la mayoría de las instalaciones serían la eficiencia energética, cambio a biomasa o a hidrógeno, pero las alternativas son menos obvias para las instalaciones en las que las emisiones inducidas por los procesos son más relevantes, lo que las convierte en candidatas para la implementación de planes de CAUC industrial. Las plantas cementeras son las que tienen unas mayores emisiones ligadas al proceso, con un 62 a 69% de las emisiones no relacionadas con la combustión.

5. POSIBILIDADES DE ALMACENAMIENTO DE CO₂

Las posibilidades de almacenamiento de CO₂ en la zona de la Cuenca del Ebro se circunscriben únicamente a acuíferos salinos en tierra firme (*onshore*). Se han considerado 21 unidades geológicas susceptibles de ser almacenes con condiciones adecuadas, que fueron identificadas en el proyecto ALGECO2 (Figura 8). Se realizó una selección de las unidades con una capacidad estimada superior a los 50 Mt, según los cálculos ya existentes, de la que resultaron 7 estructuras. Tras la revisión de las estimaciones aplicando la metodología expuesta en el apartado 3, las capacidades se redujeron sustancialmente, siendo capacidad total estimada de **299 Mt**.

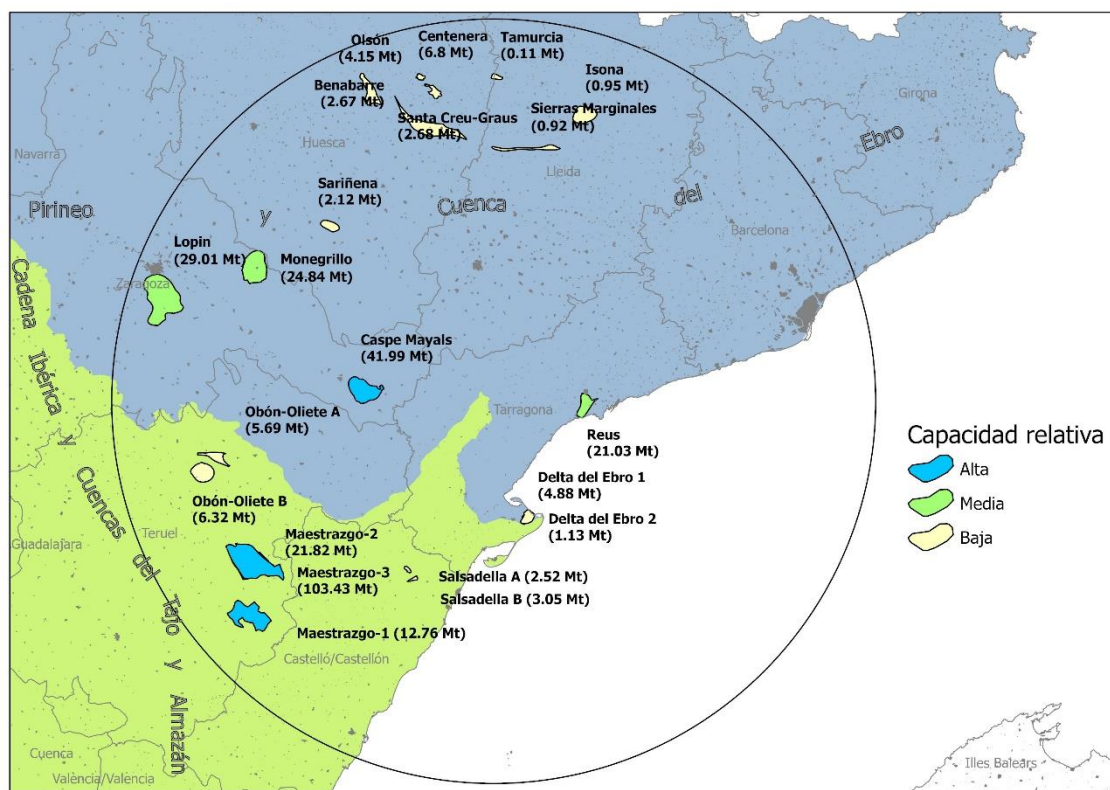


Figura 8. Almacenes geológicos propuestos [1]

Las unidades seleccionadas están distribuidas en dos dominios geológicos mesozoicos: la Cadena Ibérica y la Cuenca del Ebro. En el primero se ha elegido la zona denominada Maestrazgo, que incluye 3 posibles almacenes, denominados a su vez Maestrazgo-1, Maestrazgo-2 y Maestrazgo-3. Los dos primeros constan de varias terminaciones anticlinales de las cuales solo se han seleccionado las de mayor capacidad estimada. El resto podrían ser candidatas para posteriores estudios.

