

## Resumen

El efecto de las emisiones de CO<sub>2</sub> sobre el medio ambiente es cada vez más perjudicial y las consecuencias del cambio climático son patentes ya desde hace años. Es necesario, por tanto, desarrollar y aplicar políticas activas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y así restablecer su concentración atmosférica a niveles aceptables.

Una de las metodologías que pueden aportar un elevado efecto en la reducción de emisiones es la Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC).

Este proyecto pretende dar a conocer las diferentes etapas de la CAC, así como analizar su viabilidad y aplicación en territorio español. A nivel internacional, esta tecnología se encuentra aún en fase de demostración y en constante evolución.

Además, también se ha realizado un análisis extenso sobre la normativa legal relacionada con la captura, el transporte y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, donde se ha podido observar que aún se encuentra en fase de desarrollo.

Por otra parte, uno de los grandes desafíos es la monitorización del CO<sub>2</sub> una vez se encuentra almacenado en profundidad, se necesitan gran variedad de métodos y herramientas para conocer su comportamiento dentro de la formación geológica y la detección de posibles fugas. En este proyecto se presentan y analizan una gran variedad de técnicas disponibles y se propone el estudio de algunas de ellas en una parcela de ensayo.

Finalmente, se describe y dimensiona de forma detallada un ensayo de inyección de CO<sub>2</sub> en una parcela de tierra. El objetivo del cual consiste en analizar la idoneidad y aplicabilidad de diversos sensores, así como el impacto de ciertas concentraciones de dióxido de carbono sobre la vegetación.





# Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSARIO</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>9</b>
2.1. Motivación	9
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
3.1. Objeto y Objetivos del proyecto	11
<b>4. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>13</b>
4.1. Indicadores de cambio climático. Emisiones de CO <sub>2</sub>	13
4.2. Opciones de mitigación	14
<b>5. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub></b>	<b>19</b>
5.1. Captura de CO <sub>2</sub>	20
5.2. Transporte de CO <sub>2</sub>	22
5.2.1. Gasoductos	22
5.2.2. Buques	23
5.2.3. Camiones y vagones cisterna	23
5.3. Inyección de CO <sub>2</sub>	24
<b>6. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS FORMACIONES PERMEABLES PROFUNDAS</b>	<b>27</b>
6.1. Tipos de formaciones permeables profundas	27
6.1.1. Yacimientos agotados de petróleo	27
6.1.2. Capas de carbón no explotables	28
6.1.3. Acuíferos salinos	29
6.2. Mecanismos de atrapamiento	30
6.2.1. Atrapamiento estructural/estratigráfico	30
6.2.2. Atrapamiento residual	31
6.2.3. Atrapamiento por solubilidad	31
6.2.4. Atrapamiento mineral	32
6.3. Criterios específicos y parámetros relevantes en una formación permeable profunda	33
6.3.1. Formación almacén	33



6.3.2.	Formación sello .....	36
6.3.3.	Aspectos generales de una formación .....	36
<b>7.</b>	<b>APLICACIÓN DE LA CAC EN ESPAÑA</b> .....	<b>39</b>
7.1.	Criterios geológicos .....	39
7.2.	Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	40
7.3.	Densidad de población .....	41
7.4.	Acuíferos .....	42
7.5.	Zonas Naturales y Protegidas .....	43
<b>8.</b>	<b>MARCO LEGAL</b> .....	<b>45</b>
8.1.	Ley 40/2010.....	47
8.2.	Ley 13/2010.....	49
8.3.	Ley 26/2007.....	52
<b>9.</b>	<b>MONITORIZACIÓN</b> .....	<b>55</b>
9.1.	Fase pre-operacional.....	56
9.2.	Fase operacional .....	58
9.3.	Fase de clausura .....	60
9.4.	Fase de post-clausura .....	61
<b>10.</b>	<b>SENSORES</b> .....	<b>63</b>
10.1.	Clasificación general de sensores para la monitorización de almacenes geológicos de CO <sub>2</sub> .....	66
10.1.1.	Atmosféricos.....	66
10.1.2.	Superficiales .....	66
10.1.3.	Profundos .....	68
10.2.	Detectores de CO <sub>2</sub> .....	70
10.3.	Cámara de acumulación.....	76
<b>11.</b>	<b>DIMENSIONAMIENTO DE LA INYECCIÓN DE UNA PLANTA PILOTO DE MONITORIZACIÓN EN SUPERFICIE</b> .....	<b>79</b>
11.1.	Descripción de la planta piloto .....	79
11.1.1.	Dimensiones y materiales.....	79
11.1.2.	Necesidades para las tareas experimentales .....	79
11.2.	Equipo necesario para la inyección .....	80
11.3.	Descripción de la inyección.....	83
<b>12.</b>	<b>EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL</b> .....	<b>85</b>



<b>13. PRESUPUESTO</b>	<b>89</b>
13.1. Elaboración del proyecto.....	89
13.2. Ejecución del proyecto.....	89
13.3. Coste total del proyecto.....	91
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>93</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>95</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>97</b>





# 1. Glosario

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

IEA: International Energy Agency.

ETP: Energy Technology Perspectives.

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

WEO: World Energy Outlook.

CAC: Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

CCS: Carbon Capture and Storage.

Arenisca: Roca sedimentaria formada por la compactación y cementación de arenas con un cemento de tipo silíceo o calizo.

Roca sedimentaria: Aquellas que se forman por acumulación de sedimentos.

Diapiros: Estructuras geológicas salinas que ascienden desde niveles estratigráficos inferiores donde estaban sometidas a altas presiones. En su ascenso provocan deformaciones en las capas sedimentarias de la corteza terrestre.

Anisotropía: Variación de las propiedades físicas o texturales con la dirección.

Litología: Parte de la geología que estudia las rocas, en especial su tamaño de grano y las características físicas y químicas de las partículas.

Vol. %: El porcentaje en volumen (Vol. %) corresponde a 1 parte de una sustancia en 100 partes de aire. La conversión a ppm es la siguiente:

$$1 \text{ Vol. \%} = 10.000 \text{ ppm}$$







## 2. Prefacio

### 2.1. Motivación

A raíz de un convenio de prácticas en una empresa, se presenta la oportunidad de profundizar en la problemática del cambio climático y las posibles opciones para su mitigación.

Una de estas tecnologías, que actualmente se encuentra en fase de demostración, es la Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC). Puesto que el dióxido de carbono es uno de los gases de efecto invernadero, urge desarrollar políticas y metodologías que reduzcan sus emisiones a la atmósfera.

Una vez recabada y analizada la información sobre la CAC, se observa la importancia de disponer de una amplia gama de técnicas y dispositivos de monitorización para el control del CO<sub>2</sub> durante todo el proceso de captura, transporte y en especial el almacenamiento.





## 3. Introducción

### 3.1. Objeto y Objetivos del proyecto

El Objeto de estudio de este proyecto es la tecnología de Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> y el ensayo de diversos sensores de dióxido de carbono.

En cuanto a los Objetivos del proyecto, estos son:

- Elaborar una breve introducción sobre los indicadores del cambio climático y la evolución de las emisiones de dióxido de carbono.
- Analizar diversos escenarios de previsión de emisiones para los próximos años y enumerar varias metodologías para la reducción de dichas emisiones.
- Estudiar una de estas técnicas y describir todas sus etapas.
- Examinar las diversas opciones existentes para el almacenamiento geológico de dióxido de carbono y detallar los aspectos relevantes de la opción escogida.
- Presentar los criterios básicos para poder desarrollar la CAC en territorio español.
- Analizar en profundidad la normativa legal española relacionada con la Captura, el Transporte y el Almacenamiento del CO<sub>2</sub>.
- Describir las etapas principales presentes en el proceso de selección de una formación permeable profunda y de desarrollo de las operaciones de inyección para almacenar el dióxido de carbono.
- Estudiar las numerosas técnicas de monitorización para el control y detección de fugas en almacenamientos geológicos.
- Presentar el procedimiento para el ensayo de diversos dispositivos de monitorización de tipo atmosférico y superficial en una parcela de tierra.
- Evaluar el impacto sobre el Medio Ambiente de la CAC, tanto su contribución a la reducción de emisiones como los potenciales riesgos que comporta.





## 4. Contextualización del problema

### 4.1. Indicadores de cambio climático. Emisiones de CO<sub>2</sub>

Durante las últimas décadas se han ido observando numerosos cambios en el clima, gran parte como consecuencia del efecto invernadero. Algunos ejemplos son:

- Registro de 11 de los 12 años más calurosos de la historia, durante el periodo de 1995 a 2007. [IPCC, 2007]
- Incremento en el nivel del mar de entre 15 y 23 cm, durante el siglo XX. [Lal,2008]

Los gases que contribuyen al aumento de la temperatura en la superficie terrestre, se denominan gases de efecto invernadero, y son los siguientes:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Gas metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O)
- Hidrofluorocarburos (HCFC)
- Perfluorocarburos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)

Según el Informe de Síntesis del “*Fourth Assessment Report*” sobre cambio climático del IPCC en 2007, las emisiones anuales mundiales de gases de efecto invernadero de origen antropogénico expresadas en términos de CO<sub>2</sub> equivalente durante 1990 se situó en 21 Gt CO<sub>2</sub>/año, y en 2004 alcanzó un valor de 38 Gt CO<sub>2</sub>/año (Figura 4.1).

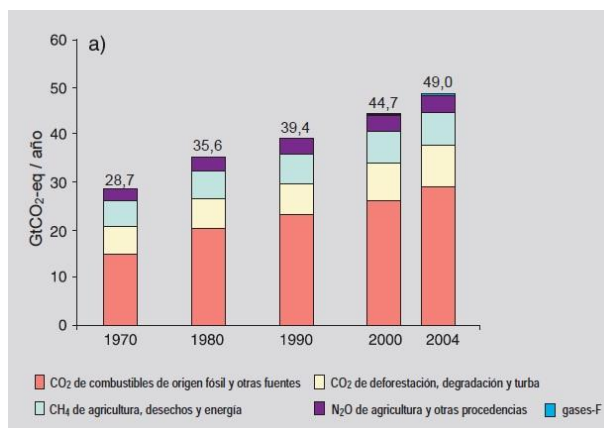


Fig. 4.1. Emisiones anuales mundiales de GEI de origen antropogénico [IPCC, 2007]



En publicaciones posteriores, tanto del IPCC como de la IEA, en 2008 y 2009 se observó una disminución en la tendencia ascendente de los últimos años en materia de emisiones de CO<sub>2</sub>. Uno de los motivos expuestos fue la reducción en el consumo energético resultado del entorno económico del momento. En cambio, ya en 2010 se volvió a detectar un nuevo aumento en las emisiones mundiales que incluso superaba los valores previstos en los escenarios descritos en el siguiente apartado.

En lo referente a concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, durante el periodo de 1850 a 2005 se observó un incremento del 31 % a razón de 0,645 ppmv/año; siendo los valores de 280 ppmv en 1850 y de 380 ppmv en 2005. Así mismo, a partir de 2005 las concentraciones medias anuales se incrementaron a 1,7 ppmv/año.

Según las previsiones del IPCC, si no se produce un cambio en las políticas energéticas vigentes, las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> podrían alcanzar el valor de 77 Gt CO<sub>2</sub>/año en el 2100. El valor estimado para el mismo año de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> se situaría en 750 ppmv.

## 4.2. Opciones de mitigación

Con el objetivo de no acentuar el cambio climático, varias organizaciones como el IPCC o el IEA han propuesto y establecido varios escenarios de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> para las próximas décadas.

Según el IPCC, es necesario reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> por lo menos un 50 % en 2050 respecto a los valores alcanzados en el año 2000 y así limitar el incremento de temperatura global a 2 °C o 2,4 °C. Dicho objetivo no se logrará si se mantienen las tendencias actuales en energía y CO<sub>2</sub>, inviables en relación con el medio ambiente, el desarrollo económico y la seguridad energética.

Algunos de los escenarios principales son los siguientes:

- ETP 2010:

Escenario de referencia, donde no se introducen nuevas políticas ni energéticas ni climáticas. Solo se aplican aquellas promulgadas o adoptadas en 2009, como la limitación de emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora de la eficiencia energética o la promoción de las energías renovables, entre otras.



El continuo incremento en el uso de combustibles fósiles provoca un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> de 29 Gt en 2007 a 40 Gt en 2030, así como un deterioro de la calidad del aire y posibles efectos graves sobre la salud pública y el medioambiente.

A partir de esta situación de aplicación de políticas y aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>, se prevé que la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero alcance un valor de 1000 ppm a largo plazo.

- **BLUE MAP:**

En este escenario, las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen un 50 % en 2050 respecto a los valores de 2005. Dicha reducción se alcanza mediante la aplicación de tecnologías nuevas y tecnologías ya existentes. Además, también se aumenta la seguridad energética y se aportan beneficios que contribuyen al desarrollo económico.

Según las previsiones de dicho escenario, la reducción de las emisiones en los edificios sería de dos tercios mediante la utilización de la electricidad, la mejora de la eficiencia energética y el cambio a tecnologías con emisiones de carbono bajas o nulas. Algunos ejemplos en el cambio de tecnologías son la calefacción o enfriamiento solar, la cogeneración y las bombas de calor.

En el ámbito del transporte, se ha pronosticado que alrededor del 80% de los vehículos industriales ligeros serán híbridos eléctricos o funcionarán con pilas de combustible.

En el sector industrial, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen un 25 % aproximadamente gracias a la mejora de la eficiencia energética, el cambio en los combustibles, el reciclaje, la aplicación de la tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, y la recuperación de energía.

En el 2050 los países no pertenecientes a la OCDE conseguirían una reducción de las emisiones del 30 % comparado con las del 2007, y los países de la OCDE lograrían una reducción de entre un 70 % y un 80 %.



- WEO 2009 450 ppm:

Mediante una actuación política colectiva, se controlan las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero para lograr, a largo plazo, fijarlas en 450 ppm de CO<sub>2</sub> equivalente. El objetivo es limitar el incremento de la temperatura global en 2 °C.

La concentración de 450 ppm es menos de la mitad de la concentración prevista en el escenario de referencia. El comportamiento de las emisiones describe una trayectoria con un primer tramo donde la concentración aumenta progresivamente hasta alcanzar un pico de 510 ppm en 2035, durante los siguientes 10 años se mantiene constante y finalmente decrece hasta 450 ppm.

El análisis de este escenario se centra en el periodo de 2009 a 2030.

En el siguiente gráfico (Figura 4.2) se ilustra la contribución de las distintas opciones de mitigación para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

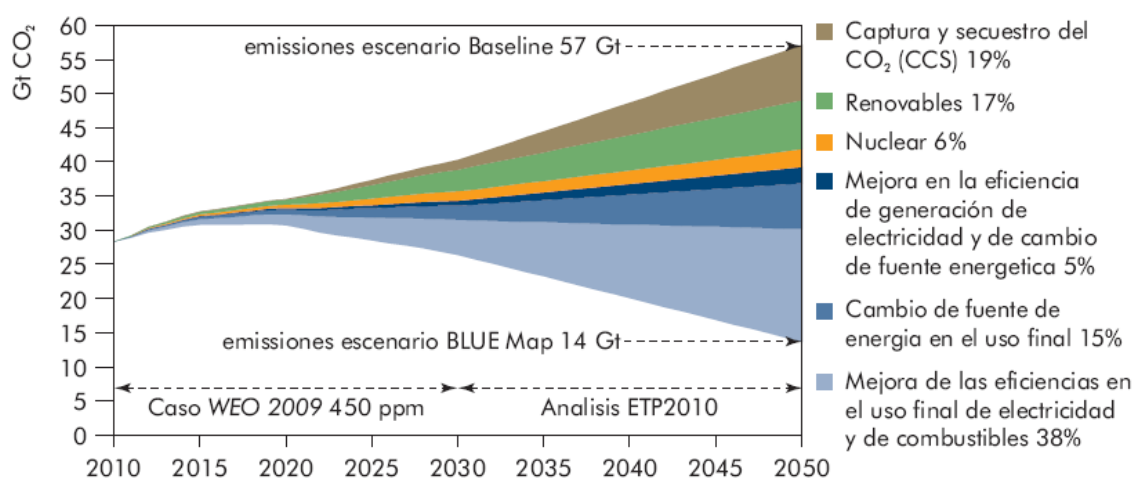


Fig. 4.2. Contribución de distintas tecnologías según el escenario BLUE Map [IEA Energy Technology Perspectives, 2010]





Tal y como se muestra en el gráfico, será necesaria la aplicación de un conjunto de tecnologías con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> para lograr los objetivos de los diferentes escenarios, el solo uso de una única tecnología sería insuficiente.

La opción de mejora de la eficiencia energética ofrece las mayores posibilidades de reducción de las emisiones, y debería considerarse como una opción prioritaria. Es decisivo el cambio en las fuentes de energía por combustibles bajos en carbono; además, es necesario un aumento en la utilización de la energía renovable y nuclear, así como la aplicación comercial de la tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en las plantas de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles.

Otra de las opciones para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> es el cambio de los combustibles fósiles por energía eléctrica en el sector del transporte, la industria y los edificios, algunos ejemplos son el cambio de automóviles con motores de combustión interna por vehículos eléctricos e híbridos, o el uso de bombas de calor en lugar de calefacción mediante combustibles fósiles. A partir del 2030 también serán necesarias nuevas tecnologías con bajas emisiones de dióxido de carbono, principalmente en los sectores de uso final como el transporte, la industria y los edificios.





## 5. Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>

La Tecnología de Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC) o Carbon Capture and Storage (CCS) consiste en capturar el dióxido de carbono antes de su emisión a la atmósfera, principalmente a partir de grandes fuentes estacionarias y puntuales como centrales de generación de energía o plantas industriales. Una vez capturado, el CO<sub>2</sub> es comprimido y transportado al lugar donde es inyectado y almacenado en una formación permeable profunda (>800 m) previamente seleccionada, caracterizada y monitoreada.

La CAC tiene la capacidad potencial de reducir los costes generales de la mitigación y aumentar la flexibilidad para lograr la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La aplicación generalizada de la CAC dependerá de la madurez tecnológica, los costes, el potencial global, la difusión y la transferencia de la tecnología a los países en desarrollo y su capacidad para aplicar la tecnología, los aspectos normativos, las cuestiones ambientales y la percepción pública.

La siguiente figura muestra, de forma esquemática, el proceso de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

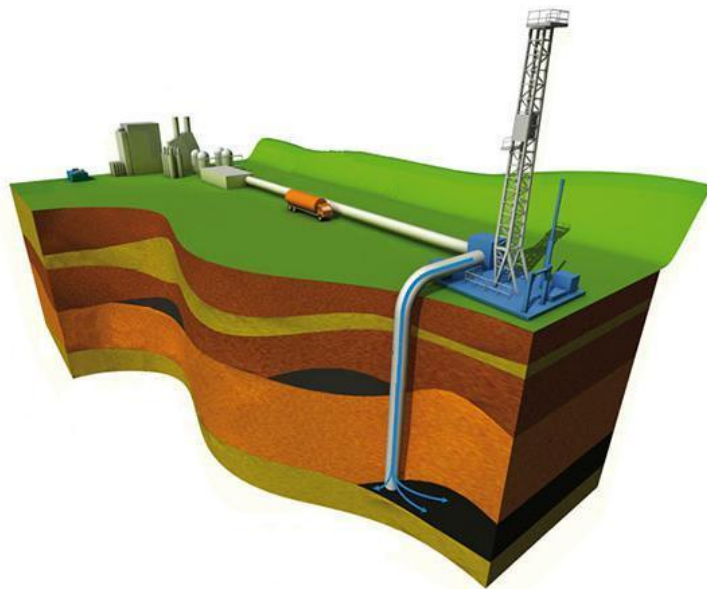


Fig. 5.1. Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> [The Political Climate, 2010]



## 5.1. Captura de CO<sub>2</sub>

La primera etapa de la tecnología CAC es la Captura de CO<sub>2</sub>, cuyo objetivo es la producción de un flujo concentrado de dicho gas a partir de grandes fuentes puntuales y estacionarias. Actualmente, la captura de dióxido de carbono se aplica en centrales de generación de energía eléctrica y en otras grandes industrias.

Dado que la mayor parte de las fuentes producen gases con concentraciones de dióxido de carbono por debajo del 15%, el proceso de captura también incluye operaciones de tratamiento. Solo en un 2% de las posibles fuentes, se pueden realizar los procesos de captura en flujos con concentraciones de CO<sub>2</sub> superiores al 95%.