Las estructuras consideradas dentro de la **Cadena Ibérica** son:

- **Maestrazgo 3.** Serie silicástica con la facies Buntsandstein como formación almacén y sellada por la facies arcilloso evaporítica del Buntsandstein (facies Röt). Capacidad estimada: 103,43 Mt.
- **Maestrazgo 2.** Serie dolomítica del Muschelkalk III como formación almacén, sellada por las facies arcillosas evaporíticas del Keuper. Capacidad estimada: 21,82 Mt.
- **Maestrazgo 1.** Formación almacén dolomítica del Triásico superior (formación Imón), y formación sello anhidritas del Lías inferior (formación Cortes de Tajuña). Capacidad estimada: 12,76 Mt.

En el dominio de la **Cuenca del Ebro** hay 12 estructuras, de las cuales se han seleccionado 4:

- **Lopin.** Serie triásica con formación almacén siliciclástica de arenas y conglomerados fluviales de facies Buntsandstein y formación sello de arcillas de facies Röt de la misma edad. Capacidad estimada: 29,01 Mt.
- **Monegrillo.** Formación almacén fluvial siliciclástica de arenas finas y gruesas de la facies

Buntsandstein y formación sello de facies Röt. Capacidad estimada: 24,84 Mt.

- **Caspe-Mayals.** Serie fluvial del Triásico inferior de arenas, conglomerados y arcillas fluviales interestratificados y formación sello triásica de facies Röt o cenozoica. Capacidad estimada: 41,99 Mt.
- **Reus.** Almacén carbonatado del Jurásico superior (Malm) que es un paleorreliete kartificado, sellado por arcillas rojas del Mioceno (facies Garum). Capacidad estimada: 21,03 Mt.

En comparación con las emisiones actuales de 12,93 Mt/año y dado que las estimaciones posteriores de nivel 3 y 4 probablemente arrojen capacidades de almacenamiento menores, es muy probable que las formaciones no puedan absorber el CO₂ que se pueda capturar en la región. Más aún, la capacidad total está distribuida irregularmente.

La unidad denominada Maestrazgo-3 posee una capacidad estimada de 103,43 Mt, siendo la mayor de todas, a la que se podrían sumar otras 34,6 Mt de otras dos unidades de la misma zona. La siguiente en capacidad estimada es la estructura Caspe-Mayals, con 42 Mt. Ambas estructuras podrían proporcionar el 60% de la capacidad de almacenamiento para la zona (en azul en la figura).

De los restantes 17 almacenes geológicos, hay 3 unidades con capacidad de entre 20 y 30 Mt (en verde en la figura), que suponen el 25%, mientras que las demás representan una capacidad residual por debajo de 10 Mt (en amarillo). Las estimaciones es probable que disminuyan con posteriores análisis más ajustados, por lo que es de suponer que las dos estructuras antes mencionadas sean las únicas que ofrezcan las condiciones para el almacenamiento geológico de CO₂ a gran escala. Lugares de almacenamiento secundarios podrían ser las estructuras de Monegrillo, Reus y Lopín.

Ello no significa que las unidades más pequeñas no se puedan utilizar como almacenes para focos de emisión o grupos de ellos situados en las cercanías. Tal es el caso del almacén de Reus, con capacidad de 21 Mt, que está próximo a los focos de La Pobla de Mafumet, con unas emisiones de 4,98 Mt. En el complejo industrial de Reus, la utilización a gran escala de la CAUC necesitaría recurrir a otras ubicaciones para la inyección de CO₂ durante periodos de más de 4 a 5 años, pero la estructura de Reus sí podría ser un almacén durante varios años para focos aislados. Algo parecido sucede con las estructuras de Monegrillo y Lopín, que podrían ser almacenes adecuados para los focos menores alrededor de la ciudad de Lleida.

No obstante, dadas las cantidades de CO₂ que se emiten en las áreas de Reus y Barcelona, se debería considerar el transporte a larga distancia, de más de un centenar de kilómetros, hasta los almacenes de Maestrazgo y Monegrillo.

En el proyecto no se han incluido posibles almacenes geológicos en el mar (*offshore*). Aunque existen yacimientos de hidrocarburos agotados o en vías de agotamiento y formaciones salinas que podrían resultar favorables, no se dispone de valoraciones previas de estructuras y la información está sujeta a confidencialidad.

6. CONDICIONES ESPACIALES PARA EL DESARROLLO DE CLÚSTERES Y REDES

A simple vista se pueden diferenciar dos clústeres a partir de la distribución espacial de los focos emisores, uno en torno a Barcelona y otro en torno a Reus. Ambas ubicaciones están junto a la costa y alejadas de los principales almacenes geológicos. El primero agrupa 14 focos con un total de emisiones de 6,4 Mt/año (49,5%) y el segundo, 6 focos con 4,98 Mt/año (38,5 %). Los restantes focos dispersos suponen 1,5 Mt/año (11,6 %). Así pues, la distancia desde los clústeres hasta los almacenes geológicos es un factor decisivo para el desarrollo de la red de transporte de CO₂.

Existe un relieve relativamente pronunciado que separa las zonas de emisión de los almacenes. Además, varias zonas montañosas son áreas protegidas. Ello hace que el transporte de CO₂ deba limitarse a las zonas de valle, que ya son los corredores por los que discurren las vías de comunicación y los gasoductos existentes.

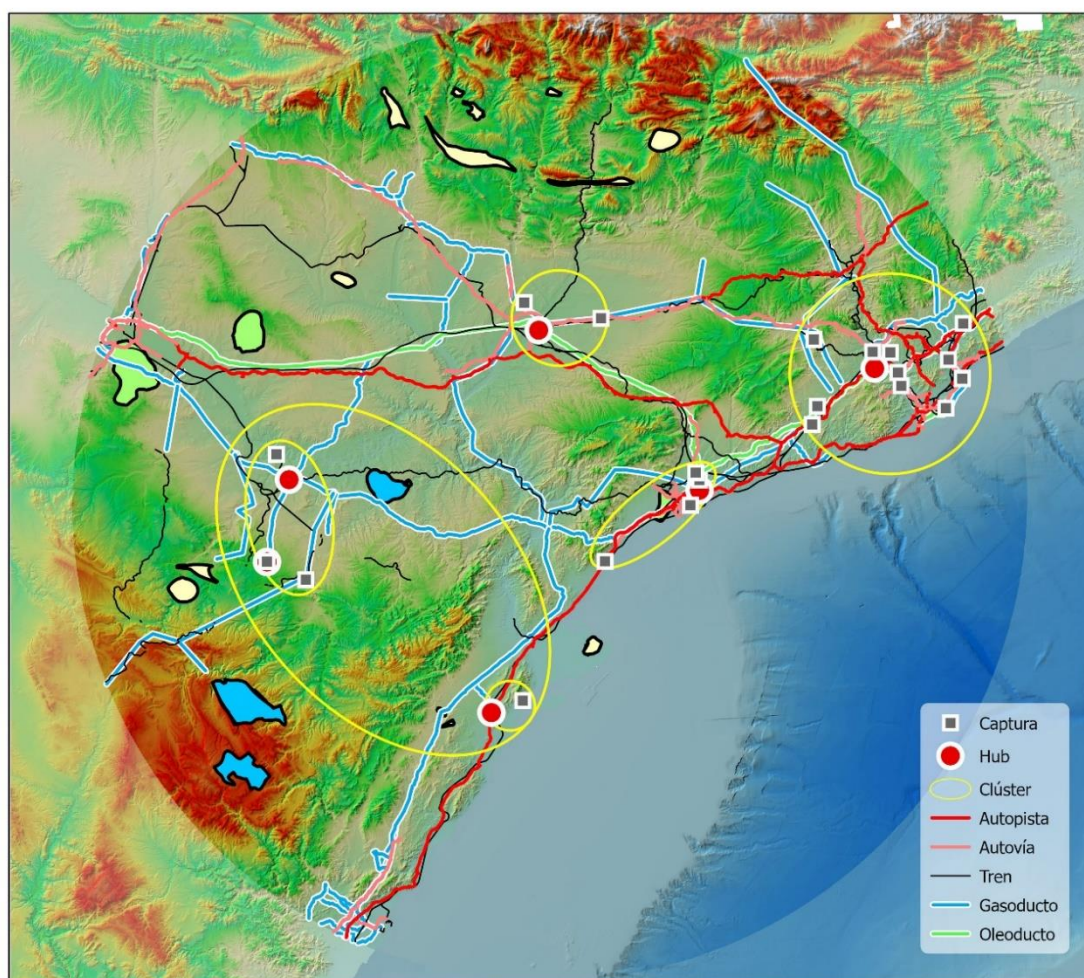


Figura 9. Instalaciones de captura propuestas y red de transporte existente

Para cada foco o grupo de focos, en caso de estar en polígonos industriales, se ha tratado de localizar la ubicación de la instalación de captura correspondiente, atendiendo al espacio

disponible y a la similitud en las características de las emisiones. Por lo general, en las zonas industriales o rurales no supone un gran problema. Sin embargo en las zonas más urbanizadas existe una limitación de espacio. Por otra parte, se han situado nodos (*hubs*) a los que conducir el CO₂ capturado y desde los cuales transportar el gas hacia los almacenes geológicos. Atendiendo a la capacidad necesaria, proporcional al tamaño de cada clúster, habría dos nodos principales coincidiendo con las áreas en torno a Barcelona y Reus, y otros cuatro de menor entidad, en torno a los focos más dispersos (Figura 9).