Los principales métodos de captura son:

**Post-combustión:** La combustión se realiza con combustibles fósiles y aire. A continuación, se tratan los gases procedentes de la combustión con solventes orgánicos, facilitando así la extracción de CO<sub>2</sub>. Generalmente, la fracción de CO<sub>2</sub> de los gases procedentes de la combustión se sitúa entre un 3% y un 15%.

**Pre-combustión:** El combustible fósil primario se procesa en un reactor con vapor y aire u oxígeno. Los productos de salida son CO e hidrógeno, que son dirigidos a un segundo reactor. En este segundo reactor, llamado "reactor de conversión", el CO reacciona con vapor, produciendo CO<sub>2</sub> y más hidrógeno. En este punto, el CO<sub>2</sub> es separado del hidrógeno mediante solventes físicos y químicos. El hidrógeno resultante se puede usar como combustible.

Las concentraciones de CO<sub>2</sub> presentes en el flujo resultante del segundo reactor están entre un 15% y un 60%.

**Oxy-combustión:** El primer paso es la combustión del combustible con una mezcla de gases rica en oxígeno, proceso que produce un flujo de gas compuesto principalmente por CO<sub>2</sub> (alrededor del 90% del volumen) y vapor de agua. A continuación es necesario un tratamiento para poder extraer pequeñas concentraciones de contaminantes atmosféricos y gases no condensados. Finalmente, se separa el CO<sub>2</sub> mediante técnicas de destilación.



En la siguiente figura se muestra de forma esquemática las tres técnicas de captura mencionadas.

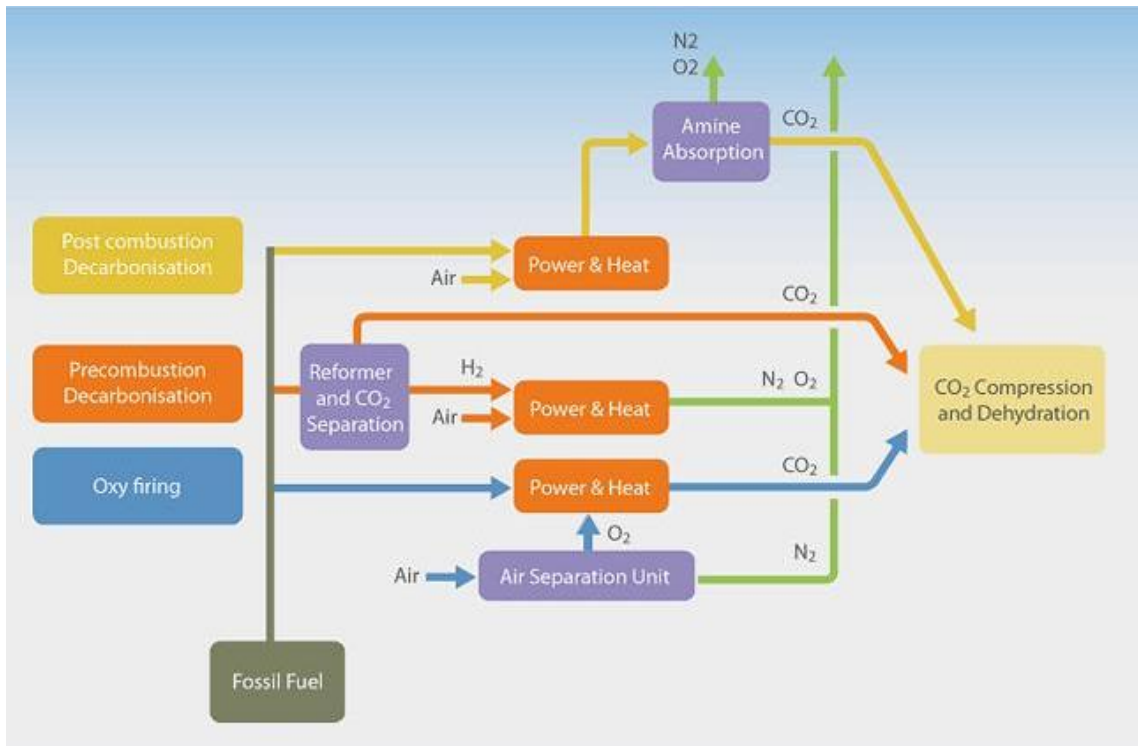


Fig. 5.2. Técnicas de captura de CO<sub>2</sub> [Energy Resource, CO<sub>2</sub> Capture Project, 2010]

Mediante la tecnología actual, es posible capturar entre el 85% y el 95% del CO<sub>2</sub> tratado en las plantas de captura. El principal inconveniente de esta fase de la tecnología CAC es el elevado consumo energético que requiere. Para las centrales e industrias donde se aplica, este consumo representa entre un 10% y un 40% más respecto a la misma instalación sin CAC. Resulta necesario, por tanto, investigar y mejorar los sistemas actuales de captura, elevar su eficiencia y reducir su consumo.



## 5.2. Transporte de CO<sub>2</sub>

Una vez capturado y purificado, el CO<sub>2</sub> es transportado al punto de inyección, a excepción del caso en que la fuente emisora se encuentre directamente sobre la formación almacén. Existen varios tipos de transporte dependiendo principalmente de la distancia y del volumen de dióxido de carbono a transportar. Existen tres tecnologías principales de transporte:

### 5.2.1. Gasoductos

El principal medio de transporte de CO<sub>2</sub> son los gasoductos, comúnmente llamados ceoductos, indicados para distancias de hasta 1000 Km.

El CO<sub>2</sub> es transportado a alta presión en forma líquida (por encima de 8 MPa y a temperatura ambiente). Estas condiciones permiten evitar flujos multifásicos y también aumentar la densidad del fluido, de este modo se facilita y abarata el transporte.

Generalmente, los compresores instalados en el extremo inicial del gasoducto son los responsables de la impulsión del flujo, no obstante también pueden ser necesarias estaciones de compresión intermedias.

A fin de evitar la utilización de material resistente a la corrosión en el revestimiento de las paredes del gasoducto, el CO<sub>2</sub> se transporta seco. Si inicialmente el flujo de CO<sub>2</sub> contiene humedad, esta es extraída previamente al transporte.

El uso de gasoductos se inició a principios del decenio de 1970, y actualmente es el principal medio de transporte de CO<sub>2</sub>. En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo de gasoducto.



Fig. 5.3. Gasoducto [University College London, 2010]



### 5.2.2. Buques

En caso de ser necesario el transporte en distancias superiores a 1000 km, o si se transportan cantidades del orden de millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, resulta más económico el uso de buques.

Durante el transporte, el CO<sub>2</sub> se encuentra en estado líquido a una presión de 0,7 MPa. Dichas operaciones se asemejan a las utilizadas para transportar gas licuado de petróleo.

La siguiente imagen muestra un ejemplo de un buque para el transporte de CO<sub>2</sub>.



Fig. 5.4. Buque [Anthony Veder, 2011]

### 5.2.3. Camiones y vagones cisterna

Un tercer medio de transporte son los camiones (Figura 5.5) y los vagones cisterna, donde el CO<sub>2</sub> se encuentra a una temperatura de -20°C y a una presión de 2MPa [IPCC, 2005]. Son opciones viables desde un punto de vista tecnológico, pero resultan costosas respecto a los otros tipos de transporte.



Fig. 5.5. Camión [Asco CO<sub>2</sub>, 2010]



### 5.3. Inyección de CO<sub>2</sub>

El sistema de inyección de CO<sub>2</sub> está compuesto por un conjunto de instalaciones de almacenaje, dispositivos de distribución del CO<sub>2</sub> entre los sistemas de transporte y los puntos de inyección, estaciones de compresión adicionales, herramientas de control y medida, “*wellheads*” y pozos de inyección.

Gran parte de las tecnologías utilizadas en las instalaciones de inyección de CO<sub>2</sub> proceden de la industria de extracción de petróleo y gas natural. Dichas tecnologías han sido utilizadas, desarrolladas y mejoradas continuamente hasta llegar a un elevado estado de sofisticación. Por ello, hoy en día es posible realizar la inyección tanto en pozos verticales como horizontales, pozos con múltiples salidas, y pozos capaces de soportar fluidos corrosivos.

Las modificaciones necesarias a realizar en el ámbito de la inyección de CO<sub>2</sub> se deben a una mayor presión, respecto a instalaciones de petróleo o gas natural, y a las propiedades corrosivas del CO<sub>2</sub> supercrítico.

En cuanto al diseño de un pozo de inyección, los principales parámetros son la presión, la resistencia a la corrosión, y las tasas de producción e inyección.

Por otra parte, el número de pozos necesarios para inyectar una cantidad determinada de CO<sub>2</sub> en un reservorio depende de varios factores:

- Tasa total de inyección
- Permeabilidad y potencia de la formación
- Presiones máximas de inyección
- Extensión del área disponible para el emplazamiento de los pozos de inyección.

Si se realiza la inyección en formaciones de alta permeabilidad y mucha potencia, el número de pozos de inyección verticales disminuye. Además, otra opción para aumentar la tasa de inyección es el uso de pozos horizontales y de largo alcance (“*extended reach wells*”).





Generalmente, el equipamiento necesario en un pozo de inyección es el siguiente:

- Dos válvulas de control, una de uso regular y otra de cierre de seguridad.
- Una válvula de cierre automática para la prevención de fugas a través del pozo de inyección.
- “*Double-grip packer*”
- Una herramienta “*gudgeon*”
- Medidor de presión anular
- Disco de rotura
- Válvulas de seguridad

A continuación se muestra una figura donde se observan los distintos componentes en un pozo de inyección.

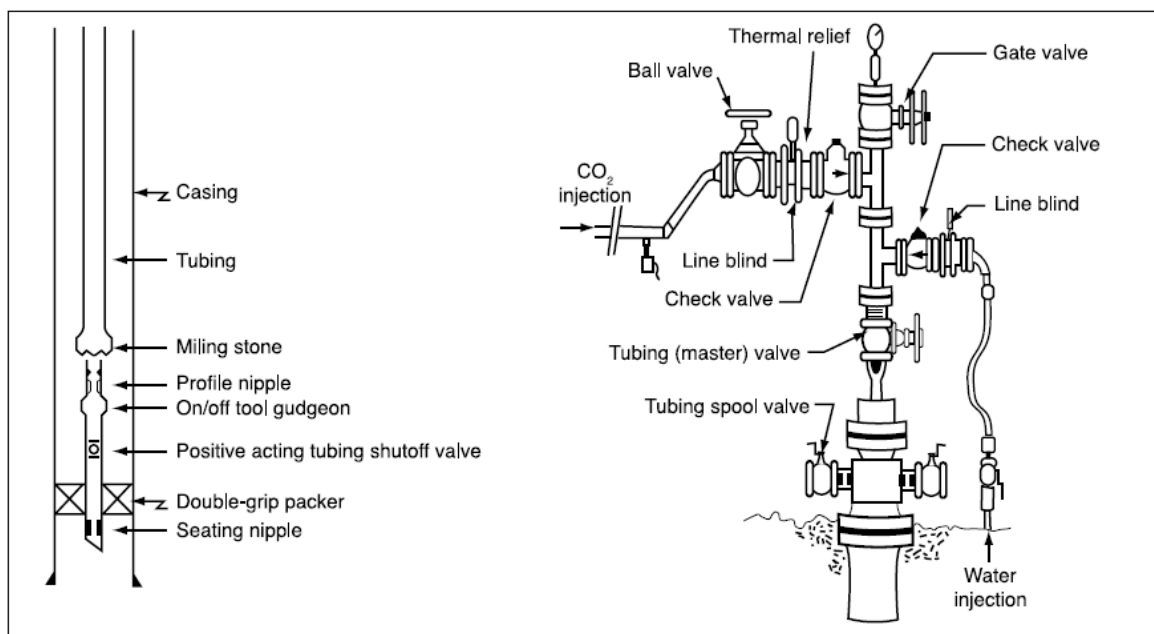


Fig. 5.6. Esquema de una instalación de inyección [IPCC, 2005]

En cuanto a la elección de los materiales utilizados en la construcción, cabe destacar que, los aceros al carbono y los cementos convencionales pueden sufrir ataques procedentes de salmueras y flujos ricos en CO<sub>2</sub>.

A fin de garantizar unas tareas de inyección seguras y efectivas, se instalan a lo largo del pozo varias herramientas de seguridad y control. En la cabeza del pozo se sitúan diversos dispositivos de medida para la determinación del caudal, la temperatura y la presión del fluido inyectado. Además, se instalan sistemas de seguridad para prevenir posibles fugas del



fluido inyectado. Por otro lado, en la parte inferior del pozo se emplaza una válvula de seguridad y en el encofrado se sitúa una válvula de retención. Dichos dispositivos también pueden ser instalados justo bajo la superficie. Las válvulas y los dispositivos de seguridad van a estar en contacto con el CO<sub>2</sub> supercrítico, por tanto deberán estar fabricados con materiales resistentes.

Es importante realizar tareas de mantenimiento para evitar fugas o un funcionamiento incorrecto del pozo. Algunos de los procedimientos utilizados para dicho mantenimiento son las inspecciones periódicas de control de la integridad de los pozos perforados, instalación de dispositivos para la prevención de reventones en pozos sospechosos y revisión de los dispositivos que estén ya instalados, realización de planes de contingencia y formación de profesionales frente a posibles emergencias.

En caso de realizar las operaciones de inyección en un pozo ya existente, se deberán garantizar las correctas condiciones mecánicas y el buen estado de los materiales que estarán en contacto con el CO<sub>2</sub> supercrítico.

En los pozos abandonados se debe revisar el estado de los cierres de cemento, así como garantizar que estos no se comportan como vías preferentes para las fugas de CO<sub>2</sub>.



## 6. Tipos y características de las formaciones permeables profundas

### 6.1. Tipos de formaciones permeables profundas

El CO<sub>2</sub> capturado puede ser almacenado en diferentes formaciones o reservorios. Los principales objetivos son los yacimientos de petróleo y gas ya agotados, las capas de carbón no explotables, y los acuíferos salinos profundos.

#### 6.1.1. Yacimientos agotados de petróleo

Los yacimientos agotados de petróleo o gas son de gran interés para el almacenamiento de dióxido de carbono por los siguientes motivos:

- se encuentran en estructuras geológicas aisladas, ya que el gas y el petróleo acumulado en trampas (estructurales y estratigráficas) se ha mantenido atrapado sin ninguna fuga, en algunos casos durante millones de años.
- la estructura geológica y las propiedades físicas de los yacimientos han sido estudiadas y caracterizadas de forma extensiva durante los estadios de exploración y explotación de los yacimientos.
- en la industria del gas y del petróleo se han desarrollado numerosos modelos numéricos con el objetivo de predecir el comportamiento de los hidrocarburos, con lo que se puede preveer el potencial movimiento del CO<sub>2</sub> inyectado.

Uno de los aspectos a tener en cuenta respecto a estos tipos de formaciones geológicas como almacenes de dióxido de carbono son los pozos de extracción abandonados, que constituyen puntos de fuga favorables para el CO<sub>2</sub>. Generalmente, los pozos abandonados se encuentran sellados con cemento, material que con facilidad sufre carbonatación en contacto con fluidos acuosos con CO<sub>2</sub> disuelto, lo que implica cambios notables en sus propiedades hidráulicas.

La capacidad de un almacén se verá limitada por la necesidad de evitar exceder presiones que puedan dañar las rocas de la formación seleccionada. Los almacenes deben poseer una sensibilidad limitada a las reducciones en la permeabilidad a consecuencia de las condiciones de la región próxima al punto de inyección y de las fluctuaciones en las tensiones del almacén.



### 6.1.2. Capas de carbón no explotables

Las capas de carbón no explotables son recursos naturales de carbón donde no se desarrollan actividades de minería para extraer dicho combustible fósil a consecuencia de diversas condiciones adversas de explotación, ya sean de tipo económico o logístico.

Las capas de carbón contienen fracturas que proporcionan permeabilidad a la formación. Entre las fracturas, el carbón sólido contiene un gran número de microporos en los que las moléculas de gas provenientes de las fracturas se pueden difundir y ser adsorbidas. El carbón puede adsorber físicamente un gran número de gases y puede contener hasta 25 m<sup>3</sup> normales (m<sup>3</sup> a 1 atm y 0 °C) de metano por tonelada de carbón. Es muy común la presencia de metano adsorbido en la superficie de las capas de carbón, y su extracción se suele realizar mediante bombeo.

Estas formaciones también pueden ser posibles almacenes de CO<sub>2</sub>. Existe una gran afinidad entre el dióxido de carbono y el carbón, superior a la del metano y el carbón. El ratio volumétrico CO<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub> de adsorción puede tomar valores entre 2 y 10, dependiendo del contenido de agua, la composición y edad geológica del carbón, y también de la presión, temperatura y pH de la fase acuosa asociada. Este ratio volumétrico disminuye a medida que aumenta la madurez del carbón de la formación. La mayor afinidad del carbón por el CO<sub>2</sub> que por el CH<sub>4</sub> es el motivo por el cual se ha valorado la posibilidad de almacenar CO<sub>2</sub> en capas de carbón a la vez que se recupera CH<sub>4</sub> como gas de valor económico en sí mismo, lo que reduciría los costes globales de la inyección. Esta técnica se denomina *Enhanced Coalbed Methane*, ECBM.

El CO<sub>2</sub> inyectado mediante pozos fluiría a través de las fracturas de la formación, difundiría en la matriz de carbón y será adsorbido en la superficie microporosa del carbón, liberando los gases de menor afinidad con el carbón. El proceso de atrapamiento del dióxido de carbono consiste en el reemplazo gradual de la adsorción por la absorción y la difusión o disolución del CO<sub>2</sub> en el carbón.

La extracción mejorada de metano mediante inyección de CO<sub>2</sub> tiene el potencial de aumentar el nivel de CH<sub>4</sub> extraído a valores cercanos al 90%. Sin dicho proceso, se logran niveles del 50% de extracción de gas. Otra de las principales ventajas es la posibilidad de almacenar el dióxido de carbono a medio o largo plazo, mediante procesos de atrapamiento que serán descritos posteriormente.



Por contra, la baja permeabilidad del carbón presenta inconvenientes a la inyección, especialmente a medida que aumenta la profundidad, además del elevado coste por el gran número de sondeos necesarios. Otro inconveniente importante de esta opción es que el valor económico del CH<sub>4</sub> de las capas de carbón es muy inferior al del propio valor del carbón como recurso energético, y la utilización de ECBM deja al yacimiento de carbón inservible para un futuro en el que la explotación del yacimiento sí fuese viable, ya que se pretende mantener el CO<sub>2</sub> en el almacén. Por otra parte, la capacidad de adsorción del carbón y su permeabilidad se modifican durante la inyección del CO<sub>2</sub>, la extracción del gas y a medida que el CO<sub>2</sub> interactúa con la matriz. Se produce un hinchamiento en la matriz del carbón como consecuencia de la adsorción del CO<sub>2</sub> que puede provocar la fracturación de la roca encajante, pudiendo constituir posibles vías de escape para el CO<sub>2</sub>.

Una vez obtenido el CH<sub>4</sub>, éste debe ser capturado para garantizar que no es emitido a la atmósfera. El gas metano posee una elevada capacidad de efecto invernadero, muy superior a la del dióxido de carbono.

### **6.1.3. Acuíferos salinos**

Los acuíferos salinos son formaciones profundas permeables con agua con altas concentraciones de sales disueltas. Pueden ser formaciones muy extensas (del orden de km<sup>3</sup>) y contienen grandes cantidades de agua, pero que por su salinidad no son aptas como recurso hídrico. Este tipo de almacenamiento es la opción más seleccionada, debido al gran número de cuencas sedimentarias que pueden albergar este tipo de acuíferos y a su elevado volumen. Sin embargo, el CO<sub>2</sub> solo se podrá almacenar en los acuíferos que sean confinados y salinos.

El carácter confinado es imprescindible para poder almacenar el CO<sub>2</sub> inyectado y evitar su migración a la superficie. El carácter salino es necesario para evitar la alteración e inutilización de acuíferos de agua potable.

Otro de los parámetros a tener en cuenta a la hora de la inyección es la profundidad en la que se encuentre la formación, estas deben encontrarse a más de 800 metros de la superficie. El motivo es que, a partir de dicha profundidad, el CO<sub>2</sub> se encuentra en estado supercrítico ( $T = 31,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $p = 73,8 \text{ bar}$ ), en el cual se logra un fluido de altas densidades (propias de un líquido) y con propiedades hidráulicas propias de un gas.



## 6.2. Mecanismos de atrapamiento

Una vez el CO<sub>2</sub> sea inyectado en la formación almacén, éste se verá atrapado mediante diferentes mecanismos.