En general los puntos de captura y los nodos están bien conectados a las infraestructuras de transporte y a los gasoductos en funcionamiento, si bien la opción de transporte por carretera o ferrocarril estaría limitada a los focos de menor entidad, estando además condicionada por el medio urbano. La opción de transporte del CO₂ por gasoductos estaría indicada para volúmenes grandes, aunque la red existente no estaría disponible para tal uso. Sin embargo, sí se podrían construir nuevos gasoductos aprovechando los mismos corredores por los que transcurren. También sería una solución en los casos en que la opción de transporte por carretera o ferrocarril no sea viable.

Dado que las ubicaciones de almacenamiento más prometedoras (Maestrazgo y Caspe Mayals) se encuentran al oeste y suroeste de los focos de Barcelona y Reus, es razonable plantearse una configuración de transporte que, partiendo de Barcelona vaya hacia el SO hasta Reus, y desde un centro de recogida conjunto, se transporte de forma troncal hasta Caspe-Mayals y/o Maestrazgo por el corredor del gasoducto existente que pasa por Tivissa.

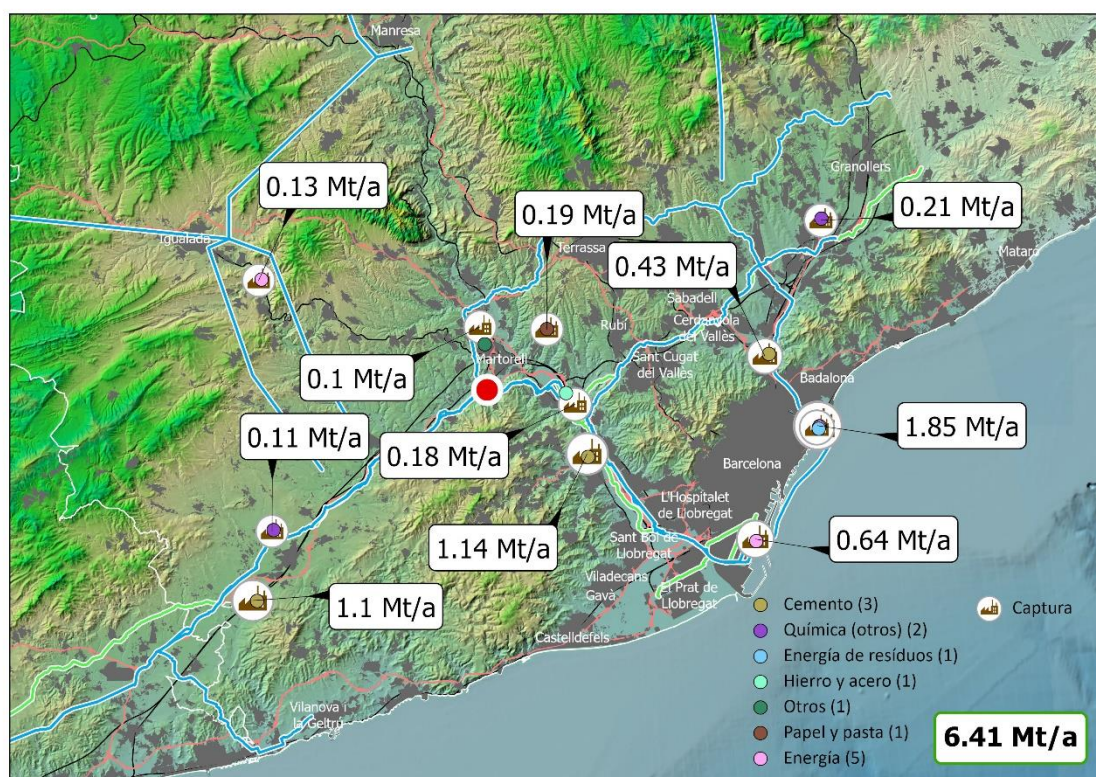


Figura 10. Clúster de Barcelona

En el **clúster de Barcelona**, (Figura 10) catorce de las instalaciones se encuentran en los límites de la ciudad de Barcelona o sus alrededores, lo que supone **6,41 Mt/a** de máximo potencial de

captura. Este grupo de fuentes incluye dos plantas **cementeras** con emisiones superiores a 1 Mt/a, con una tercera planta de cemento que emite 0,43 Mt/a. El sector eléctrico también es relevante, con tres **centrales eléctricas** de combustibles fósiles y una planta de residuos urbanos que emiten 2,49 Mt/a.