### 6.2.1. Atrapamiento estructural/estratigráfico

Este tipo de atrapamiento es considerado como el principal y más inmediato en el tiempo y se produce cuando el CO<sub>2</sub> es retenido entre capas de distinta permeabilidad (estratigráfico) o en trampas físicas (estructural). Algunos ejemplos de atrapamiento estratigráfico son los cambios laterales de facies o los acuñamientos sedimentológicos (Figura 6.1 a y b). Por otra parte, las trampas debidas a pliegues anticlinales (Figura 6.1 c) o a fallas (Figura 6.1 d) son ejemplos de atrapamiento estructural, y las trampas mixtas corresponden a una combinación de ambos tipos de atrapamiento (Figura 6.1 e).

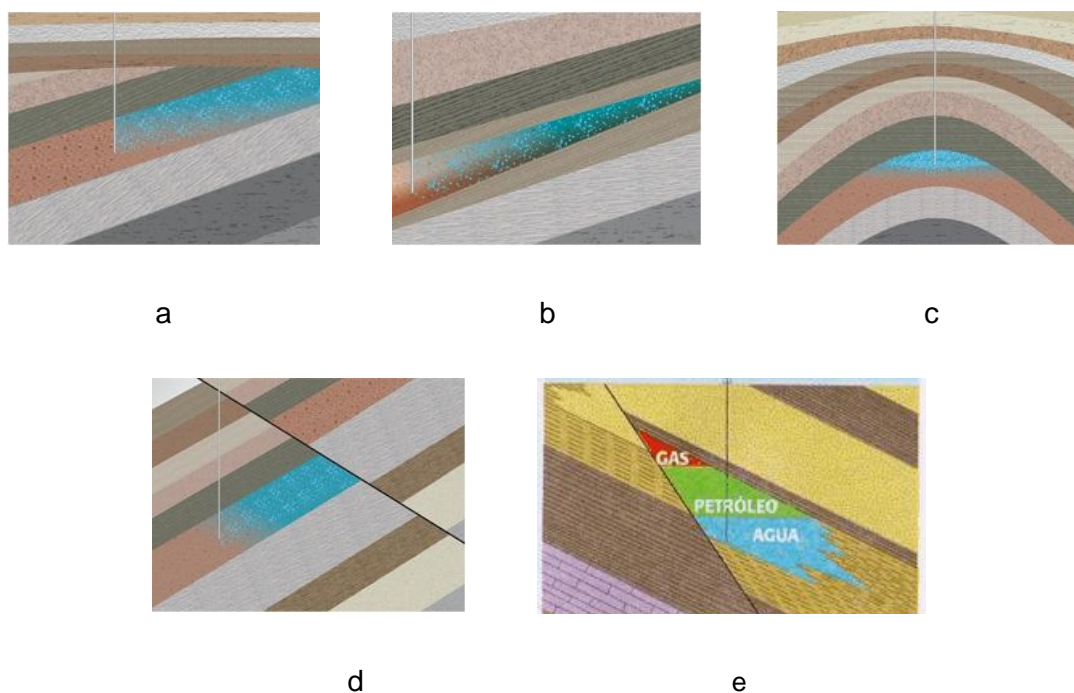


Fig. 6.1. Tipos de atrapamiento estructural/estratigráfico [CO<sub>2</sub>CRC, 2011] , [Ruiz Rivas, C., 2009]



### 6.2.2. Atrapamiento residual

Este mecanismo se produce cuando el CO<sub>2</sub> queda inmobilizado en los poros de la roca que actúa como almacén, como consecuencia de fenómenos de capilaridad (Figura 6.2.). Este tipo de atrapamiento tiene lugar después del cese de la inyección y puede inmobilizar entre un 20% y un 25% del CO<sub>2</sub> inyectado.

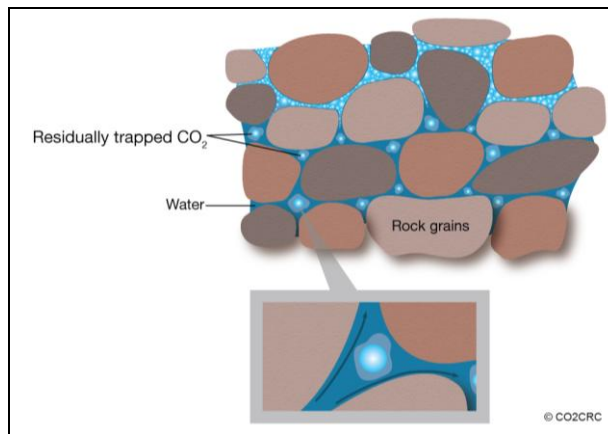


Fig. 6.2. Atrapamiento residual de CO<sub>2</sub> [CO<sub>2</sub>CRC, 2011]

### 6.2.3. Atrapamiento por solubilidad

Este fenómeno ocurre cuando el CO<sub>2</sub> inyectado se disuelve en el agua presente en la formación. La solubilidad del CO<sub>2</sub> aumenta con la presión y disminuye al aumentar la temperatura y la salinidad del agua. A medida que el CO<sub>2</sub> se disuelva en el agua, esta aumentará en densidad, hecho que provocará un descenso a niveles inferiores del almacén dando lugar a una interdigitación (Figura 6.3.). Este tipo de atrapamiento será dominante a escalas de tiempo de cientos a miles de años.



Fig. 6.3. Atrapamiento por solubilidad [CO<sub>2</sub>CRC, 2011]



### 6.2.4. Atrapamiento mineral

El atrapamiento mineral (Figura 6.4) se produce cuando el  $\text{CO}_2$ , una vez disuelto en la salmuera, reacciona químicamente con la roca almacén. El alcance de la reacción depende de la mineralogía de la roca, de la composición química del agua, y de la presión y temperatura existentes. La escala de tiempo del proceso es de decenas a centenas de años.

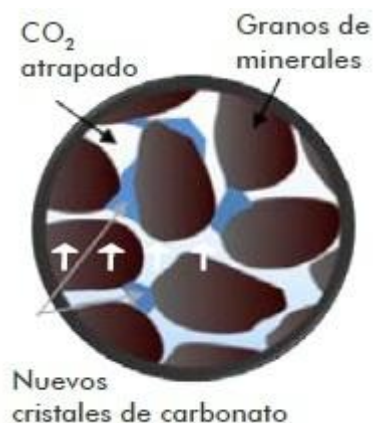


Fig. 6.4. Atrapamiento mineral [Compostilla Project, 2012]

En la Figura 6.5 se muestra la relación entre los diferentes tipos de atrapamientos y el tiempo necesario para que se produzcan.

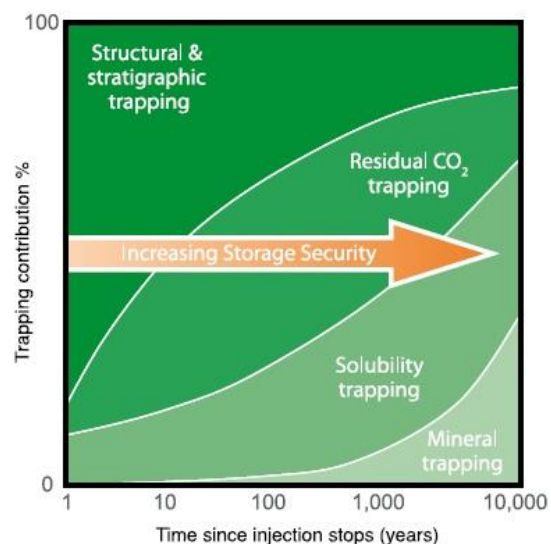


Fig. 6.5. Cambio de los mecanismos de atrapamiento dominantes e incremento de la seguridad de almacenamiento del  $\text{CO}_2$  con el tiempo [IPCC, 2005]





### **6.3. Criterios específicos y parámetros relevantes en una formación permeable profunda**

El objetivo es inyectar el CO<sub>2</sub> en un almacén de la máxima capacidad posible y con una gran solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua de la formación. Con tal de obtener dichos objetivos, se fijan una serie de criterios a la hora de escoger la formación permeable profunda que actuará como almacén del CO<sub>2</sub> inyectado.

Para que una formación permeable profunda pueda considerarse almacén, se requieren las siguientes condiciones indispensables:

- Presencia de una formación porosa y permeable que pueda desarrollar las funciones de almacén geológico.
- Existencia de una formación suprayacente de tipo impermeable, que actúe como confinante (formación de sello).
- Que la inyección del fluido a almacenar no provoque una alteración en la permeabilidad, porosidad o presión de la formación, como resultado de la disolución o precipitación de compuestos químicos.
- Que no existan recursos explotables en la formación almacén (ej: agua potable)

#### **6.3.1. Formación almacén**

Una vez aseguradas dichas condiciones, la formación deberá cumplir una serie de criterios relevantes para el desarrollo de las operaciones de inyección y almacenamiento, tales como:

##### Capacidad de almacenamiento

Varios estudios concluyen que el volumen total de los poros de una formación no equivale a su capacidad de almacenamiento. Generalmente, el porcentaje aprovechable es reducido y dependerá del tipo de estructura en cuestión; por ejemplo, en almacenes confinados la capacidad puede estar en torno a un 2% de la porosidad, y en almacenes fracturados podrá alcanzar el 6%. En cambio, si se trata de formaciones con una gran hidrodinámica, es decir que permiten un elevado movimiento de los fluidos, la capacidad podría considerarse prácticamente ilimitada.

##### Profundidad del techo del almacén

A mayor profundidad de techo del almacén, más favorables serán las condiciones de presión



y temperatura de la formación para mantener el dióxido de carbono en estado supercrítico o cerca de él. A tal efecto, las profundidades recomendadas son a partir de los 800 m, donde la probabilidad de alcanzar los 31°C es elevada.

Por otra parte, para la selección de la profundidad de inyección, no hay que olvidar que esta puede verse condicionada por una serie de factores operativos, como los rangos de operación de las bombas de inyección, y económicos, como los costes de las instalaciones y del bombeo.

#### Extensión del almacén

Otro de los aspectos destacados en una formación es su extensión, puesto que cuanto mayor sea esta, mayor cantidad de CO<sub>2</sub> se podrá inyectar.

Si se trata de formaciones horizontales, dicho factor tendrá mayor relevancia que en las estructuras geológicas en forma de domos o en anticlinales.

#### Potencia de la formación almacén

Además de la extensión, también resulta de importancia el estudio del espesor de la formación destinada al almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Con un espesor adecuado se pueden lograr óptimas tasas de inyección y capacidades de almacén.

No se ha fijado un rango de espesores ideales para el almacenamiento profundo, mas bien su elección vendrá condicionada por la capacidad deseada, y según unas características hidráulicas, de permeabilidad y de transmisividad, que serán específicas de cada formación.

#### Porosidad de la roca almacén

La porosidad depende de varios factores como el perfil de los granos, la distribución de los poros y su tamaño. Así pues, en una formación no es posible hablar de una porosidad concreta, sino de un rango de porosidades. Por ejemplo, la porosidad de las areniscas varía desde un 5% a un máximo del 30%.

El rango recomendable de porosidad ha sido fijado en un 10-12% para un almacenamiento óptimo.

Según estudios realizados por el IGME y el CIEMAT, los materiales preferentes en una formación son las rocas sedimentarias, y se consideran descartables, en principio, las rocas *cristalinas*, ya que presentan una reducida porosidad a no ser que se encuentren muy fracturadas.



### Permeabilidad de la roca almacén

En cuanto a la permeabilidad, cada tipo de roca presenta un rango más o menos amplio. Por ejemplo, en el caso de las areniscas de grano medio, esta se encuentra entre 1mm/día y 0,5m/día. En cambio, en rocas carbonatadas la permeabilidad puede variar de 1mm/día a varios miles de metros por día.

En la siguiente tabla se muestran las permeabilidades según el tipo de suelo:

Permeabilidad (m/día)	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena			Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas meteorizadas no		
Calificación	Buenos acuíferos					Acuíferos pobres			Impermeables		
Capacidad de drenaje	Drenan muy bien					Drenan mal			No drenan		

Tabla 6.1. Permeabilidades de distintas formaciones [Arenillas [et al.], 2007]

Una permeabilidad excesivamente elevada puede ser perjudicial, ya que dificultaría de forma extraordinaria el control del dióxido de carbono inyectado de forma adecuada dentro del almacén. Un valor adecuado para la permeabilidad es 0,25m/día (300mD), puesto que es considerado como el mínimo para asegurar un desplazamiento fluido del CO<sub>2</sub> a lo largo de la formación almacén.

### Salinidad del agua de la formación

Según la normativa española, el valor de la salinidad a partir del cual un acuífero no es considerado como un recurso está fijado en 10g/l. Por lo tanto, las formaciones destinadas al almacenamiento de CO<sub>2</sub> deberán superar dicho contenido en sales. Por otra parte, una salinidad demasiado elevada provocaría una disminución de la solubilidad del CO<sub>2</sub> y, por tanto, decrecería también el volumen esperado de fluido almacenado. Así pues, la formación deberá encontrarse entre dichos umbrales.

### Presión hidrostática de la formación

Tal y como se ha comentado anteriormente, almacenando el CO<sub>2</sub> en estado supercrítico se alcanza una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> almacenado. Para poder mantener el fluido en este estado es necesario que la presión hidrostática iguale o supere los 73 bares (7.3 MPa).



### **6.3.2. Formación sello**

Respecto a la roca sello, la extensión, potencia y continuidad juegan un papel relevante en su función como capa confinante del fluido almacenado y también en la minimización de posibles vías de escape.

#### Potencia del sello

El espesor de la roca sello, así como la profundidad en la que se encuentre, desempeñan un papel relevante en su capacidad para contener el dióxido de carbono en un estado óptimo y evitar su fuga hacia capas superficiales.

#### Permeabilidad y características geomecánicas de la roca sello

En la determinación del valor de la permeabilidad intervienen diversos factores, como las características litológicas, la textura de la roca presente en la formación o las características geomecánicas de la misma.

En el caso de la roca sello, las fracturas presentes en la zona donde se emplaza el almacén también afectan a la capacidad de este. La existencia de una fractura en una formación aparentemente favorable puede romper su equilibrio y provocar fugas del CO<sub>2</sub> inyectado.

### **6.3.3. Aspectos generales de una formación**

A parte de los criterios relacionados con el almacén y el sello, también cabe destacar dos aspectos relevantes que afectan a todo el área de la formación.

#### Estructura y tectónica regional del área de almacenamiento

También es importante tener en cuenta si la estructura de la formación es compleja y si existen fenómenos tectónicos y de diapirismo, puesto que pueden dificultar la continuidad y reducir la extensión de una formación almacén.

La presencia de dichos fenómenos en una formación puede ejercer un efecto tanto negativo como positivo en la capacidad del almacén dependiendo de las consecuencias provocadas. Si causan una división del nivel en el que está situado el almacén, su capacidad decrecerá. En cambio, también pueden facilitar el contacto entre almacén y sello, actuando a modo de trampa para el CO<sub>2</sub>.

Por estos motivos, es necesario contar con información sobre la presencia de dichas estructuras geológicas o de posibles fracturas por donde pueda ascender el fluido



almacenado. La realización de campañas geofísicas antes de la perforación del pozo de inyección son una fuente de información sobre estos fenómenos y estructuras.

#### Conexión con acuíferos en explotación

Es muy habitual que por encima de la formación almacén existan zonas de elevada permeabilidad y porosidad que contengan acuíferos en explotación. Según estudios elaborados por el CIEMAT, con el objetivo de detectar una posible conexión entre la formación permeable profunda destinada al almacenamiento y los acuíferos menos profundos, se pueden realizar varios tipos de ensayos hidráulicos como:

- Medición de los niveles piezométricos estáticos antes de la inyección del fluido.
- Medición inmediata de la variación de presión producida en la formación almacén tras el bombeo de agua a partir de un pozo.

En el caso de las formaciones salinas *off-shore* cercanas a la costa, será necesario asegurar su no comunicación con acuíferos *on-shore* de agua dulce, y así evitar su contaminación por la salmuera desplazada a consecuencia de la inyección de CO<sub>2</sub>.

Para que cualquier proceso de almacenamiento o uso del CO<sub>2</sub> sea exitoso, debe ser económicamente competitivo comparado con las opciones alternativas, y de una elevada eficacia en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Las alternativas deben enfocarse al almacenamiento a largo plazo que prevenga de emisiones a la atmósfera durante largos periodos de tiempo, además de ser seguros para la población y el entorno. Por otra parte, la tecnología debe ser flexible para permitir el almacenamiento, idealmente, cerca del punto de emisión de CO<sub>2</sub>.





## 7. Aplicación de la CAC en España

Numerosos estudios avalan la posibilidad de implantar la tecnología de captura de CO<sub>2</sub> y su posterior almacenamiento en formaciones permeables profundas. Respecto al almacenamiento del dióxido de carbono hay diversos aspectos a tener en cuenta a la hora de elegir el emplazamiento más idóneo. Algunos de los más destacados se muestran a continuación.

### 7.1. Criterios geológicos

Puede considerarse el aspecto más importante, puesto que si no se dispone de formaciones geológicas aptas para almacenar CO<sub>2</sub>, ya no se podría implantar la tecnología de captura y almacenamiento de forma íntegra.

Gracias al desarrollo de campañas de prospección de hidrocarburos y geotérmica en la península ibérica, hay zonas ampliamente estudiadas. Aunque dichos estudios han sido realizados de forma puntual para cada región explotada, y no de forma general y extensiva a todo el territorio peninsular. Por ese motivo, será necesario caracterizar las zonas menos conocidas a fin de elaborar de forma intensiva un mapa detallado de la Península Ibérica donde se incluyan las formaciones favorables para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

La siguiente figura muestra las zonas geológicas favorables para el almacenamiento de dióxido de carbono según el proyecto Geocapacity elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

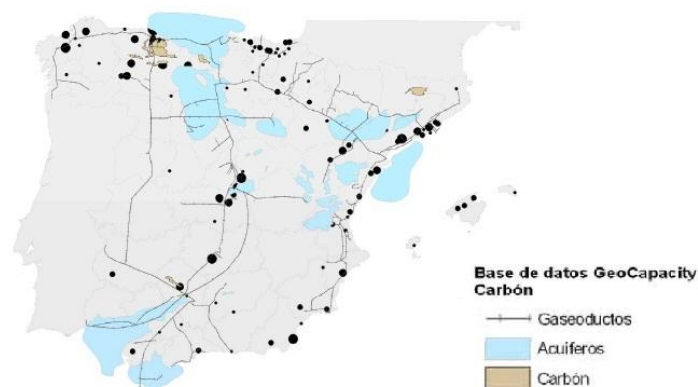


Fig. 7.1. Mapa de zonas geológicas favorables [Zapatero Rodríguez, M. A. [et al.], 2009]



## 7.2. Emisiones de CO<sub>2</sub>

Otro aspecto relevante es la localización y concentración de puntos de emisión de gases de efecto invernadero, la mayor parte de los cuales están situados sobre las zonas más industrializadas. Con el objetivo de minimizar los costes del transporte, serán más favorables para inyectar el CO<sub>2</sub> aquellas formaciones situadas a poca distancia de los puntos con elevadas emisiones de gases de efecto invernadero.

El siguiente mapa muestra los puntos de emisión de dióxido de carbono así como las cantidades emitidas en territorio español.

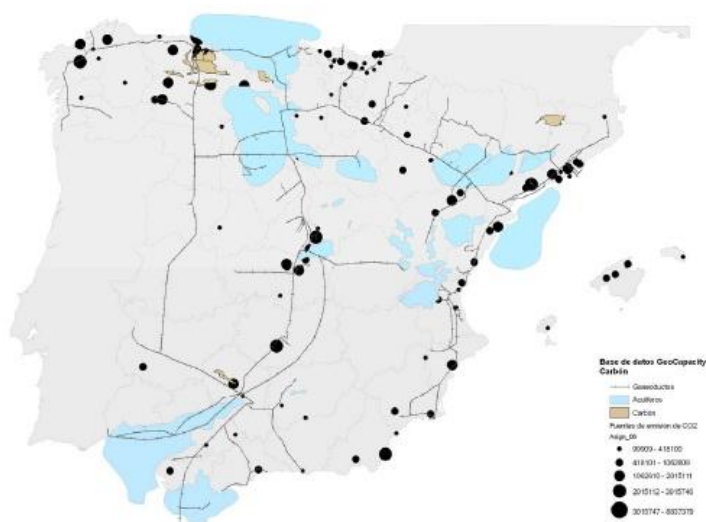


Fig. 7.2. Mapa de puntos de emisión de CO<sub>2</sub> [Zapatero Rodríguez, M. A. [et al.], 2009]

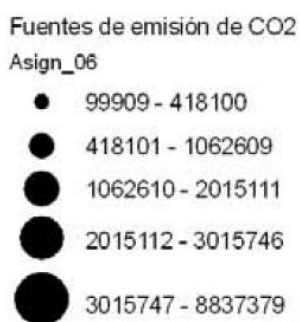


Fig. 7.3. Leyenda del mapa de puntos de emisión de CO<sub>2</sub> [Zapatero Rodríguez, M. A. [et al.], 2009]





### 7.3. Densidad de población

Respecto a los centros de población, se considera pertinente su exclusión como posible emplazamiento de un almacén de dióxido de carbono, principalmente por razones de seguridad. El motivo es que, aunque se hayan realizado unas tareas minuciosas de caracterización y selección del emplazamiento y la monitorización del CO<sub>2</sub> inyectado sea continua, no se pueden descartar por completo posibles fugas del gas.

Además, la percepción pública de los almacenes de dióxido de carbono también es un factor a tener en cuenta, puesto que no siempre es positiva. A menudo este hecho se debe a una falta de información hacia la población local, así pues es recomendable la realización de campañas de difusión informativa en aquellos colectivos afectados por los proyectos de Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

En la siguiente figura se ilustran tanto el número de habitantes de cada municipio como su densidad de población.

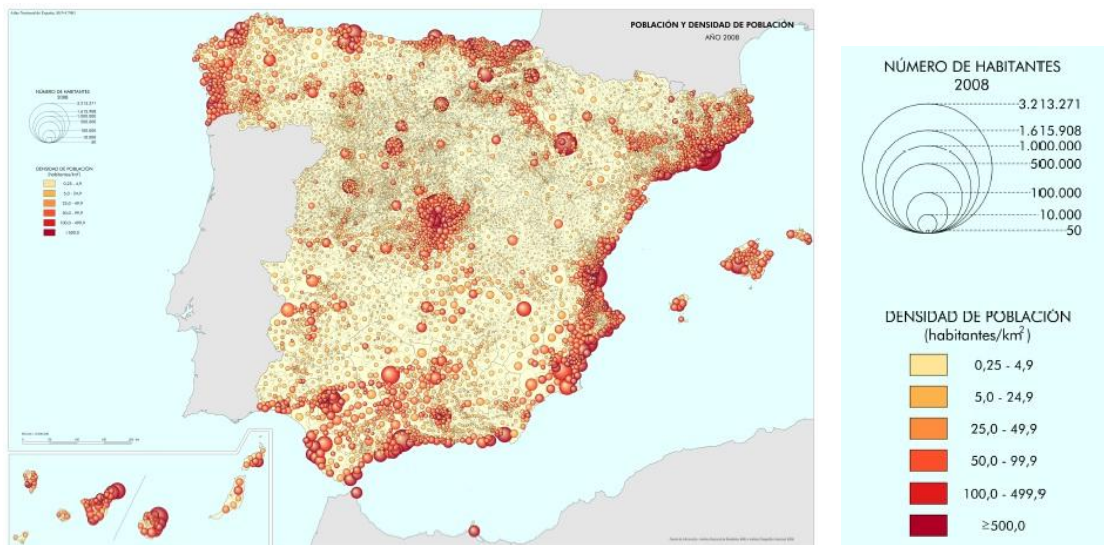


Fig. 7.4. Mapa de densidad de población española en 2008 [Atlas Nacional de España, 2012]



## 7.4. Acuíferos

Dado que es probable que algunas de las formaciones permeables profundas destinadas a convertirse en almacenes de CO<sub>2</sub> se encuentren próximas o en capas estratigráficas inferiores a acuíferos aptos para el consumo humano y agrícola, será crucial conocer al máximo detalle la localización de las reservas de agua aprovechable con el objetivo de protegerlas y evitar su contaminación.

En el siguiente mapa se ilustran las zonas acuíferas del país según el Atlas Nacional de España.

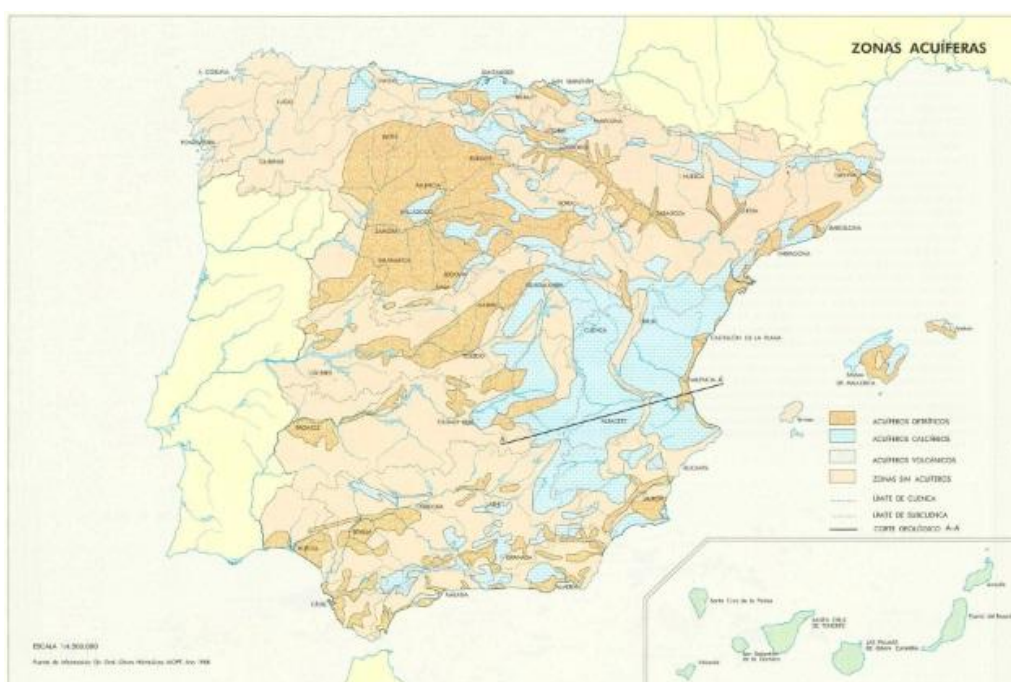


Fig. 7.5. Mapa de zonas acuíferas de España [Atlas Nacional de España, 2012]



Fig. 7.6. Leyenda del mapa de zonas acuíferas de España [Atlas Nacional de España, 2012]



## 7.5. Zonas Naturales y Protegidas

De la misma manera que se pretenden salvaguardar los recursos hídricos, es trabajo de todos intentar preservar las zonas naturales y protegidas. En este punto, aparte de elegir y caracterizar de forma idónea la formación almacén, también entran en escena las diferentes técnicas de monitorización para detectar posibles fugas de CO<sub>2</sub> y así evitar la afectación de dichas zonas naturales y protegidas.

La siguiente imagen muestra la localización, extensión y tipología de distintos espacios naturales presentes en territorio español según el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en 2011.



Fig. 7.7. Mapa de espacios naturales de España [Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011]

A parte de los criterios ilustrados anteriormente en cuanto a la selección del emplazamiento, hay otros aspectos que pueden condicionar la puesta en marcha de una instalación de CAC. Uno de ellos es la viabilidad económica del proyecto, en cuyo estudio se incluyen los costes de las operaciones de captura, transporte, compresión e inyección del dióxido de carbono.



En caso de realizarse el proyecto en una zona con infraestructuras construidas en proyectos energéticos previos, en el presupuesto solo se deberá contar el importe de su adaptación. Además, un gran número de los dispositivos a utilizar ya son de gran aplicación en otros tipos de instalaciones energéticas, así pues la estimación económica podrá ser más precisa.

Los puntos a considerar en la elaboración del presupuesto de las operaciones de inyección los conforman la profundidad de la formación permeable seleccionada, el número de pozos de inyección y control, los dispositivos y medios necesarios, y la gestión del proyecto.

También hay que añadir los costes derivados de la monitorización de la instalación y el almacén, así como de las posibles acciones de remediación de fugas o la garantía financiera establecida según la Ley 26/2007 de Responsabilidad Medioambiental.

Finalmente, el otro aspecto relevante, con independencia de donde se desarrollen las actividades de almacenamiento, es el cumplimiento estricto de la normativa legal vigente en España. La principal ordenanza en este ámbito es la Ley 40.2010, del 29 de diciembre, de Almacenamiento de dióxido de carbono. En el siguiente capítulo se muestra de forma más extensa la normativa legal de aplicación en el estado español.



## 8. Marco legal

Puesto que la Captura y Almacenamiento de dióxido de carbono no es una tecnología madura en España y su aplicación aún está en fase de demostración, la normativa legal vigente en territorio español no es lo particular, específica y extensiva que cabría desear. Algunos de los aspectos relacionados con la CAC se legislan con leyes de hace casi 40 años, o mediante Directivas Europeas en constante actualización. Por tanto, el marco legal español se podría calificar como en fase de desarrollo.

La norma de referencia para la etapa del Almacenamiento de CO<sub>2</sub> es la Ley 40/2010, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono. Por el contrario, las etapas de Captura y Transporte no poseen una normativa propia y específica, sino que se enmarcan en la legislación correspondiente al impacto ambiental.

Respecto a las emisiones, en 2005 entró en vigor la Ley 1/2005 sobre Régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero; donde se contemplan tanto los gases resultantes de procesos industriales liberados de forma voluntaria a la atmosfera, como las fugas involuntarias emitidas tanto de forma puntual como difusa. Más tarde, a raíz de la publicación de nuevas directivas por parte de la Unión Europea, se aprobó la Ley 13/2010 donde se modifican y actualizan diversos aspectos de la anterior ley para así ajustarla a la coyuntura actual.

A parte, se debe tener presente la posibilidad de que una instalación de captura, transporte o almacenamiento quede sujeta a la ley 26/2007 de Responsabilidad Medioambiental, principalmente en lo referente a prevención, evitación o reparación de los daños que estas pudieran causar.

En cuanto a las instalaciones de captura, también se deberá cumplir la ley 16/2002, del 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, responsable de velar por el cumplimiento de las medidas de prevención y control necesarias para evitar o reducir la contaminación en suelo, agua y atmosfera. En ella cabe destacar la exigencia de la tramitación de la autorización ambiental integrada, que contenga las condiciones ambientales a cumplir y los valores límite de emisión de contaminantes, cuya solicitud deberá resolverse en un plazo máximo de 10 meses y, una vez concedida, tendrá una validez de 8 años renovable por periodos sucesivos de igual duración. Además, la ley requiere la obtención previa de la declaración de impacto ambiental, sin la cual no podrá expedirse la



mencionada autorización.

Por otra parte, según la directiva europea 2009/31/CE, aquellas instalaciones con una producción de energía eléctrica igual o superior a 300MW donde la captura y el transporte de CO<sub>2</sub> sean técnica y económicamente viables, y dispongan de emplazamientos aptos para el almacenamiento de dicho gas, se verán obligadas a reservar espacio suficiente para la posible construcción de una planta de captura y compresión del dióxido de carbono.

Otra de las normativas que afectan a los proyectos de Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> es el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, sobre Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, donde se regula el procedimiento para la tramitación de la evaluación de impacto ambiental que deberán seguir los proyectos relacionados con las actividades enumeradas en el anexo I. Su solicitud se inicia por el promotor del proyecto que deberá someterse a la evaluación, quien también será el encargado de elaborar el correspondiente estudio. Una vez finalizada la gestión se emitirá la pertinente declaración de impacto ambiental, de carácter público en cualquier caso.

Dicha declaración contendrá las condiciones que deberán implantarse con el objetivo de proteger el medio ambiente y los recursos naturales. Si el proyecto en cuestión no se iniciase dentro del periodo fijado por el órgano competente a tal efecto, la declaración de impacto ambiental podría caducar y, por tanto, el procedimiento para la tramitación de la evaluación de impacto ambiental debería iniciarse de nuevo.

Por otra parte, los proyectos sobre actividades recogidas en el anexo II o que afecten a espacios de la Red Natura 2000 y no se incluyan en el anexo I, deberán consultar al órgano correspondiente la necesidad de someterse a la evaluación de impacto ambiental.

Si se iniciase un proyecto afectado por el real decreto legislativo 1/2008 sin la pertinente declaración de impacto ambiental se incurriría en una infracción muy grave. Las sanciones correspondientes impuestas a dicha infracción son multas desde 240.404,85€ a 2.404.048,42€ y la posible suspensión de la ejecución del proyecto. Además, será de obligado cumplimiento la reparación de los posibles daños medioambientales ocasionados a raíz de la comisión de las infracciones contempladas en el real decreto legislativo. Incluso, podría ser de aplicación lo dispuesto en la Ley de Responsabilidad Medioambiental.

A continuación se profundiza en algunas de las leyes destacadas anteriormente y que resultan relevantes en los proyectos de Captura, Transporte y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>.



## 8.1. Ley 40/2010

La ley española que regula los almacenes de CO<sub>2</sub>, tanto la concesión de permisos como el seguimiento del almacén y su posterior cierre, es la Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono. El objeto de esta ley es el de *“incorporar al ordenamiento interno español las disposiciones contenidas en la Directiva”* 2009/31/CE, del 23 de abril de 2009, relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono.

Dicha ley se centra en la etapa de Almacenamiento del CO<sub>2</sub>, en cuanto a las etapas de Captura y Transporte solo se realizan menciones puntuales. Las instalaciones de captura de dióxido de carbono quedan sujetas a la normativa sobre control integrado de la contaminación y a la normativa de evaluación de impacto ambiental, requiriendo además la correspondiente autorización ambiental integrada. Por lo que respecta a las redes de transporte, según la ley 40/2010, estas deberán someterse a la declaración de impacto ambiental.

En el Capítulo I se detallan las competencias en el ámbito estatal y se expone el ámbito de aplicación. Cabe destacar el artículo 4.2 donde se indica que no se concederán autorizaciones para el almacenamiento de dióxido de carbono ni sobre el lecho marino ni a lo largo de la columna de agua; por el contrario, el subsuelo marino sí se contempla como posible emplazamiento para almacenar el CO<sub>2</sub>.

En el Capítulo II se regula la tramitación de permisos de investigación y concesiones de almacenamiento. Los permisos de investigación se concederán en los supuestos en que se requiera el estudio de la capacidad de almacenamiento o la caracterización de una formación para determinar su idoneidad como almacén. Según el artículo 8, tendrán una validez de 4 años prorrogable por 2 años más, y se limitarán a una extensión superficial de 100.000 hectáreas como máximo y una profundidad indefinida.

En cuanto a las concesiones de almacenamiento, estas serán indispensables para la puesta en marcha de las operaciones de inyección y almacenamiento del CO<sub>2</sub>, siempre y cuando la formación geológica seleccionada cumpla los requisitos expuestos en el Anexo I de esta ley. El artículo 10.6 dispone que las concesiones de almacenamiento tendrán una duración de 30 años prorrogable por dos periodos sucesivos de 10 años; a diferencia del caso anterior, la extensión superficial no ha sido fijada sino que se indicará en dicha concesión.



En el Capítulo III se describe el funcionamiento y posterior cierre de un almacenamiento geológico de dióxido de carbono, y se informa de la realización de inspecciones por parte de los órganos competentes. En el artículo 18 se fija el contenido del flujo de gas a inyectar en la formación almacén a dióxido de carbono en su mayoría, quedando prohibida la incorporación de residuos u otras sustancias. Sí se contempla la posibilidad de un flujo de gas con presencia de sustancias derivadas del proceso de captura y posterior tratamiento del CO<sub>2</sub>, o que a consecuencia de la aplicación de técnicas de monitorización para controlar la migración del CO<sub>2</sub> inyectado se añadan trazadores.

En los artículos 19 y 20 se nombran las obligaciones por parte del titular de la instalación en cuanto a seguimiento y presentación de la información requerida.

Finalmente, en los artículos 23, 24 y 25 se establecen las directrices a seguir en el momento de la clausura de una instalación de inyección. Para proceder al cierre del lugar de almacenamiento, el titular deberá elaborar un plan de gestión posterior al cierre conforme a los criterios establecidos en el Anexo II de la ley. El siguiente paso es la transferencia de todas las responsabilidades y obligaciones legales por parte del titular a la Administración General del Estado, siempre y cuando previamente se hayan cumplido todos los requisitos mencionados en el artículo 24.1 y se disponga de la garantía financiera anunciada en el artículo 25.

En el Capítulo IV se especifica el acceso a terceros en redes de transporte y lugares de almacenamiento, y se regula el proceso para la resolución de los conflictos que se puedan producir.

En el Capítulo V se impone el registro y la publicación de los almacenes de CO<sub>2</sub>. Por parte del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, se creará un registro donde figurarán los permisos de investigación y las concesiones de almacenamiento expedidas a los titulares de las distintas instalaciones. El registro de los lugares de almacenamiento ya clausurados compete al Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, en él se debe incluir toda la información necesaria para valorar si el confinamiento del CO<sub>2</sub> almacenado será permanente y completo.

A parte, la ley dispone que las Administraciones Públicas sean las encargadas de poner a disposición del público toda aquella información vinculada al ámbito del almacenamiento geológico de dióxido de carbono.





En el Capítulo VI se establece el régimen sancionador para las diferentes infracciones que puedan producirse. La ley clasifica las infracciones en tres niveles, muy graves, graves y leves, y dictamina las correspondientes sanciones dependiendo del peligro derivado para la salud humana y el medio ambiente, la reincidencia en la comisión de las infracciones, la intencionalidad de las entidades responsables, y la gravedad del daño causado. Son ejemplos de infracciones muy graves el realizar operaciones de inyección de CO<sub>2</sub> sin contar con los permisos o concesiones pertinentes, o falsear datos en la transferencia de responsabilidad de un lugar de almacenamiento. Por otro lado, se tipifican como infracciones graves no disponer de la garantía financiera en el inicio de las operaciones de inyección, no comunicar de forma inmediata la detección de fugas u otras irregularidades en las instalaciones, o el incumplimiento del protocolo establecido para la clausura de un emplazamiento de inyección de CO<sub>2</sub>. Y finalmente, son tipificadas como leves aquellas infracciones de las directrices recogidas en la ley 40/2010 que no aparezcan en los artículos 31 y 32 de dicha ley.

Las sanciones establecidas en el artículo 35 son principalmente de carácter económico y en algunos casos también pueden comportar la retirada de la concesión de almacenamiento, la clausura del almacén de CO<sub>2</sub> o la cancelación de las operaciones de inyección.

La Ley 40/2010 de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> se ampara en los artículos 149.1.23.<sup>a</sup>, 149.1.25.<sup>a</sup> y 149.1.13.<sup>a</sup> de la Constitución Española sobre medio ambiente, régimen energético y actividad económica. Dado que la captura y almacenamiento de dióxido de carbono es una de las medidas destinadas a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, también cabe destacar como justificación para esta ley el hecho de que los focos industriales emisores de CO<sub>2</sub> susceptibles a utilizar la CAC están sujetos al régimen de comercio de derechos de emisión. Tal como se menciona en la ley, *“En la medida en que la obtención de derechos de emisión tiene un coste, existe un incentivo económico para reducir las emisiones.”*, la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> no solo contribuye a reducir o anular las emisiones de dióxido de carbono y su consecuente pago de derechos de emisión, sino que puede reportar beneficios para aquellos colectivos que apuesten por su desarrollo.

## 8.2. Ley 13/2010

La ley 13/2010, del 5 de julio, es la actualización de la ley 1/2005, del 9 de marzo, por la que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero,



cuyo objetivo era la transposición de la Directiva Europea 2003/87/CE, del 13 de octubre de 2003. A raíz de la aparición de dos nuevas directivas, entre finales del 2008 y mediados del 2009, la 2008/101/CE sobre la reducción del impacto causado por la aviación al Cambio Climático y la 2009/29/CE que revisa al detalle el régimen de comercio de derechos de emisión, se hizo evidente la necesidad de adaptar la legislación vigente a la nueva realidad en materia de comercio de emisiones y poder incluir en su ámbito de aplicación nuevos sectores como el de la aviación.

Dichas ordenanzas tienen su origen en los compromisos promovidos por el Protocolo de Kioto y podrían considerarse un instrumento para fomentar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, bien sea por el aumento en la utilización de tecnologías limpias o por la captura de dichas emisiones.

Así pues, la ley tiene como objetivo impulsar y regular el comercio de emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de las actividades recogidas en el anexo I de la ley 1/2005.