Dado el carácter altamente urbanizado del área, puede haber problemas de espacio para construir nuevas instalaciones de captura a gran escala. Cada una de las fuentes puntuales está bien conectada con carreteras y ferrocarriles, y todas las fuentes, excepto una, están conectadas a ramales ferroviarios operativos. Sin embargo, las opciones de transporte por carretera o ferrocarril solo podrían valer para fuentes muy pequeñas de alrededor de 0,1 Mt/a, pero incluso en esos casos, el entorno urbano y suburbano puede convertir esa posibilidad en inviable.

Todas las fuentes potenciales en Barcelona tienen una conexión o están cerca de un gasoducto de gas natural existente. Lo más probable es que estos gasoductos continúen transportando gas natural durante décadas, pero podría aprovecharse el mismo corredor para construir gasoductos de CO₂. Estos pueden ser aún más importantes para aquellas fuentes ubicadas dentro del área urbana de Barcelona, donde hay menos disponibilidad de espacio y las medidas de seguridad son más estrictas. La red de recogida podría seguir el mismo recorrido que los gasoductos de gas natural que se encuentran en los valles o corredores verdes de Barcelona.

Las fuentes de cementeras son las más relevantes y son candidatas para actuar como un centro de recolección, ya que están emplazadas en complejos industriales ya fuera de los límites de la ciudad.

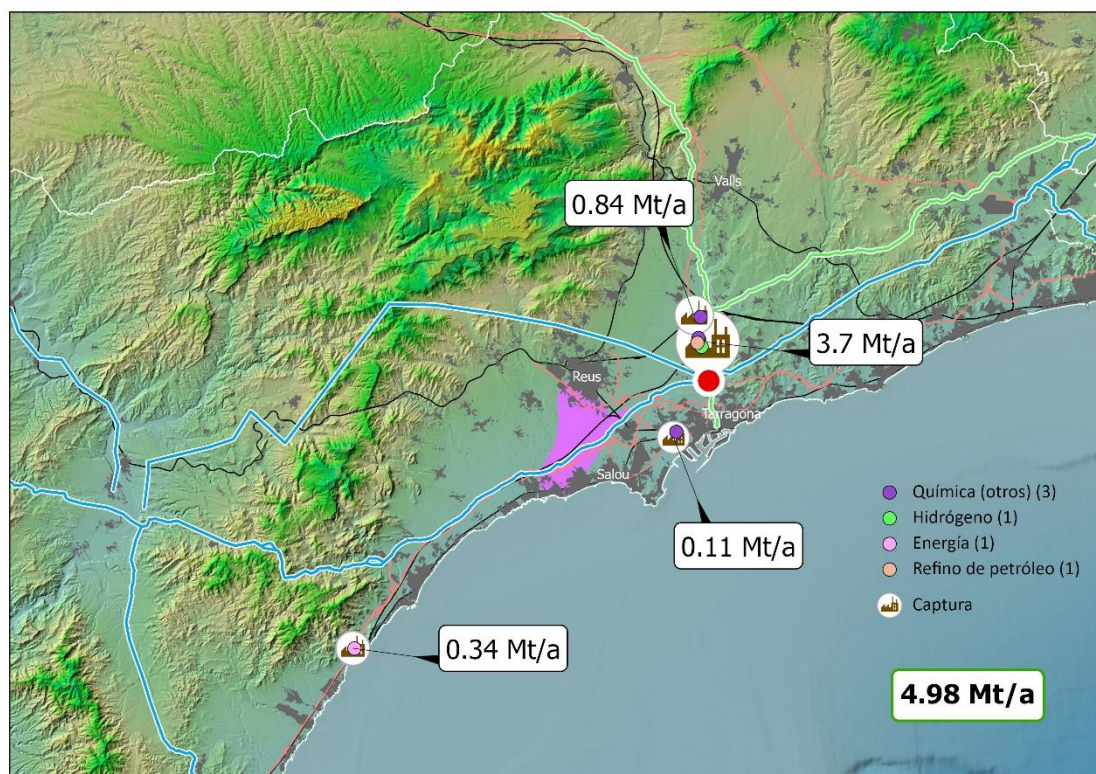


Figura 11. Clúster de Reus

El **clúster de Reus** (Figura 11) incluye seis fuentes que actualmente producen **4,98 Mt/a**, centradas en la **refinería** y que incluyen una planta de **producción de hidrógeno**, tres plantas **químicas** y una **central eléctrica**.

Las fuentes emisoras del clúster de Reus están ubicadas dentro del mismo perímetro industrial, en La Pobla de Mafumet, distanciándose no más de 2,5 km entre sí, compartiendo las mismas posibilidades de transporte y aparentemente sin limitaciones espaciales para la construcción de nuevas instalaciones de captación o *hubs*.

Otros **emisores menores** se encuentran más alejados del perímetro industrial de Reus, a unos 8 km (industria química) y 35 km (central térmica) al SE. Aun así, incluso estas dos fuentes están conectadas con el anterior por ferrocarril, carretera y un gasoducto. Las emisiones de la central son demasiado elevadas y se necesitará transportar por tubería, pero las emisiones de la planta química son pequeñas y pueden ser aptas para el transporte por ferrocarril o para inyección por separado de las otras fuentes en la unidad de almacenamiento de Reus, que tiene capacidad suficiente para una fuente tan pequeña.

Desde Reus, dos ramales del gasoducto atraviesan la sierra por los valles hacia el oeste y continúan hasta los almacenes de Caspe-Mayals y Maestrazgo. Estas características parecen hacer del grupo de fuentes de Reus una configuración ideal para un clúster CAUC.

Hay otras seis **fuentes más dispersas** en la cuenca del Ebro y considerablemente distantes de Reus y Barcelona. La fábrica de cemento de **Alcanar** actualmente responsable de las emisiones de 0,78 Mt/a, se encuentra alejada de cualquier otra fuente importante. Probablemente el transporte de CO₂ directamente por tubería a los almacenes sea inviable, ya que la topografía es bastante accidentada hacia el oeste y atravesaría algunos parques naturales. Así, dado que tampoco hay almacenes geológicos adecuados en su proximidad, es probable que el transporte deba realizarse hacia el NE, para unirse al centro de recogida de Reus, bien por el gasoducto existente o bien por barco, ya que la cementera se sirve del puerto industrial de Alcanar, a 85 km del puerto de Tarragona.

En las afueras de la ciudad de **Lleida** se encuentran una planta de cogeneración y una fábrica de alimentos y bebidas, responsables en conjunto de emisiones de 0,32 Mt/a. Estas son fuentes de relativamente pequeña escala, ambas ubicadas en áreas rurales.

Dado el pequeño volumen de CO₂ producido, los pequeños almacenes geológicos ubicados al oeste, Lopin (SP.SU.25) y Monegrillo (SP.SU.26), pueden proporcionar suficiente capacidad. Los volúmenes emitidos por la planta de energía probablemente requerirán transporte por tubería, que también podría recolectar CO₂ de la instalación de alimentos y bebidas (aunque los volúmenes emitidos por esta instalación pueden ser compatibles con el transporte por ferrocarril, por ejemplo), en un centro común cerca de la planta de energía.

Finalmente, la unidad de transformación de metales no ferrosos que emite algo más de 0,1 Mt/a, ubicada en **Calanda**, Teruel, y la **central de Escatrón**, Zaragoza, que emite 0,34 Mt/a, están a unos 40 km entre sí, pero mucho más distantes de cualquier otra fuente. Son, sin embargo, las dos instalaciones más cercanas a un mayor número de unidades de almacenamiento (Obón-Oliete A (SP.SU.5) y B (SP.SU.6), Caspe-Mayals, Maestrazgo y Monegrillo) y es posible que no sea necesario integrar un clúster o una red para implementar CAUC. Ambos son servidos por gasoductos y terminales ferroviarias. De hecho, dado el bajo nivel de emisiones, las unidades de almacenamiento Obón-Oliete A y B, distantes a unos 30 km de las fuentes y con una capacidad

total de almacenamiento de 12 Mt, pueden considerarse como una oportunidad de almacenamiento para estos dos.

Como se ha dicho, la central térmica de Andorra se cerró en 2020, pero los escenarios a considerar para el desarrollo de CAUC en la región del Ebro deberían tener en cuenta la posibilidad de que las instalaciones puedan reutilizarse para otros fines.

El desarrollo de una red de transporte de CO₂ en la cuenca del Ebro tiene múltiples posibilidades de transporte, y aunque los almacenes geológicos están todos en tierra firme, también existe la posibilidad de que el transporte por barco se pueda utilizar entre algunos de los clústeres ubicados a lo largo de la costa mediterránea. De hecho, las fuentes agrupadas alrededor de Barcelona se sirven del puerto de Barcelona (algunas centrales eléctricas están ubicadas en el puerto), que podría usarse para transportar CO₂ 90 km en barco hasta el puerto de Tarragona, que da servicio a Reus, o viceversa, antes de ser transportado por una tubería troncal hasta los almacenes.

7. OPCIONES DE UTILIZACIÓN DE CO₂

Los planes nacionales y las leyes recientes relacionadas con el clima, la transición energética o ambos no mencionan la utilización de CO₂ o la valorización de CO₂ en particular, aunque estas tecnologías se pueden incluir indirectamente a través de otras líneas como energía circular (y reutilización de CO₂), reciclaje de residuos (y mineralización de CO₂), leyes de biocombustibles (captura de CO₂ por biomasa) o planes e incentivos de reducción de GEI en la industria. A nivel local, la Generalitat de Cataluña ha sido el primero en España en desarrollar una “Ley de Cambio Climático” en 2017 donde se incluyen acciones indirectas, similares a las del ámbito nacional.