En el Capítulo I cabe destacar la creación de una Comisión de coordinación de políticas de cambio climático, que se encargará de la coordinación y colaboración entre las Comunidades Autónomas y la Administración General del Estado en materia de comercio de derechos de emisión. Una de sus funciones principales será la de cumplir con las obligaciones informativas de ámbito internacional y comunitario.

En el Capítulo II se detalla el procedimiento a seguir para la obtención de la autorización de emisión necesaria para todas aquellas instalaciones que realicen las actividades contempladas en el anexo I de la ley precedente. La autorización de emisión, según el artículo 4, contemplará los datos personales del titular y la identificación de la instalación, un plan de seguimiento de las emisiones conforme a lo estipulado en la normativa aplicable, las obligaciones de suministro de información y de utilización de formatos de intercambio de datos y sistemas automatizados, la entrega de los derechos de emisión requeridos en los periodos establecidos, la apertura de una cuenta de haberes en el registro de derechos de emisión e informará sobre la fecha prevista de puesta en marcha de la instalación.

En el Capítulo III de la ley modificada se especificaban las condiciones para la agrupación de instalaciones, pero la nueva ley deroga dicho capítulo a partir del 1 de enero de 2013 alegando la imposibilidad, a nivel comunitario, de la formación de agrupaciones para el comercio de derechos de emisión.



En el Capítulo IV se describe el funcionamiento para la asignación de los derechos de emisión. Según la ley del 2005 se realizaba mediante el Plan Nacional de asignación, cuyo periodo de vigencia finalizará el 31 de diciembre de 2012. A partir del 1 de enero de 2013 se procederá a aplicar la legislación contenida en la ley 13/2010, donde se contemplan dos vías distintas para la asignación de derechos de emisión: la Subasta y la Asignación gratuita transitoria.

Es competencia de la Secretaría de Estado de Cambio Climático tanto la organización de las subastas conforme a lo establecido en las directivas comunitarias, como la posterior publicación de un informe donde se recoja el desarrollo de la misma.

La asignación gratuita transitoria será el método utilizado en los supuestos recogidos en esta ley y podrá cubrir la totalidad o una parte de los derechos de emisión, su procedimiento de asignación será definido por normativas de ámbito comunitario. Como particularidad, no se contempla la concesión gratuita a los generadores de electricidad ni a las instalaciones de captura, transporte o almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

En el Capítulo V se define el concepto de derechos de emisión, que corresponde a la emisión legítima de una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente a la atmosfera.

Además, también se describe el funcionamiento de los periodos de comercio, cuya duración se ha fijado en 8 años.

En el Capítulo VI se informa a los titulares de cada instalación emisora la obligatoriedad de comunicar periódicamente, mediante un informe de acuerdo a la parte A del anexo III, la cantidad de dióxido de carbono emitida durante el año anterior; acto seguido el informe deberá ser verificado conforme a lo establecido en la parte A del anexo IV de esta ley. Una vez se realice la verificación y esta sea favorable, se procederá a inscribir los datos de emisiones contenidos en el informe en el Registro de derechos de emisión.

Además, la nueva ley 13/2010 introduce la creación de una base de datos donde se recogerá la información contenida en dichos informes, su gestión compete tanto a las Comunidades Autónomas como a la Administración General del Estado.

En el Capítulo VII se procede a explicar el propósito y las funciones del Registro comunitario de derechos de emisión, que se define como *“el instrumento a través del cual se asegura la publicidad y permanente actualización de la titularidad y control de los derechos de emisión”*.



Así mismo, la ley declara el carácter público del registro, accesible para todo aquel que esté interesado. La gestión del mismo a nivel estatal recae en el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

A parte, se especifica que no será necesaria la entrega de derechos para aquellas emisiones cuya captura, transporte y almacenamiento esté comprobado.

Finalmente, la ley incorpora un artículo sobre la utilización de las unidades de reducción de emisiones (URE) y las reducciones certificadas de emisiones (RCE), definidas en los artículos 6 y 12, respectivamente, del Protocolo de Kioto.

En el Capítulo VIII se establece el régimen sancionador así como la graduación de las infracciones y sus correspondientes sanciones según sean muy graves, graves o leves. Son consideradas como acciones muy graves la emisión de gases de efecto invernadero sin poseer la autorización correspondiente, o el hecho de no proporcionar los datos necesarios para las verificaciones periódicas o directamente no entregar el informe verificado exigido en el artículo 22. El incumplimiento de los requisitos de seguimiento de las emisiones y la consecuente alteración de los registros, o el hecho de encubrir o modificar los datos requeridos en las solicitudes de autorizaciones de emisión se tipifican como infracciones graves. Finalmente, se clasifican como leves el incumplimiento de los requisitos de seguimiento de las emisiones cuando ello no conlleve una alteración en los datos correspondientes, o el incumplimiento de cualquier otra obligación mencionada en esta Ley que no se considere una infracción grave o muy grave.

Las sanciones establecidas son principalmente de carácter económico, y en algunos casos también pueden suponer la suspensión de la autorización de emisión o incluso el cierre de las instalaciones infractoras, todo ello dependiendo de la gravedad de las infracciones.

Finalmente, la ley 13/2010 introduce un nuevo capítulo, el IX, donde se incluyen todas las disposiciones relacionadas con la Aviación.

### **8.3. Ley 26/2007**

La ley 26/2007, del 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental, se ampara en el artículo 45 de la Constitución Española.

En el Capítulo I se fija el ámbito de aplicación de la ley, que se centra principalmente en las



actividades enumeradas en el anexo III, pudiendo aplicarse a otras actividades si se demuestra la existencia de fraude, negligencia o culpa. Asimismo, quedan exentos del cumplimiento de la ley los conflictos armados, algunos desastres naturales o la defensa de la seguridad nacional, así como los sucesos regulados por alguno de los convenios internacionales recogidos en el anexo IV y en el anexo V.

También cabe destacar que solo se podrá aplicar la ley dentro de los 30 primeros años desde la finalización del incidente medioambiental. A parte, es importante tener presente que dentro de la ley solo se contemplan los daños causados al medio ambiente, no a personas físicas, ni a propiedades privadas o pérdidas económicas.

Finalmente, en el artículo 7 se describen las Competencias administrativas, que corresponden a las comunidades autónomas siempre y cuando el daño medioambiental se localice únicamente en dicha comunidad, o a la Administración General del Estado en caso de que el daño afecte a emplazamientos de titularidad estatal o por causas de extrema gravedad.

En el Capítulo II se establecen las bases para la atribución de responsabilidades y se determinan los supuestos en los que el operador deberá acarrearse con los gastos de las obligaciones pecuniarias. Cabe destacar el artículo 9, donde se especifica que *“los operadores de las actividades económicas o profesionales incluidas en esta ley están obligados a adoptar y a ejecutar las medidas de prevención, de evitación y de reparación de daños medioambientales y a sufragar sus costes, cualquiera que sea su cuantía, cuando resulten responsables de los mismos”*; además, también están obligados a notificar posibles daños o la amenaza de que se produzcan en el mismo momento de su detección y a participar en la determinación de las medidas reparadoras pertinentes.

En el Capítulo III se describen las obligaciones a las que están sujetas las entidades que desarrollen alguna de las actividades mencionadas en el anexo III, quedando estipulada, por parte de los operadores responsables, la adopción de medidas preventivas en caso de amenaza de daño medioambiental o de acciones de evitación y reparación si se llega a producir un daño medioambiental, de conformidad con lo establecido en el anexo II. Dependiendo de la existencia o ausencia de fraude, culpa o negligencia, las medidas impuestas a los responsables serán unas u otras. En cualquier caso, sí deberán informar de inmediato a la autoridad competente de la detección de la amenaza o el daño medioambiental. En los artículos 18 y 21 se detallan las potestades de las autoridades



competentes con el objetivo de velar por el cumplimiento de la ley, quedando aprobada la actuación directa de la Administración en los supuestos recogidos en el artículo 23.

En el Capítulo IV se anuncia la imposición, a los operadores afectados por esta ley, de contar con una garantía financiera suficiente para asumir los costes de los posibles daños, únicamente de carácter medioambiental, que puedan causar las actividades que ellos desarrollen. La garantía financiera será cuantificada por los órganos competentes, pero en ningún caso podrá superar los 20.000.000€. A parte, la ley prevé la creación de un Fondo estatal de reparación de daños medioambientales para hacer frente a las medidas de prevención, evitación y reparación contempladas en los artículos 7.3, 14.2 y 15.2.

En el Capítulo V se regulan las posibles infracciones que puedan producirse y sus correspondientes sanciones. Serán consideradas infracciones muy graves el hecho de no poseer la garantía financiera en los términos establecidos por la ley, el incumplimiento de los artículos 17, 19 o 20 cuando ello provoque un daño que pretendía evitarse o se deteriore la eficacia de las medidas reparadoras que debían de haberse adoptado, o no notificar de forma inmediata un daño medioambiental o su amenaza y así ocasionar el agravio de sus consecuencias. Por otra parte, se clasifican como graves el hecho de incumplir las obligaciones estipuladas en el artículo 9, no prestar los datos demandados a la autoridad competente según lo exigido en los artículos 18 y 21, o incurrir en las infracciones antes mencionadas cuando estas no sean consideradas como muy graves.

Las sanciones recogidas en la ley son de carácter económico, dependiendo su cuantía de la gravedad de la infracción, y la posible retirada o suspensión de la autorización por uno o dos años.

En el Capítulo VI se detalla el procedimiento a seguir en la exigencia de responsabilidades. Así pues, se especifica a quien corresponde iniciar el proceso, las medidas provisionales que se deberán adoptar durante la tramitación del mismo, y quien posee las competencias para dictar una resolución al respecto.

También se destaca el carácter público de la información referente a los daños medioambientales acaecidos y las correspondientes medidas adoptadas.

Además, se contempla la ejecución forzosa por parte de las autoridades competentes en caso de incumplimiento por parte de los responsables, o si los daños causados son graves o si la amenaza es inminente.



## 9. Monitorización

Durante el ciclo de vida de un proyecto de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, es necesario controlar el confinamiento del fluido inyectado mediante técnicas de monitorización. Dichas técnicas se emplean para:

- Controlar las condiciones asociadas a las operaciones de inyección, como las condiciones del pozo, las tasas de inyección, o las presiones en la parte superior del pozo y en la formación.
- Verificar la cantidad de CO<sub>2</sub> ya almacenada en el reservorio.
- Optimizar la eficiencia del proyecto de almacenamiento.
- Demostrar que el CO<sub>2</sub> se mantiene confinado en la formación almacén.
- Detectar posibles fugas y proporcionar una alerta rápida para poder controlarlas de forma eficaz.
- Evaluar la integridad de los pozos almacenados.
- Calibrar y confirmar los modelos predictivos.
- Establecer las condiciones de base de la zona de inyección y así poder detectar los posibles cambios después de las operaciones de inyección y durante el almacenamiento.
- Detectar la posible microsismicidad asociada a un proyecto de almacenamiento.
- Medir los flujos de CO<sub>2</sub> en superficie y, en caso de ser necesario, diseñar las actividades de remediación.

En general, los proyectos de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> se pueden dividir en cuatro fases:

1. Pre-Operacional
2. Operacional
3. Clausura
4. Post-Clausura

Según en qué fase se encuentre el proyecto, se aplicaran diferentes técnicas con el fin de obtener los datos o la información necesaria con la mayor eficacia posible. Las diferentes técnicas destinadas a la monitorización se pueden clasificar según el medio que analizan:

- Atmosféricas: Determinan la concentraciones de dióxido de carbono en el aire/atmosfera inmediatamente superior al terreno del área de almacenamiento.
- Superficiales: Son técnicas que permiten determinar cambios en las condiciones



físico-químicas de la interfase suelo-atmósfera. Se incluyen los estudios de calidad de surgencias de aguas subterráneas y cursos fluviales.

- Profundas: Permiten identificar la localización y evolución temporal del penacho de CO<sub>2</sub>, la propagación de la presión, y la integridad de la formación almacén y sello.

Uno de los pasos previos a realizar antes de la primera fase del proyecto es la selección de posibles emplazamientos donde realizar las tareas de inyección. Los pasos recomendados según el NETL (National Energy Technology Laboratory) son: 1) Desarrollar modelos geológicos para las diferentes formaciones a estudiar, 2) Realizar simulaciones sobre la inyección y los movimientos del CO<sub>2</sub> dentro del reservorio, 3) Incluir en los modelos y simulaciones antes mencionados la respuesta de las diversas técnicas de monitorización.

## 9.1. Fase pre-operacional

Durante la fase pre-operacional, se desarrolla el diseño del proyecto, se establecen las condiciones de base, se realizan las caracterizaciones geológicas pertinentes y se identifican los riesgos potenciales.

Algunas de las técnicas de monitorización que se presentarán a continuación también se utilizan en la caracterización de almacenes de gas natural, de inyección de agua, o en almacenes de residuos peligrosos.

Durante la fase pre-operacional se desarrollan, entre otras, las acciones siguientes:

- Determinación de las características de base de la formación almacén, y de la formación de sello.
- Información sobre los límites de la formación, incluyendo continuidad, espesor de las capas rocosas, litología, integridad, presencia de fracturas y como poder asegurar la contención del CO<sub>2</sub> en el almacén.
- Información acerca de todos los pozos en el área del proyecto, incluyendo los pozos ya clausurados, los que han sido reacondicionados y los que tienen medidas correctivas.
- Planes para respuestas de emergencia y acciones de mitigación.

Una vez se han caracterizado las formaciones y se han establecido las condiciones de base, los organismos competentes han de autorizar las acciones o los procedimientos propuestos en esta primera fase.





Las herramientas de monitorización empleadas en esta fase deben ser capaces de determinar la presión dentro de la formación almacén y en la entrada de los pozos; establecer la línea de base o inicial de los flujos de CO<sub>2</sub> en superficie, de la composición química de las aguas subterráneas y las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>.

El conjunto de técnicas de monitorización más utilizadas en esta primera fase son de tipo geofísico y su función es evaluar las condiciones geológicas de referencia en y alrededor de la zona de inyección de dióxido de carbono. Entre ellas cabe destacar:

- Sondeos sísmicos.
- Estudios gravimétricos y magnetelúricos.
- Control y seguimiento de pozos situados en la zona de inyección y alrededores.
- Análisis de las muestras de aguas superficiales y subterráneas.
- Control de la presión y la temperatura.

Los *Step-rate tests* realizados previamente a las operaciones de inyección, pueden indicar la presión de inyección máxima permitida sin que se produzcan fracturas. Estos test solo es necesario realizarlos una vez por cada pozo de inyección perforado, previamente a la operación de inyección.

Para realizar las tareas de evaluación de la geología del terreno se dispone de varias herramientas:

- Los **sondeos**, una técnica relativamente sencilla que se puede usar para evaluar la litología de la zona muestreada en función de la profundidad. Se debe tener en cuenta que los sondeos sólo proporcionan información geológica representativa de un volumen de roca relativamente pequeño ya que los cambios laterales en las formaciones pueden ser muy significativos sobre distancias cortas.
- Los **registros de pozos**, que son métodos habituales para evaluar la formación geológica. Consisten en hacer descender instrumental y obtener un perfil sobre una o varias propiedades físicas a lo largo de todo el pozo. Este tipo de métodos pueden proporcionar información detallada sobre las características de la roca y los fluidos, en la zona situada inmediatamente alrededor el “*casing*”.
- Las **técnicas electromagnéticas** y los **métodos sísmicos**, que son capaces de proporcionar una representación gráfica sobre un área extensa, y no se limitan a un solo punto de muestreo. Estas técnicas proporcionan información detallada sobre el subsuelo.



Por otro lado, en los estudios de monitorización se aplican métodos geoquímicos, que se basan en detectar los posibles cambios en la calidad y la composición de las aguas subterráneas como posibles indicadores de fugas desde el almacén profundo.

Otro tipo de técnicas de monitorización, denominadas de *superficie* y *atmosféricas*, evalúan las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosféricas y del subsuelo, en las cercanías del punto de inyección. Es necesario detectar los puntos de emisión de dióxido de carbono naturales y antropogénicos que no estén relacionados con las operaciones de inyección previstas, con motivo de evitar falsos positivos en las futuras operaciones de detección de fugas.

Las principales técnicas empleadas en la monitorización de la superficie y la atmosfera son:

- Detectores atmosféricos de CO<sub>2</sub>.
- Cámara de acumulación.
- Sistemas avanzados de detección de fugas.
- Covarianza de Eddy.
- Muestreo de suelos y zonas no saturadas.

## 9.2. Fase operacional

Durante la fase operacional se realizan tres tipos diferentes de monitorización

- Operacional: Controla parámetros directamente relacionados con la inyección, como la presión en el punto de inyección, en el reservorio y en el contorno del pozo, los perfiles de flujo de inyección, y demás.
- De verificación: Dar soporte a la operacional con el objetivo de comprender y contrastar los datos obtenidos por ésta.
- Ambiental: Control de los riesgos para la salud, el medio ambiente y la seguridad. En caso de detectar riesgos graves, estos también serán estudiados en la monitorización operacional.

El objetivo de la monitorización operacional es velar por la seguridad durante las actividades de inyección.

Las técnicas de monitorización se aplican en las tareas de:

- Detección y selección de emplazamientos para la inyección.
- Medición de flujos de gases y de calidad de las aguas para contrastar con los datos de la línea de base elaborada durante la fase pre-operacional.



- Perforación e instilación de los pozos.
- Pruebas de integridad de pozos
- Pruebas de integridad de la formación almacén y de la roca sello.

Y deben ser capaces de:

- Determinar la presión en el extremo superior del pozo y en las paredes.
- Medir las concentraciones de gases del subsuelo, de agua subterránea y de CO<sub>2</sub> atmosférico.
- Controlar de forma continua los flujos (o ratios) de inyección.
- Seguimiento del volumen inyectado.

Las diferentes técnicas de monitorización se pueden clasificar en:

**Métodos Geofísicos:** Sondeos sísmicos, electromagnéticos, control y seguimiento de los pozos, monitorización de la presión y la temperatura, y recogida y análisis de muestras en los pozos de monitorización. Dichos métodos son los mismos que se mencionan en el anterior apartado de Fase pre-operacional.

Además, los sensores de presión instalados en la parte superior del pozo y en las paredes del pozo pueden proporcionar medidas instantáneas de presión, durante todas las fases del proyecto.

**Métodos Geoquímicos:** Se utilizan para detectar los posibles cambios en la calidad y la composición del agua subterránea y del fluido inyectado, con respecto a los valores de base (valores iniciales).

**Monitorización atmosférica y de superficie:** Empleados para evaluar las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el suelo y en la atmosfera en la zona donde se sitúa en punto de inyección. Algunos de los dispositivos más empleados son las cámaras de acumulación, los sistemas avanzados de detección de fugas y las técnicas de covarianza de Eddy.

En caso de detectar emisiones procedentes de las operaciones de inyección, es necesario controlarlas y corregirlas de forma inmediata. Estas posibles emisiones pueden estar relacionadas con fracturas en el extremo superior del pozo, daños en el sistema de transporte del dióxido de carbono, fugas alrededor del contorno del pozo, o movimientos del fluido ya inyectado y situado en la formación almacén.

Además, se deberán situar detectores de CO<sub>2</sub> de funcionamiento continuo en las zonas de



trabajo de los operarios. Así, se pueden medir las concentraciones de CO<sub>2</sub> y dar la alarma si estas estuvieran por encima de los niveles de seguridad.

### 9.3. Fase de clausura

Las actividades de monitorización desempeñadas durante la fase operacional deberán mantenerse en funcionamiento durante la fase de clausura.

La clausura del pozo y el cierre de la instalación contribuyen en la protección de la atmosfera y los recursos hídricos de agua subterránea frente a posibles fugas de dióxido de carbono.

Antes de clausurar un pozo de inyección, los operarios y responsables de la instalación deben notificar a las autoridades correspondientes los planes previstos a realizar durante la fase de clausura. Posteriormente, se debe proceder a realizar las operaciones de cierre conforme a lo establecido entre autoridades y responsables del proyecto.

Generalmente, el material usado en el cierre de un pozo es cemento resistente al CO<sub>2</sub> a largo plazo. Para garantizar el equilibrio estático y la idoneidad del cemento se realizan varias operaciones de monitorización mediante diversos tipos de técnicas mecánicas como las pruebas de integridad.