Cabe mencionar que desde la industria, la academia y la administración se conoce y solicita al gobierno nacional la necesidad de desarrollar un marco regulatorio para la utilización del CO₂.

La hoja de ruta para la utilización de CO₂ en España se muestra en la Figura 12, donde la utilización de CO₂ depende en gran medida de la tecnología de captura existente y no se espera un desarrollo de tecnologías para el uso de CO₂ a corto plazo.

Aunque las tecnologías de utilización de CO₂ están aún en fase de investigación, hay 4 líneas en las que se está trabajando: mineralización, fertilizantes, producción de metanol y polímeros.

Química y combustibles

El 25% de la producción de la industria química en España procede de Tarragona, incluyendo etileno y productos derivados, polímeros, gases, polímeros, combustibles. A partir de proyectos de investigación revisados, el proceso que se lleva a cabo para la conversión de CO₂ podría ser:

- Metanol, metano, ácido fórmico, etc. por electro reducción.
- Biocombustibles: mediante electrólisis in situ y eliminación de agua de la reacción de síntesis de hidrocarburos.

No se espera que se implemente a corto plazo, pero podría ser a largo o medio plazo.

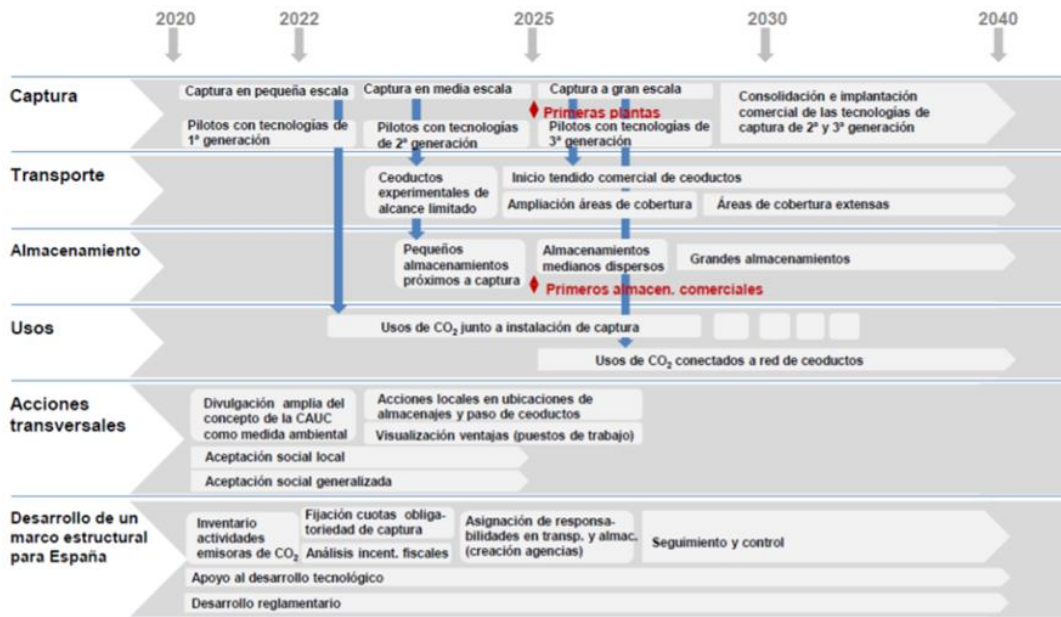


Figura 12. Hoja de ruta de las tecnologías CAUC en España [7]

Materiales de construcción / carbonatación

Muchas industrias cementeras también están ubicadas en la zona de la Cuenca del Ebro y se considera la valorización de material de desecho (ej. escorias, cenizas, polvo de horno, relaves, etc.), o del sector construcción o demolición para crear productos diversos con CO₂ inyectado como parte del proceso de reciclaje. Este material puede mezclarse con materia prima y utilizarse en cimentaciones de carreteras o en la preparación de hormigón fresco, ladrillos y bloques de construcción, rellenos de hormigón, etc.

Basado en proyectos de investigación revisados, el proceso que se lleva a cabo para el proceso de mineralización podría ser mediante la aceleración de un proceso natural donde el Ca (calcio) - o el Mg (magnesio) reaccionan con el dióxido de carbono (CO₂) para producir carbonato de calcio o magnesio (CaCO₃ o MgCO₃). .

No se espera su aplicación a corto o medio plazo.

Algas

Las algas actúan como filtros biológicos de CO₂, capturando CO₂ por fotosíntesis y produciendo biomasa utilizada para alimentos humanos o biocombustibles.

No se espera su aplicación a corto o medio plazo.