Algunos de los aspectos importantes a tener en cuenta a la hora de clausurar un pozo se presentan a continuación:

- El pozo debe cerrarse con cemento de forma que evite el movimiento del fluido hacia zonas con recursos hídricos de agua subterránea.
- El pozo deberá estar en equilibrio estático con el tapón, se deben evitar sobrepresiones y acciones de compresión en el tapón.
- Los materiales utilizados deben ser compatibles con los fluidos con los que estarán en contacto, y deben evitar que estos migren a zonas situadas fuera de los límites del almacén establecidos previamente.
- Será necesario determinar la idoneidad de los tapones de cemento mediante técnicas mecánicas.

Se permite una cierta flexibilidad para escoger los materiales a utilizar en el cierre de un pozo.



## 9.4. Fase de post-clausura

La monitorización durante esta fase se debe de centrar en los siguientes puntos:

- Registrar las variaciones en la presión entre la fase pre-operacional y el periodo posterior a la inyección.
- La situación prevista del penacho y el frente de presiones asociado al instante de cierre del pozo de inyección
- Descripción de la localización de los dispositivos de monitorización durante el periodo posterior a la inyección, así como de los métodos y la frecuencia en la toma de muestras.
- Minimizar las posibles fugas verticales de CO<sub>2</sub> hacia la atmosfera.

La sísmica 3D y los pozos de monitorización instrumental son herramientas útiles para controlar la posición de la pluma de CO<sub>2</sub> y el frente de presiones, así como identificar las posibles fugas verticales hacia la superficie. Los datos sobre la presión de la formación y de la zona circundante, y también la disminución de la presión, pueden indicar si el movimiento del CO<sub>2</sub> se desarrolla dentro del área prevista.

La Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos recomienda un periodo de post-clausura de 50 años, durante el cual se continuarán realizando campañas de monitorización. Si al finalizar este periodo no se han detectado fugas, entonces se considera que ya no es necesario continuar con la monitorización.





## 10. Sensores

Aun habiendo realizado una minuciosa caracterización de la formación almacén, las fugas de CO<sub>2</sub> no pueden ser descartadas. Hay diversos factores que pueden afectar a las condiciones de la formación permeable profunda produciendo cambios en la misma, son un ejemplo los gradientes de presión inducidos por la inyección de dióxido de carbono o la naturaleza variable de las capas de las formaciones geológicas previstas para confinar el CO<sub>2</sub> inyectado.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> que son consideradas como fugas son aquellas que se producen desde el depósito de almacenamiento geológico hacia la superficie del suelo. En la siguiente figura se ilustran diferentes tipos de fugas que pueden producirse.

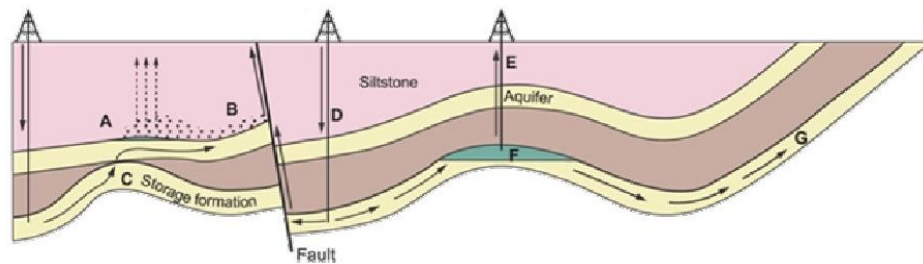


Fig. 10.1. Posibles vías de fuga del CO<sub>2</sub> [Benson, 2005]

Caso A: Este primer caso representado en la figura anterior corresponde a una fuga dispersa del dióxido de carbono hacia la superficie, como resultado de que la presión del CO<sub>2</sub> gas supera la presión capilar de la roca sello. Desde el punto de vista geológico, esta situación no alcanza a ser totalmente realista puesto que el transporte del dióxido de carbono a través de la roca sello se supone suficientemente lento como para que este reaccione químicamente con la roca y se produzca un atrapamiento mineral del gas. Sí podría ocurrir en presencia de una fractura en la roca sello, dado que esta actuaría como vía de escape preferente hacia la superficie (caso B).

Caso B: Las fugas de gas del caso anterior, en lugar de llegar hasta la superficie de forma dispersa y por capilaridad, alcanzan una falla por donde migran hacia la superficie de forma más concentrada.



Caso C: El CO<sub>2</sub> almacenado en una formación permeable profunda se escapa hacia acuíferos superiores debido a una ausencia local de roca sello, ya sea por una inexistencia previa a las operaciones de inyección o bien por su degradación a causa de la reacción CO<sub>2</sub>-agua-roca. Si este caso llegara a producirse significaría una falta de eficiencia en las tareas de caracterización de la formación previas a las operaciones de inyección, puesto que cuando se estudia una formación para que sirva de almacén de CO<sub>2</sub> se debe asegurar la presencia de una formación sello con suficiente potencia como para confinar el gas y evitar su migración hacia zonas más superficiales.

Caso D: El dióxido de carbono inyectado en una formación provoca un aumento de la presión en la misma y un incremento de la permeabilidad de una falla cercana, con el consecuente escape del gas hasta la superficie.

Caso E: El CO<sub>2</sub> almacenado en un acuífero salino se escapa a través de un pozo abandonado o no operativo. Dichos pozos constituyen una de las principales vías preferenciales de fugas de CO<sub>2</sub>, sobretodo en zonas con alta actividad de exploración y extracción petrolífera. Habitualmente, los pozos abandonados no disponen de un sellado eficiente, ya sea por una mala construcción, por unas operaciones de clausura deficientes o bien por la degradación del material usado para el sellado. En la mayor parte de los casos, el material usado es un cemento no preparado para la corrosión del CO<sub>2</sub>.

Caso F y G: El CO<sub>2</sub> inyectado se disuelve en el medio acuoso del acuífero y es transportado fuera de la formación almacén, hacia la superficie.

Otra posible vía de emisión de CO<sub>2</sub>, no ilustrada en la imagen anterior, son los “blow-out” o reventones en los pozos de inyección. Estas fugas de gas son emisiones no controladas a través de los mismos pozos de inyección, y acostumbran a ocurrir durante un corto periodo de tiempo pero de un flujo muy elevado.

Así pues, cualquier emisión no deseada de dicho gas significaría no solo una pérdida económica y de eficiencia dentro del proyecto de CAC, sino también un incidente potencialmente perjudicial para el medio ambiente. Por lo tanto, los sensores y demás herramientas de monitorización y control juegan un papel de vital importancia para la prevención o detección de posibles fugas.





Las diferentes técnicas de monitorización del CO<sub>2</sub> se pueden clasificar en tres grandes grupos dependiendo de la profundidad donde se realizan las mediciones.

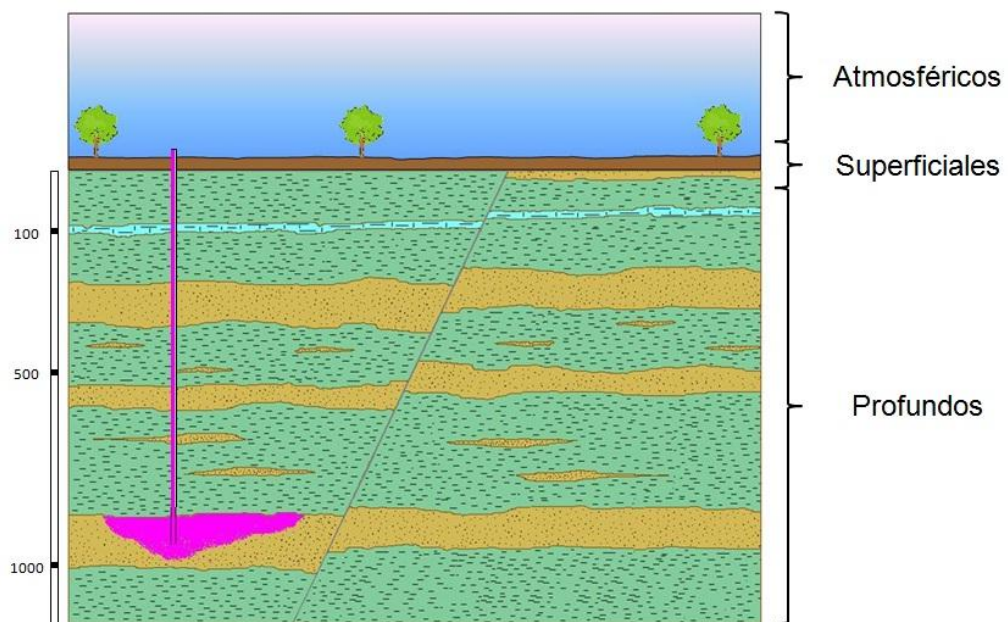


Figura 10.2. Ilustración de la clasificación por profundidad

Al margen de la profundidad, los sensores también pueden agruparse según la siguiente clasificación:

- **Primarios:** Tecnología o aplicación usada de forma efectiva en aplicaciones similares, capaz de adaptarse a los requerimientos mínimos para las tareas de monitorización.
- **Secundarios:** Tecnologías o protocolos disponibles que pueden ayudar en la caracterización de una formación, apoyar el desarrollo de simulaciones o proporcionar información para el diseño de proyectos. Aunque aún están en fase de desarrollo para adaptarse a las necesidades de detección de los proyectos de CAC.
- **Potenciales:** Tecnologías o protocolos no invasivos de aplicación en áreas extensas para evaluar la ubicación de las plumas de CO<sub>2</sub> y de sus posibles vías de fuga hacia acuíferos o la atmósfera. En el estado actual aún pueden resultar costosas y poco precisas, por lo que se deberá mejorar su aplicación en proyectos de almacenamiento de dióxido de carbono.



## 10.1. Clasificación general de sensores para la monitorización de almacenes geológicos de CO<sub>2</sub>

A continuación se mencionan diversas tecnologías y dispositivos según las clasificaciones anunciadas previamente.

### 10.1.1. Atmosféricos

	Técnica	Descripción
Secundario	Detectores de CO <sub>2</sub>	Sensores para la detección in situ de un determinado nivel de CO <sub>2</sub> . Se suelen emplear como dispositivo de alarma.
	LIDAR	Tecnología óptica de detección remota que se usa para medir la distancia respecto a un punto mediante la emisión de un haz de luz, con longitud de onda próxima al infrarrojo, y el cálculo del tiempo transcurrido hasta su recepción.
Potencial	Covarianza de Eddy	Técnica de medición de flujos a partir de las velocidades verticales del viento y las concentraciones atmosféricas del gas analizado.
	Sistema Avanzado de Detección de Fugas	Se utiliza para medir concentraciones y geo-referenciarlas sobre un mapa de la zona estudiada. El dispositivo se sitúa en vehículos aéreos o terrestres. De gran aplicación en la detección de fugas a lo largo de conducciones.
	Trazadores	Son trazadores aquellas especies químicas que se añaden a las corrientes de CO <sub>2</sub> inyectadas, y que sirven para marcar emisiones de interés.

Tabla 10.1. Técnicas de monitorización atmosférica [MVA, 2009]

### 10.1.2. Superficiales

	Técnica	Descripción
Primario	Monitorización de aguas subterráneas	Toma de muestras de aguas subterráneas para la detección de posibles migraciones de las plumas de CO <sub>2</sub> hacia acuíferos vecinos. El pH, la conductividad específica, la alcalinidad, los isótopos estables o los gases disueltos son algunos de los indicadores que se analizan.



Secundario	Monitorización de estrés de ecosistemas	Indicadores de fugas de CO <sub>2</sub> mediante su impacto sobre la vegetación circundante. La toma de imágenes puede realizarse desde satélites o aviones. Previamente, se deberán conocer y definir las condiciones de base.
	Sísmica superficial en 2-D	Consiste en medir el tiempo transcurrido entre la emisión y la reflexión o refracción hacia detectores sísmicos. Se puede asemejar al funcionamiento de un sonar.
	Monitorización de gas	Muestreo de gases en la capa superficial del suelo y en zona no saturada.
	Cámara de acumulación	Mide los flujos de gas procedentes del suelo mediante la colocación en superficie de una campana y el análisis de los gases que ella contenga. La principal desventaja es que las mediciones se realizan sobre un área reducida.
Potencial	Trazadores	Especies químicas únicas o altamente indicativas que sirven para marcar la trayectoria en el subsuelo del flujo de CO <sub>2</sub> inyectado.
	Polarización inducida	Tecnología de imagen geofísica para la distinción de metales y acuíferos conductores de los minerales arcillosos. Para las mediciones se usan electrodos por los que se emiten y reciben corrientes eléctricas.
	“ <i>Spontaneous (Self) Potential</i> ”	Medición de las diferencias de potencial naturales ocasionados por las reacciones electroquímicas del subsuelo.
	Medidor de inclinación	Mide la inclinación mediante la detección de pequeños cambios en la elevación del terreno.
	“ <i>CIR Transparency Films</i> ”	Consiste en el uso de 3 películas en satélites o vehículos aéreos que reproducen el grado de salud vegetal en un rango de colores.
	INSAR	Las ondas emitidas por el radar sirven para detectar deformaciones en la superficie terrestre. Basado en la tecnología usada en satélites.
	Imagen térmica hiperespectral	El dispositivo recopila y procesa información, en forma de imágenes, de todo el espectro electromagnético. Su función es el estudio de la vegetación en las zonas de inyección. El sensor puede colocarse tanto en vehículos aéreos o satélites como en mano.

Tabla 10.2. Técnicas de monitorización en superficie [MVA, 2009]



### 10.1.3. Profundos

	Técnica	Descripción
Primario	Registro de pozos de inyección	Consiste en introducir el instrumento de medida en el interior del pozo y tomar muestras a lo largo del mismo.
	"Cement Bond Log"	Se utiliza para determinar la integridad del cemento del revestimiento del pozo, y se realiza mediante la emisión de ondas en distintas frecuencias y se mide la atenuación sonora y el tiempo de transmisión.
	Registro de Densidad	Es el estudio de la densidad volumétrica en función de la profundidad, analizando tanto la matriz de roca como el fluido presente en los poros.
	Registro de rayos gamma	Consiste en analizar la radiación gamma natural de los distintos tipos de rocas presentes en la formación y así conocer la composición de la misma.
	"Sonic (Acoustic) Radar"	Se calcula el tiempo que tarda en transmitirse una onda, en función de la distancia, a través de una muestra de la formación.
	"Annulus pressure monitoring"	Test de integridad mecánica realizado en las partes interiores del pozo para la detección de posibles fugas.
Secundario	Perfil sísmico vertical	Estudio realizado en las proximidades de un pozo para conocer las estructuras geológicas de la formación, así como la anisotropía sísmica.
	"Multi-component 3-D surface seismic time-lapse survey"	Sondeos sísmicos periódicos realizados en superficie que analizan toda la zona del almacén de CO <sub>2</sub> . Mediante la reflexión de las ondas emitidas en superficie se consigue elaborar una visión tridimensional.
	Medición sísmica en 2-D	La sísmica de reflexión permite obtener imágenes de cambios en la geología del subsuelo mediante la inducción de ondas acústicas en superficie y la escucha de los ecos producidos.
	Geoquímica de aguas	Análisis de la evolución geoquímica de las aguas subterráneas presentes en la formación almacén. Las muestras se toman en pozos de la zona.
	Captura de pulsos de neutrones	Herramienta capaz de ilustrar la saturación, litología y porosidad de una formación mediante la aplicación de pulsos de neutrones.
	"Optical logging"	Mediante la introducción en un pozo de un dispositivo equipado con herramientas de imágenes ópticas, se obtienen imágenes digitales del revestimiento del pozo.



Potencial	“ <i>Crosswell seismic survey</i> ”	Mediciones sísmicas realizadas entre dos pozos, en uno de ellos se sitúa el transmisor y en el otro el receptor, que proporcionan información para la caracterización de la zona estudiada.
	Medición de microsismicidad	Proporciona información en tiempo real sobre los procesos hidráulicos y geomecánicos que tienen lugar en la formación almacén.
	Tomografía de inducción electromagnética	Utiliza las diferencias en la forma en que los campos electromagnéticos son inducidos dentro de diversos materiales, para ilustrar las variaciones en la conductividad eléctrica.
	Sondeo magnetotelúrico	Se miden los cambios en el campo electromagnético originados por las variaciones en las propiedades eléctricas de los fluidos presentes en la formación.
	Tomografía de resistencia eléctrica	Consiste en el uso de matrices verticales de electrodos en dos o más pozos para el control del CO <sub>2</sub> como resultado de los cambios en la capa de resistividad.
	“ <i>Time-lapse Gravity</i> ”	Estudio de los cambios en las densidades de los fluidos resultantes de la inyección de CO <sub>2</sub> , mediante el análisis de los campos gravitacionales.
	Resistividad electromagnética	Se mide la conductividad eléctrica en el subsuelo, tanto en las aguas subterráneas como en las capas de roca.
	“ <i>Resistivity Log</i> ”	Registros de la resistividad de la formación que ayuda en la caracterización de los fluidos y las rocas o sedimentos presentes en los espacios perforados en los pozos.

Tabla 10.3. Técnicas de monitorización en profundidad [MVA, 2009]

Además de monitorizar de forma directa el comportamiento del CO<sub>2</sub>, tanto su inyección como su migración dentro de la formación o su emisión a la atmósfera, también se pueden estudiar otros gases, como los VOC (Volatil Organic Compound), y relacionar su desplazamiento con el del CO<sub>2</sub>.

Algunos de estos dispositivos pueden ser aplicados en parcelas de pequeñas dimensiones para la investigación sobre medidas de detección de fugas con inyección de CO<sub>2</sub> a escala reducida.



## 10.2. Detectores de CO<sub>2</sub>



a



b

Fig. 10.3. Detectores de CO<sub>2</sub>, a. Portátiles [SKC, 2012], b. Tubos colorimétricos [Sensidyne, 2012]

**Descripción:** Los detectores de dióxido de carbono emplean una técnica basada en un principio de detección por infrarrojos. Estos dispositivos suelen ser de pequeñas dimensiones y portátiles. Resultan de gran utilidad para garantizar la seguridad de trabajadores mediante sus indicadores de alarma frente a niveles elevados de CO<sub>2</sub>, y también se aplican en evaluaciones iniciales.

**Beneficios:** Es una tecnología sencilla y de fácil acceso. Según el tipo de dispositivo es posible realizar mediciones de distintos gases de forma simultánea.

**Desafíos:** Estos dispositivos únicamente permiten una detección cualitativa de los gases, y tampoco es posible obtener información cuantitativa sobre las fugas.

A continuación se presentan varios modelos de dos tipos diferentes, los detectores portátiles monogas o multigas, y los tubos colorimétricos.

Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
Dräger	Dräger Pac 7000 CO <sub>2</sub>  Dimensiones: 84 x 64 x 25 mm	<u>Rango de medida:</u> 0 – 5 Vol.-% <u>Precisión:</u> 0,1 Vol.-% <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -30 a 50 <u>Presión de trabajo (hPa):</u> de 700 a 1300	632€

Tabla 10.4. Detector mono-gas [Dräger, 2012]






Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
BW Technologies	GasAlertMicro 5 IR  Dimensiones: 14.5 x 7.4 x 3.8 cm	<u>Rango de medida:</u> 0 – 50.000 ppm <u>Precisión:</u> 150 ppm <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 50 <u>Presión de trabajo (hPa):</u> de 950 a 1100	Dispositivo con registro de datos y baterías recargables \$ 1.455 Dispositivo con bomba, registro de datos y baterías recargables \$ 1.580
RAE	MultiRAE Lite Pumped model  Dimensiones: 19,3 x 9,6 x 6,6 cm MultiRAE Lite Diffusion model  Dimensiones: 17,5 x 9,6 x 5,6 cm	<u>Rango de medida:</u> 0 – 50.000 ppm <u>Precisión:</u> 100 ppm <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 50 <u>Presión de trabajo (hPa):</u> de 950 a 1100	Pumped model inalámbrico \$ 2.493 Pumped model con cable \$ 2.294 Diffusion model inalámbrico \$ 2.393 Diffusion model con cable \$ 2.194

Tabla 10.5. Detectores multi-gas [BW Technologies, RAE Systems, Premier Safety & Service, SKC, 2012]



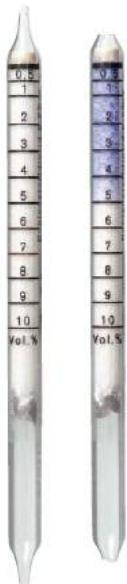

Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
Dräger	Tubo de Dióxido de carbono 0,5%/a 	<u>Rango de medida:</u> 0,5 a 10 Vol.-% <u>Duración de la medida:</u> 30 seg. <u>Cambio de color:</u> De blanco ligeramente violeta a violeta azulado <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de 0 a 40 <u>Humedad máxima:</u> 50 mg H <sub>2</sub> O/L	47€ (Caja de 10)
	Tubo de Dióxido de carbono 5%/A 	<u>Rango de medida:</u> 5 a 60 Vol.-% <u>Duración de la medida:</u> 2 min. <u>Cambio de color:</u> De blanco a violeta azulado <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de 0 a 40 <u>Humedad máxima:</u> 50 mg H <sub>2</sub> O/L	78€ (Caja de 10)

Tabla 10.6. Tubos colorimétricos Dräger [Dräger, 2012]





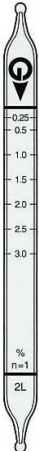
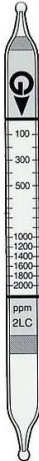
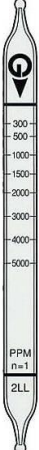
Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
Gastec	2L 	<u>Rango de medida:</u> 0,13 a 6 Vol.-% <u>Duración de la medida:</u> 2 min. <u>Cambio de color:</u> De blanco a morado	\$ 68,5 (Caja de 10)
	2LC 	<u>Rango de medida:</u> 100 a 4000 ppm <u>Duración de la medida:</u> 2 min. <u>Cambio de color:</u> De rojo a amarillo	\$ 70 (Caja de 10)
	2LL 	<u>Rango de medida:</u> 300 a 5000 ppm <u>Duración de la medida:</u> 2 min. <u>Cambio de color:</u> De azul a morado	\$ 69,5 (Caja de 10)

Tabla 10.7. Tubos colorimétricos Gastec [Gastec, 2012], [SKC, 2012]




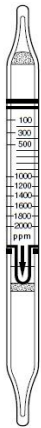
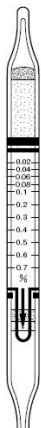
Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
Sensidyne	126SB 	<u>Rango de medida:</u> 0,05 a 1 Vol.-% <u>Duración de la medida:</u> 5 min. <u>Cambio de color:</u> De azul morado a rosa pálido <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de 0 a 40	\$ 72,86 (Caja de 10)
	126SF 	<u>Rango de medida:</u> 100 a 4000 ppm <u>Duración de la medida:</u> 2 min. <u>Cambio de color:</u> De rosa a amarillo <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de 0 a 40	\$ 72,86 (Caja de 10)
	126SG 	<u>Rango de medida:</u> 0,02 a 1,4 Vol.-% <u>Duración de la medida:</u> 1,5 min. <u>Cambio de color:</u> De rosa a amarillo <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de 0 a 40	\$ 72,86 (Caja de 10)

Tabla 10.8. Tubos colorimétricos Sensidyne [Sensidyne, 2012]




Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
	10-104-30	<u>Rango de medida:</u> 150 a 10.000 ppm	\$ 34 (Caja de 10)
	10-104-40	<u>Rango de medida:</u> 0,025 a 2 Vol.-%	\$ 34 (Caja de 10)
	10-104-45	<u>Rango de medida:</u> 0,12 a 6 Vol.-%	\$ 34 (Caja de 10)

Tabla 10.9. Tubos colorimétricos RAE Systems [RAE Systems, 2012], [Equipco, 2012]

Una vez los tubos están en contacto con el gas en cuestión, será necesaria una bomba de aspiración para forzar al gas a pasar a través del tubo y así lograr la medida. Aunque algunos distribuidores no consideren relevante el uso de la misma marca entre bomba y tubo, los fabricantes recomiendan lo contrario.

Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
Dräger	Bomba Accuro  Dimensiones: 85 x 170 x 45 mm	<u>Volumen de aspiración:</u> 100 ml +/- 5%	362 €
Gastec	GV-110 	<u>Volumen de aspiración:</u> 100 ml	\$ 495
Sensidyne	AP-20S 		\$ 434,5
RAE	LP-1200 	<u>Volumen de aspiración:</u> 100 ml	\$ 180

Tabla 10.10. Bombas de aspiración para tubos colorimétricos [Dräger, Gastec, SKC, Sensidyne, RAE Systems, Equipco, 2012]



### 10.3. Cámara de acumulación



Fig. 10.4. Diferentes modelos de Cámara de acumulación (LI-COR)

**Descripción:** El dispositivo dispone de una cámara, con la parte inferior abierta (escala de  $\text{cm}^2$ ), que se sitúa o bien directamente sobre el suelo, o bien en un collar instalado sobre la superficie del terreno. El aire contenido en la cámara se hace circular por un IRGA (InfraRed Gas Analyzer), y el ratio de cambio en las concentraciones de  $\text{CO}_2$  dentro de la cámara se utiliza para derivar el flujo de dióxido de carbono a través de la superficie del terreno hacia el punto de medida.

**Beneficios:** Esta tecnología puede determinar de una forma rápida y efectiva los flujos de  $\text{CO}_2$  procedentes del suelo en un punto concreto. Permite la recopilación de muestras de gases de gran calidad, a partir de las cuales se pueden detectar trazadores naturales, como isótopos o gases nobles, o trazadores incorporados previamente a un flujo de gas inyectado con anterioridad.

**Desafíos:** Monitorizar una zona extensa requiere muchas instalaciones. El flujo de gas procedente del suelo tiene fuertes variaciones estacionales y temporales, que deben ser controladas. Las medidas del flujo no son efectivas si el nivel freático está muy alto, o si el terreno está mojado o congelado.

Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
LI-COR	LI-8100A  Dimensiones: 29 x 38,1 x 16,5 cm	<u>Rango de medida:</u> 0 a 20000 ppm <u>Precisión:</u> 1,5% <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 45	19.530€







	<p>8100-102</p>  <p>Dimensiones: 15,2 x 15,2 x 25,4 cm</p>	<p><u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 45</p>	<p>4.390€</p>
	<p>8100-103</p>  <p>Dimensiones: 28,7 x 28,7 x 29,2 cm</p>	<p><u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 45</p>	<p>4.830€</p>
	<p>8100-104</p>  <p>Dimensiones: 48,3 x 38,1 x 33 cm</p>	<p><u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 45</p>	<p>5.980€</p>
	<p>8100-104C</p>  <p>Dimensiones: 48,3 x 38,1 x 33 cm</p>	<p><u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 45</p>	<p>6.220€</p>

Tabla 10.11. Cámara de acumulación y analizador de gas LICOR [LICOR, 2012]



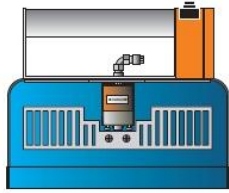
Empresa	Modelo	Características técnicas	Presupuesto
West Systems	WS-LI810 CO <sub>2</sub> Tipo A 	<u>Rango de medida:</u> 0 a 1 moles/m <sup>2</sup> /día <u>Precisión:</u> 2% <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 40 <u>Presión de trabajo (hPa):</u> de 493 a 1033	3.600€
	WS-LI810 CO <sub>2</sub> Tipo B 	<u>Rango de medida:</u> 1 a 600 moles/m <sup>2</sup> /día <u>Precisión:</u> 2% <u>Temperatura de trabajo (°C):</u> de -20 a 40 <u>Presión de trabajo (hPa):</u> de 493 a 1033	3.600€
	WS-Drager CO <sub>2</sub> 	<u>Rango de medida:</u> 0,5 a 1500 moles/m <sup>2</sup> /día <u>Precisión:</u> 3%	1.900€

Tabla 10.11. Cámara de acumulación West Systems [West Systems, 2012]



# 11. Dimensionamiento de la inyección de una planta piloto de monitorización en superficie

## 11.1. Descripción de la planta piloto

### 11.1.1. Dimensiones y materiales

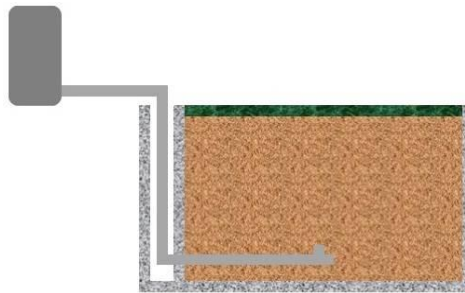


Fig. 11.1. Ilustración de la sección de la parcela

Las dimensiones de la parcela son 4 x 4 x 2,5 m. Son unas dimensiones que se han creído oportunas para mantener el dióxido de carbono inyectado de forma controlada y a su vez significativa para el ensayo de sensores. Se ha previsto la utilización de suelo procedente de otras zonas de España, confinado mediante paredes de hormigón (Figura 11.1). De este modo se aísla la zona de ensayo y se evitan posibles fugas laterales del CO<sub>2</sub> inyectado.

### 11.1.2. Necesidades para las tareas experimentales

El objetivo de la inyección en dichas parcelas es el ensayo de diversas técnicas de detección de CO<sub>2</sub>. Por tanto el flujo de CO<sub>2</sub> a inyectar deberá ser suficientemente elevado como para no almacenarse en el suelo de la parcela, aunque sin exceder los límites de detección de los distintos sensores que formaran parte del ensayo de monitorización. Por otro lado, los niveles de CO<sub>2</sub> emitidos no deberán superar valores que constituyan un riesgo para la vegetación o la salud humana y animal

Según estudios previos y empresas consultadas, se estima una tasa de inyección adecuada de 50l/h para el inicio de las tareas de inyección y el ensayo de varios sensores de CO<sub>2</sub>. De forma posterior, se podría incrementar el caudal previsto con el objetivo de observar cambios significativos en la vegetación del entorno.



Para el diseño de la disposición de los inyectores es importante tener en cuenta que el flujo inyectado de CO<sub>2</sub> debe ser lo más homogéneo posible en superficie, de este modo se minimizan los errores en la representatividad de las lecturas de los sensores. Además, se deberá contemplar la migración lateral del gas en el interior de la parcela así como las fugas localizadas en las paredes que delimitan la parcela.

## 11.2. Equipo necesario para la inyección

Dado el reducido caudal a inyectar en la parcela, los dispositivos que más se ajustan son las válvulas. En la siguiente tabla se indica la compatibilidad del CO<sub>2</sub> en estado gaseoso con distintos materiales, siendo este un aspecto destacado a la hora de diseñar la instalación de inyección.

	Material	Compatibilidad
Metales	Aluminio	Satisfactoria
	Latón	Satisfactoria
	Cobre	Satisfactoria
	Aceros Ferríticos	Satisfactoria, pero con riesgo de corrosión.
	Aceros Inoxidables	Satisfactoria
Polímeros Plásticos	Politetrafluoroetileno (PTFE)	Satisfactoria
	Policlorotrifluoroetileno (PCTFE)	Satisfactoria
	Polifloruro de Vinilideno (PVDF)	Satisfactoria
	Poliamida (PA)	Satisfactoria
	Polipropileno (PP)	Satisfactoria
Polímeros Elastómeros	Goma de butilo (IIR)	No recomendado, hinchazón significativa.
	Goma de nitrilo (NBR)	No recomendado, hinchazón y pérdida de masa.
	Cloropreno (CR)	No recomendado, hinchazón y pérdida de masa.
	Clorofluorocarbonos (KFM)	No recomendado, hinchazón y pérdida de masa.
	Silicona (Q)	Aceptable pero con una elevada permeabilidad.
	Etileno – Propileno (EPDM)	Aceptable pero hinchazón y pérdida de masa.
Lubricantes	Lubricante basado en hidrocarburos	Satisfactoria
	Lubricante basado en fluorocarbonos	Satisfactoria

Tabla 11.1. Compatibilidad del CO<sub>2</sub> con distintos materiales [Air Liquide, 2012]





A continuación se muestra un esquema del sistema de inyección propuesto, realizado con el programa FluidSim de Festo, y se detallan los componentes que lo integran.

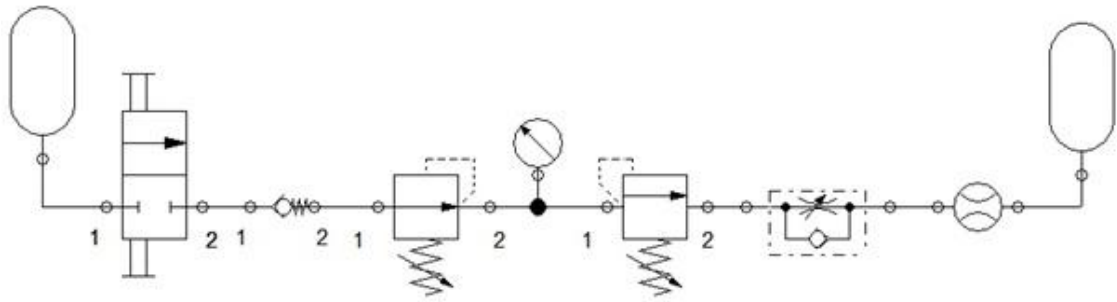


Fig. 11.2. Esquema neumático de inyección [Festo,2012]

Componente	Símbolo
Depósito	
Válvula de corte	
Válvula de retención	
Regulador de presión	
Manómetro	
Válvula de seguridad	
Caudalímetro	
Regulador de caudal unidireccional	

Tabla 11.2. Símbolos de los componentes según DIN ISO 1219 [Festo, 2012]



Válvula de corte: Tipo de válvula distribuidora de dos orificios y dos posiciones, abierto o cerrado. Su función consiste en interrumpir o activar totalmente el flujo de gas a una instalación. Estas válvulas están gobernadas por una gran variedad de mandos (manual general, por palanca, electromagnético, neumático, por presión, etc) para ajustarse a las necesidades del sistema.

Válvula de retención o antiretorno: Son válvulas unidireccionales, pues permiten el paso del fluido en un único sentido, bloqueando el flujo en sentido contrario. Su función, por tanto, es evitar el retroceso del fluido en el interior de un circuito hidráulico. El estado normal de la válvula es cerrado mediante un obturador conectado con un pequeño muelle, y esta se abre cuando el fluido vence la fuerza ejercida por el resorte.

Regulador de presión: Es un dispositivo empleado para reducir la presión de entrada y regular uniformemente la presión de salida al valor deseado. Normalmente, son válvulas de dos vías y permanecen abiertas gracias a la acción de un muelle. Se pueden distinguir dos tipos: las de acción directa y las pilotadas. En este último caso, la regulación resulta más ajustable.

Manómetro: Es un instrumento de medida de la presión relativa del fluido respecto a la presión de la atmosfera local. Para obtener la presión absoluta del gas será necesario sumar la presión manométrica y la presión atmosférica local, valor que se podrá obtener de un barómetro.

Válvula de seguridad: Son las válvulas limitadoras de presión, cuya finalidad es contribuir a la seguridad de la instalación impidiendo que se supere la presión máxima permitida por el sistema. Su funcionamiento consiste en permitir la salida del gas del circuito hacia la atmosfera hasta que se restablece la presión al valor nominal.

Caudalímetro: Instrumento para la medición del caudal o gasto volumétrico. Pueden ser de tipo mecánico, electrónico, magnético, de desplazamiento positivo, ultrasónico, o realizar la medida a partir de la diferencia de presión originada por el estrangulamiento de la sección del conducto.

Válvula de regulación de caudal: Regulan el caudal del fluido mediante la variación de la sección de la conducción. Se pueden clasificar en dos tipos según si la regulación es fija o variable. En caso de regulación variable se pueden clasificar a su vez según si la regulación es compensada o no (válvula de aguja y válvula de diafragma).



### 11.3. Descripción de la inyección

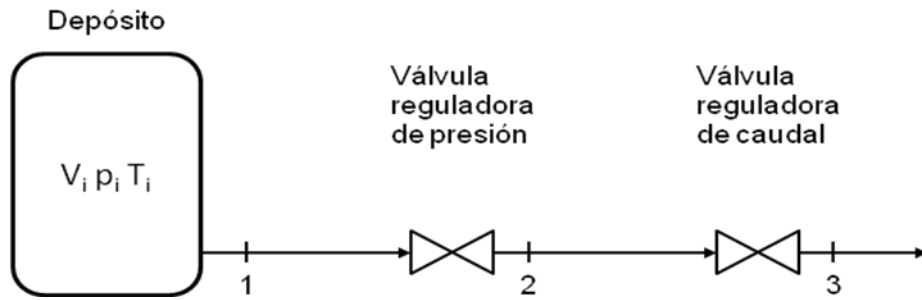


Fig. 11.3. Esquema de inyección

El proceso de inyección del CO<sub>2</sub> se ha planteado como un problema termodinámico que consiste en el vaciado de un depósito que contiene un gas ideal, pasando por una válvula de regulación de presión y una de regulación de caudal, para lograr una inyección de 50l/h constante en el interior de una parcela de tierra (Figura 11.3).

Se considerará el depósito como un volumen de control y se tendrá en cuenta que en depósitos de tamaño de hasta 100L en formato bombona, el dióxido de carbono acostumbra a permanecer en estado gas.

Suponiendo que el CO<sub>2</sub> se comporta como un gas ideal y que el flujo es estacionario, se plantean los balances de masa y energía del depósito:

$$\text{b.m.} \quad \frac{dm}{dt} = \dot{m}_s - \dot{m}_s = -\dot{m}_s \quad (\text{Ec 11.1})$$

$$\text{b.e.} \quad -\frac{dm}{dt} \cdot h_s = \dot{Q} + \dot{W}_{eix} - \frac{dU_{vc}}{dt} \quad (\text{Ec 11.2})$$

A partir de unas condiciones iniciales:

$V_i$  Volumen total del depósito

$p_i$  Presión inicial del gas con el depósito sellado

$T_i$  Temperatura inicial del gas con el depósito sellado



Y conociendo alguna de las variables a la salida del depósito, estado 1, se pueden determinar el resto de variables aplicado los balances de masa y energía.

En la válvula de regulación de presión, como su nombre indica, la variable de control será la presión. Así pues,  $p_2$  será un valor conocido por el usuario. Aplicando los balances de masa y energía se pueden determinar el resto de variables.

En la válvula de regulación de caudal, el único valor fijado es el caudal de salida:

$$v_3 = 50 \frac{l}{h}$$

donde:

$v_3$  Caudal de inyección en la parcela de tierra

Y puesto que se trata de una válvula de estrangulamiento, la presión de entrada será superior a la presión de salida:

$$p_3 < p_2$$

Aplicando el balance de energía y considerando un régimen permanente, donde:

$$\Delta E_c = \Delta E_p = 0 \quad \dot{Q} = 0 \quad \dot{W}_{eiz} = 0$$

se deduce que  $h_2 = h_3$

Aplicando, nuevamente, los balances de masa y energía, se calcularían las condiciones de presión y temperatura.

A partir de los valores del estado 3 y mediante un programa de simulación de transporte geoquímico, se podría determinar la velocidad del gas a través de la tierra contenida en la parcela de ensayo, así como el flujo de  $CO_2$  en superficie.



## 12. Evaluación de Impacto Ambiental

Cada vez más resulta de vital importancia el estudio de los posibles efectos, tanto favorables como desfavorables, que una actividad o servicio pueda ocasionar sobre el medio ambiente.

El objeto de análisis de este proyecto es la Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>, y su principal propósito constituye, en sí mismo, un impacto favorable sobre el medio ambiente. El objetivo de la CAC consiste en evitar la emisión de dióxido de carbono proveniente de grandes fuentes emisoras de tipo puntual, como por ejemplo las plantas de generación de energía. La aplicación de esta tecnología en España podría suponer el ahorro de cientos de miles de toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

Por otra parte, tanto la captura, el transporte, la inyección como el almacenamiento del CO<sub>2</sub>, necesariamente, producirán impactos sobre el entorno, ya sea durante su construcción como a lo largo de su periodo de funcionamiento. En la siguiente tabla se enumeran algunos de los principales impactos.

<b>Impacto</b>	<b>Descripción</b>
Uso del suelo	Superficie (en hectáreas) ocupada por la instalación y rodeado de zonas reguladas (por ejemplo, zonas de seguridad).
Patrimonio arqueológico y cultural	La destrucción de objetos arqueológicos en el suelo durante la construcción, y cambios o afectación en el paisaje o el patrimonio cultural.
Biodiversidad	Destrucción, alteración y dispersión del hábitat durante la construcción, operación y desmantelamiento.
Recursos de materias primas y uso del agua	Uso de materiales para la reducción de las emisiones. Uso del agua de enfriamiento. Materiales de construcción.
Impacto visual	El impacto visual debido a las actividades de construcción y desmantelamiento. Impacto de la instalación teniendo en cuenta su entorno. Impacto de la instalación de inyección por encima del suelo.



Demanda de energía	<p>La capacidad total y el requerimiento de energía de los componentes, la producción bruta, la producción neta, y la eficiencia de las alternativas, en una instalación de captura.</p> <p>Consumo de energía durante la compresión.</p> <p>Demanda de energía para la inyección, el seguimiento y el abandono.</p>
Emisiones de gases	<p>CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, hidrocarburos, partículas, compuestos orgánicos volátiles y metales pesados.</p> <p>Fugas o desahogos de presión en caso de emergencias, durante el transporte.</p> <p>Fugas de CO<sub>2</sub> de la instalación (tasas de fuga), hidrocarburos (inyección en los campos de petróleo o de gas).</p>
Gestión de residuos	<p>Manejo de los residuos producidos durante la construcción.</p> <p>Manejo de residuos sólidos.</p> <p>Calidad y cantidad de los flujos de residuos en una planta de captura.</p>
Impacto acústico	<p>Trastorno durante la construcción.</p> <p>Ruido que rodea las estaciones de captura, compresión e inyección.</p>
Trastornos en el terreno	<p>Trastorno durante la construcción y la fase de desmantelamiento.</p> <p>Inclinación o hundimiento.</p> <p>Sismicidad (similitudes con el almacenamiento de gas natural).</p>
Contaminación del suelo	<p>Lixiviación de sustancias procedentes de los residuos o del almacenamiento de combustible.</p> <p>En caso de fugas de CO<sub>2</sub> en el suelo durante el transporte.</p> <p>Movilización de metales pesados dentro de la formación almacén.</p>
Perturbación o contaminación de agua subterránea y superficial	<p>Descarga del agua de refrigeración.</p> <p>Alteración del flujo y el nivel de las aguas subterráneas durante la construcción y operación.</p> <p>La extracción de agua subterránea durante la construcción.</p> <p>Contaminación de las aguas subterráneas durante la construcción.</p> <p>Riesgo de contaminación del agua subterránea a través de fugas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento del pH.</li> <li>-Aumento de los metales pesados.</li> </ul>

Tabla 12.1. Impactos Ambientales [Koorneef [et. al], 2006]

Además, una vez el CO<sub>2</sub> se encuentra almacenado en la formación almacén, tal como se ha visto en el capítulo 10 del presente proyecto, cabe la posibilidad de que se produzcan fugas



hacia la superficie. Aunque el CO<sub>2</sub> en pequeñas concentraciones no es directamente peligroso para la salud humana, sí puede alterar procesos medioambientales. En altas concentraciones, en cambio, podría provocar asfixia.

Por otra parte, una migración vertical de CO<sub>2</sub> desde la formación almacén a un acuífero poco profundo puede provocar su disolución. El CO<sub>2</sub> disuelto se hidroliza para formar ácido carbónico, el cual modifica el pH. Dado que el pH es una variable destacada en las reacciones químicas y biológicas en medio acuoso, una modificación en el pH puede originar cambios no deseados en la geoquímica, la calidad del agua y la salud de los ecosistemas. Algunos ejemplos son la movilización de metales tóxicos, la lixiviación de nutrientes biológicos importantes o la modificación de los gradientes de protones a través de las membranas biológicas.

Otro posible impacto medioambiental relacionado con la inyección de CO<sub>2</sub> es el desplazamiento de la salmuera hacia acuíferos situados en capas más superficiales, con el riesgo de contaminar suministros de agua potable. Por tanto, serán necesarios diferentes métodos para conducir esta salmuera hacia zonas donde el impacto sea mínimo.

También se debería tener muy presente el impacto social, puesto que se podría esperar que la aplicación de la CAC generase cierta controversia entre la opinión pública.

Otro de los objetivos del presente proyecto es el de plantear el ensayo de varios sensores para la monitorización del CO<sub>2</sub> en una parcela de tierra. Analizando los posibles impactos sobre el medio ambiente resultantes de las operaciones de inyección del gas, cabe destacar la contaminación atmosférica y de suelos o agua derivada de:

- Fugas de gas procedentes de los depósitos de dióxido de carbono destinados a abastecer el sistema de inyección de gas en las parcelas.
- Emisiones localizadas en algún punto de la instalación de inyección debidas a malas conexiones entre los diferentes componentes, o a posibles desperfectos en los mismos.
- A causa de un aislamiento deficiente de las parcelas de ensayo, existencia de migraciones laterales del CO<sub>2</sub> hacia el exterior de la parcela confinada. Ello podría comportar fugas incontroladas del gas hacia la atmosfera o afectación de suelo y vegetación colindante.
- Accidentes derivados de una manipulación incorrecta por parte del personal responsable de la instalación.



Además, se deberán tener en cuenta el impacto producido sobre el terreno y vegetación de la zona donde se realice la construcción de la parcela debido a las tareas de excavación y al consumo de combustible de la maquinaria utilizada.





## 13. Presupuesto

### 13.1. Elaboración del proyecto

Puesto que el proyecto es de carácter teórico, en el presupuesto de elaboración solo se contempla el material necesario, el consumo energético derivado y los costes tanto de personal como de desplazamientos. El periodo de elaboración se ha fijado en 1800h, correspondientes a un año y medio. Para el cálculo del coste de personal, este se ha valorado en 25€/h.

500 Hojas de papel	5,00€
4 cartuchos de tinta	60,00€
Consumo energético	200,00€
Desplazamientos	50,00€
Coste de personal	45.000,00€
<b>TOTAL</b>	<b>45.315,00€</b>

Tabla 13.1. Presupuesto de elaboración del proyecto

### 13.2. Ejecución del proyecto

El presupuesto de ejecución cuantifica los costes derivados de la construcción de la planta piloto presentada en el capítulo 11 y el ensayo de varios sensores estudiados en el capítulo 10.

El presupuesto corresponde al ensayo por un periodo de 2 horas diarias durante 5 días. En el supuesto de realizar más campañas, no se deberían incluir ni el coste de construcción de la parcela ni el de algunos sensores, puesto que son independientes del número de ensayos realizados.



Construcción de la parcela y acondicionamiento para la inyección	6.000,00€
Equipo de inyección de 10 botellas de 50L	3.240,00€
Conjunto de sensores de CO <sub>2</sub>	25.401,00€
Coste de personal	250,00€
<b>TOTAL</b>	<b>34.891,00€</b>

Tabla 13.2. Presupuesto de ejecución del proyecto

En el coste de construcción de la parcela y acondicionamiento para la inyección se han contemplado la excavación del terreno, la instalación de las paredes confinantes, el acondicionamiento para el posterior montaje del equipo de inyección y el llenado con tierra y vegetación.

Por otra parte, una vez consultadas numerosas marcas y distribuidoras, el coste de un equipo de inyección corresponde a:

Botella de 50L	111,51€
Día de alquiler	0,67€
Impuestos	0,97€
Servicio de distribución	14,16€
Equipo de válvulas de regulación a 0-6 bar	196,69€
<b>TOTAL</b>	<b>324,00€</b>

Tabla 13.3. Presupuesto del equipo de inyección [Abelló Linde, 2012]

La empresa consultada también ofrece la posibilidad de suministrar un grupo de 10 botellas de 50L, opción que resulta conveniente dado el volumen de las botellas y la tasa de inyección prevista. Por tanto, el coste del equipo de inyección corresponde a 3.240,00€



Respecto al conjunto de sensores, después de analizar los diversos modelos presentados en el capítulo 10, la opción seleccionada es la siguiente:

Detector de CO <sub>2</sub> Dräger Pac 7000 CO <sub>2</sub>	632,00€
Tubos colorimétricos de CO <sub>2</sub> 0,5%/a	47,00€
Bomba de aspiración Accuro	362,00€
Cámara de Acumulación LICOR 8100-103	4.830,00€
Analizador de CO <sub>2</sub> LICOR LI-8100A	19.530,00€
<b>TOTAL</b>	<b>25.401,00€</b>

Tabla 13.4. Presupuesto del conjunto de sensores [Dräger, 2012], [LICOR, 2012]

Puesto que el objetivo principal de la aplicación de estos sensores en una parcela de ensayo es la de monitorizar únicamente el CO<sub>2</sub>, el detector portátil de Dräger es el que se ajusta más. En el caso de los tubos colorimétricos, se han considerado como los de mejor relación calidad precio, además de poseer una mayor presencia en territorio español.

Se ha seleccionado una cámara de acumulación de LICOR por su amplia gama de modelos capaces de ajustarse a las diferentes necesidades del usuario.

### 13.3. Coste total del proyecto

Por tanto, el coste total resultante de la elaboración y ejecución de este proyecto asciende a 80.206,00€.

Coste de elaboración	45.315,00€
Coste de ejecución	34.891,00€
<b>TOTAL</b>	<b>80.206,00€</b>

Tabla 13.3. Coste total del proyecto





## Conclusiones

Aunque la situación ambiental actual es delicada, sí es cierto que se dispone de numerosas herramientas para evitar su deterioro. Para su aplicación, no obstante, deberían priorizarse los intereses ambientales frente a los económicos, políticos o comerciales.

La aplicación de la Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>, aún estando en fase de desarrollo, puede suponer una valiosa contribución a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos en varios países alrededor del mundo son altamente esperanzadores, pues se ha logrado inyectar elevadas cantidades de CO<sub>2</sub> durante varios años sin observar fugas del gas.

Tal como se ha visto en el Capítulo 7, España cumple los criterios principales para la implantación de esta tecnología puesto que dispone del tipo de formaciones permeables profundas seleccionado en el Capítulo 6, que además se encuentran en las proximidades de grandes puntos de emisión.

Puesto que, numerosas instalaciones de generación de energía están sujetas al régimen de comercio de derechos de emisión, y algunas de ellas, según la directiva europea 2009/31/CE, están obligadas a reservar espacio en sus instalaciones para la construcción de una planta de captura y compresión de CO<sub>2</sub>, podría resultar beneficiosa la implantación de la CAC en sus instalaciones.

En cuanto al marco legal, ya se dispone de diversas leyes actualizadas que regulan la Captura, el Transporte y el Almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Pero también se debe poner de manifiesto que otras se encuentran desfasadas respecto a la situación actual.

Tal como se ha visto en el Capítulo 9 de este proyecto, es necesario disponer de una gran variedad de técnicas de monitorización, desde el inicio de la caracterización de la formación almacén, hasta el seguimiento del CO<sub>2</sub> almacenado en la fase de post-clausura. Actualmente, ya se dispone de sensores adaptados a las necesidades de la CAC, y algunos otros podrían ser de utilidad con ligeras modificaciones.

Por todo lo expuesto, este proyecto considera viable la aplicación de la Captura y Almacenamiento del CO<sub>2</sub> en España.

En lo referente al ensayo de inyección, si se implanta la instalación descrita en el Capítulo 11, se puede optar por el uso de electroválvulas y accionamientos eléctricos si se desea una mayor precisión y un control remoto de la inyección.





## Agradecimientos

A Ricard Bosch por su ayuda, orientación y consejo.

A Fidel Grandía y Jordi Bruno por darme la oportunidad de trabajar con ellos, así como toda su ayuda y consejo.

A mis amigas y amigos por escucharme y apoyarme en los momentos difíciles.

A mi familia y a David por su inconmensurable ayuda, apoyo, paciencia y por animarme a seguir siempre adelante.

Muchas gracias.







## Bibliografía

- Abelló Linde. *Gases Industriales*. España. 2012.  
  
[[http://www.abellolinde.es/international/web/lg/es/like35lges.nsf/docbyalias/nav\\_producto\\_gasind](http://www.abellolinde.es/international/web/lg/es/like35lges.nsf/docbyalias/nav_producto_gasind), 13/04/2012]
- Anthony Veder. CO<sub>2</sub> Shipping. *CO<sub>2</sub> TRANSPORT BY SHIP*.  
  
[<http://www.co2-shipping.com/co2-transport-by-ship>, 3/11/2011]
- ARENILLAS, A., CAMPOS, R., HURTADO, A., LOMBA, L., DE LA LOSA, A., MARTÍNEZ, R., ORTIZ, G., PELAYO, M., PÉREZ DEL VILLAR, L., PRADO, P., RECREO, F., RUIZ, C., SASTRE, J., SUÁREZ, I., ZAPATERO, M. A. *Almacenamiento Geológico de CO<sub>2</sub>. Criterios de Selección de Emplazamientos*. Informes Técnicos Ciemat, Editorial CIEMAT, 2007. 1-100.
- ASCO Carbon Dioxide Ltd. *TANQUES DE CO<sub>2</sub> Y CRIOGÉNICOS*. [<http://www.ascoco2.com/es/productos/tanques-de-co2-y-criogenicos/>. 19/10/2010].
- Atlas Nacional de España. 2012.  
  
[<http://www2.ign.es/ane/ane1986-2008/>, 21/03/2012]
- BACHU, S. *Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change*. *Energy Conversion and Management*. Vol. 41(9), 2000, p. 953-970.
- BAINES, S., WORDEN R. *Geological storage of carbon dioxide*. *Geological Society, London, Special Publications*. Vol. 233, 2004, p. 1-6.
- BOE 157 Ley 16/2002, de 1 de julio. *Prevención y control integrados de la contaminación*. Madrid 2002.  
  
[<http://www.boe.es/boe/dias/2002/07/02/pdfs/A2391023927.pdf>, 15/03/2012]
- BOE 255 Ley 26/2007, de 23 de octubre. *Responsabilidad Medioambiental*. Madrid, 2007.  
  
[[http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases\\_datos/doc.php?id=BOE-A-2007-18475](http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases_datos/doc.php?id=BOE-A-2007-18475), 20/03/2012]
- BOE 23 Real Decreto 1/2008 de 11 de Enero. *Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos*. Madrid, 2008.



[<http://www.boe.es/boe/dias/2008/01/26/pdfs/A04986-05000.pdf>, 27/02/2012]

- BOE 163. Ley 13/2010, de 5 de julio, por la que se modifica la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el *régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, para perfeccionar y ampliar el régimen general de comercio de derechos de emisión e incluir la aviación en el mismo*. Madrid, 2010. [<http://www.boe.es/boe/dias/2010/07/06/pdfs/BOE-A-2010-10706.pdf> 21/02/2012].
- BOE 317 Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de *Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono*. Madrid, 2010.

[<http://www.boe.es/boe/dias/2010/12/30/pdfs/BOE-A-2010-20049.pdf>, 20/12/2011].

- BRUANT, R.G., GUSWA, A.J., CELIA, M.A., PETERS, C.A., *Safe Storage of CO<sub>2</sub> in Deep Saline Aquifers. Environmental Science & Technology*. Junio 2002, 241 A – 245 A.
- BW Technologie

[<http://www.gasmonitors.com/main.cfm?cty=184&regid=4>, 25/05/2012]

- CO<sub>2</sub>CRC. About CCS. *Injection and Storage*.

[[http://www.co2crc.com.au/aboutccs/stor\\_trapping.html](http://www.co2crc.com.au/aboutccs/stor_trapping.html), 15/05/2011]

- Compostilla Project.

[<http://www.compostillaproject.es/>, 19/04/2012]

- ÇENGEL, Y.A., BOLES, M.A. *TERMODINAMICA*. México D.F. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2009. 224 – 242.
- DE GROOTE, J.P. *Tecnología de los circuitos hidráulicos*. Barcelona, Grupo Editorial Ceac, S.A., 1997. 369 – 390, 460 – 492.
- DIRECTIVA 2009/31/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO

*Almacenamiento geológico de dióxido de carbono*. Bruselas. 2009 [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:ES:PDF,10/01/2012>]

- Dräger Safety Hispania, S.A. *Detección Portátiles de Gases*. Madrid. 2012.

[[http://www.draeger.com/ES/es/products/gas\\_detection/productSelector.action?root=10032375&cat=10056820&selections\[0\]=10065990#e1338794256823](http://www.draeger.com/ES/es/products/gas_detection/productSelector.action?root=10032375&cat=10056820&selections[0]=10065990#e1338794256823), 16/04/2012]



- Energy Resource, CO<sub>2</sub> Capture Project. 2010.  
[[http://energy-resource.net/ccp/about\\_capture.html](http://energy-resource.net/ccp/about_capture.html), 18/10/2010].
- Equipco  
[<http://www.equipcoservices.com/>, 23/05/2012]
- Festo  
[[http://www.festo.com/cms/es\\_es/index.htm](http://www.festo.com/cms/es_es/index.htm), 31/05/2012]
- Gastec  
[<http://www.gastec.co.jp/english/index.php>, 21/05/2012]
- HOLLOWAY, S., (UK), KARIMJEE, A., (USA), AKAI, M., (Japan), PIPATTI, R., (Finland), and RYPDAL, K., (Norway). *Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Vol. 2, 2006, 5.1 – 5.32.
- IEA. Greenhouse Gas R&D Programme. *Putting carbon back into the ground*. Cheltenham, UK, Febrero 2001.
- IEA. International Energy Agency. Publications. *Energy Technology Perspectives 2010*. 2010.  
[<http://www.iea.org/etp/previouseditions/>, 14/09/2011 ]
- IEA. International Energy Agency. Publications. *Energy Technology Perspectives 2008*. 2008.  
[<http://www.iea.org/etp/previouseditions/>, 06/09/2011]
- IEA. International Energy Agency. Publications. *World Energy Outlook. 2009*. 2009.  
[<http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2009/27/09/2011>]
- IPCC, 2005. *Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, UK, 2005.
- IPCC. Lawrence Berkeley National Laboratory. *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage --Storage in Deep Underground Geological Formations --*. Berkeley. USA. 2006.
- IPCC, 2007: *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza, 2007.



- IPCC. PNUMA. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. *¿Puede el almacenamiento del dióxido de carbono contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero?*. Ginebra, 2006.
- KOORNNEEF, J., FAAIJ, A., TURKENBURG, W., *Environmental Impact Assessment of Carbon Capture & Storage in the Netherlands*. Department of Science, Technology and Society, Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht University, 3584 CS, Utrecht, The Netherlands. 2006.
- LAL, R., *Carbon management and sequestration center*- The Ohio State University. Columbus, 30 Agosto 2007.
- LI-COR

[<http://www.licor.com/>, 29/05/2012]

- MARTÍNEZ, R., CAMPOS, R., PÉREZ DEL VILLAR, R., SUÁREZ, I., ZAPATERO, M.A. *ANÁLOGOS INDUSTRIALES DEL ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub>*. *Ciemat*. IGME Instituto Geológico y Minero de España. 2008, 1-70.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2011.

[[http://www.marm.es/es/biodiversidad/servicios/banco-de-datos-biodiversidad/informacion-disponible/descargar\\_mapa\\_espacios\\_nat.aspx](http://www.marm.es/es/biodiversidad/servicios/banco-de-datos-biodiversidad/informacion-disponible/descargar_mapa_espacios_nat.aspx), 01/11/2011]

- MVA. U.S.DEPARTMENT OF ENERGY.NATIONAL ENERGY TECHNOLOGIC LABORATORY. *Monitoring, Verification, and Accounting of CO<sub>2</sub> Stored in Deep Geologic Formations*. Albany, (USA). The Energy Lab. Junio 2009.
- Premier Safety & Services

[<http://www.premiersafety.com/store/index.cfm>, 24/05/2012]

- Rae Systems

[<http://www.raespain.com/>, 26/05/2012]

- RUIZ RIVAS, C. *Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>: Criterios de selección de emplazamientos*. *Conama 9*. 2009, 1-32.
- Sensidyne

[<http://www.sensidyne.com/>, 29/05/2012]



- SKC

[<http://www.skcinc.com/>, 22/05/2012]

- The Political Climate. *An Energy Wild Goose Chase, Not Silver Bullet*. July 15, 2010. [<http://politicalclimate.wordpress.com/2010/07/15/ccs-an-energy-wild-goose-chase-not-silver-bullet-2/>. 20/11/2010].
- University College London, Chemical Engineering. *Professor wins Institution of Chemical Engineers medal*. 15 January 2010.

[<http://www.ucl.ac.uk/news/news-articles/1001/10011503>. 18/10/2011].

- University of Nottingham. *ASGARD*

[<http://www.nottingham.ac.uk/ncccs/documents/dave-jones.pdf>, 31/05/2012]

- West Systems

[[http://www.westsystems.com/doc/Brochure\\_Fluxmeter\\_LI820.pdf](http://www.westsystems.com/doc/Brochure_Fluxmeter_LI820.pdf), 30/05/2012]

- ZAPATERO RODRIGUEZ, M.A., SUAREZ DIAZ, I., ARENILLAS GONZALEZ, A., MARINA ROJO, M., CATALINA NITA, R., MARTINEZ ORIO, R., *Assessing European Capacity for Geological Storage and Carbon Dioxide*. IGME Instituto Geológico Minero de España. 2009. 1-162.