Otros

El CO₂ como fluido de transmisión de calor es propuesto por la industria del cemento con un alto potencial de utilización de CO₂ en su propia industria si se cuenta con un sistema de oxidación. La instalación de una de estas plantas está prevista en fase experimental pero se considera de alto potencial.

8. CONCLUSIONES

En esta comunicación se han presentado los resultados parciales del proyecto SYTRATEGY CCUS, aún en curso, que corresponden a la fase de recopilación de datos, análisis y estimación de las posibilidades de almacenamiento geológico en la zona de estudio. En las siguientes fases se analizará el nivel de madurez y confianza de las capacidades estimadas en todas las zonas y se hará el estudio de escenarios para el desarrollo de la CAUC y el análisis técnico-económico y social.

La implantación de la CAUC en la zona está motivada por el alto nivel de emisiones del sector industrial en la cuenca del Ebro y su concentración en dos áreas industriales principales, Reus y Barcelona. Varias de las fuentes están ubicadas en el mismo perímetro industrial en Reus y en el puerto de Barcelona. Esto podría proporcionar las condiciones ideales para el desarrollo de una red común.

El sector del cemento en el clúster de Barcelona y la industria petroquímica en el clúster de Reus, son probablemente los aglutinadores de otras industrias que se sumen a los clústeres de CAUC. Algunas fuentes están en el casco urbano de Barcelona, pero la mayoría se encuentran en complejos rurales o industriales y no deberían tener problemas de espacio para construir instalaciones de captura.

La construcción de redes de gasoductos puede estar limitada por la topografía, aunque los gasoductos de gas natural existentes definen corredores que pueden ser aprovechados. Además, la mayoría de las fuentes están conectadas a líneas ferroviarias en funcionamiento y algunas a puertos. Los complejos industriales de Reus y Barcelona se pueden utilizar como emplazamientos para centros de consolidación antes del transporte troncal por gasoductos para el almacenamiento *onshore*.

Las capacidades de almacenamiento son exclusivamente *onshore*, a veces muy alejadas de las fuentes principales (en algunos casos más de 200 km) y su limitada capacidad requiere cierta gestión y flexibilidad en la inyección en los principales sitios de almacenamiento, por lo que deben buscarse oportunidades de almacenamiento en alta mar.

Por otra parte, la vía de exploración de posibles almacenes geológicos *onshore* no debería considerarse agotada. La selección de zonas favorables se ha hecho a partir de los resultados de proyectos anteriores, que a su vez partieron de la información disponible de las campañas de exploración de hidrocarburos de los años 70 y 80 del S. XX, por lo que aún falta suficiente conocimiento del subsuelo. Los almacenes geológicos propuestos en este proyecto proceden del proyecto ALGECO2 y solo se consideraron aquellas estructuras geológicas en las que se podían delimitar volúmenes de roca favorable cerrados por isobatas a una profundidad tal que se evitara la fuga del gas almacenado. Por las características propias de los yacimientos de hidrocarburos, son ese tipo de trampas las que se han buscado en las campañas de exploración y son las que se podrían utilizar como almacenes de CO₂. Sin embargo quedaría por evaluar la existencia de zonas de almacenamiento de tipo regional en acuíferos salinos profundos con suficiente extensión. En estos, el CO₂ quedaría retenido en el agua de formación a presión y temperatura adecuadas para mantenerlo en condiciones supercríticas. Este tipo de almacenamiento es que se explota actualmente en el Mar del Norte.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] IGME. (2010). Plan de selección y caracterización de áreas y estructuras favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ en España.
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.prtr-es.es/>. [Último acceso: 2017].
- [3] E. Halland, W. Johansen y F. Riis, CO₂ Storage Atlas, Norwegian North Sea, Stavanger: Norwegian Petroleum Directorate, 2014.
- [4] S. Sanguinito, A. L. Goodman y J. S. Levine, NETL CO₂ Storage prospective Resource Estimation Excel aNalysis (CO₂-SCREEN), Pittsburg, PA: U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2017, p. 32.
- [5] Brownsort, P.A., 2020. Part 1, Industrial CCUS Clusters and CO₂ transport systems: methodologies for characterisation and definition. In: Brownsort, P.A., Cavanagh, A.J., Wilkinson, M. and Haszeldine, R.S. 2020. Methodologies for cluster development and best practices for data collection in the promising regions. EU H2020 STRATEGY CCUS Project 837754, Report, pp 68.
- [6] Carneiro, J.F., and Mesquita, P. 2020. Key data for characterizing sources, transport options, storage and uses in promising regions. EU H2020 STRATEGY CCUS Project 837754, Report, pp 170.
- [7] Borrador de Segundo Análisis del Potencial de Desarrollo de las Tecnologías Energéticas, APDTE 2018-19, ALINNE. Plataforma Tecnológica Española del CO₂ PTECO₂.