



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Sostenibilidad del Almacenamiento geológico de CO₂

Autor: Fernando Recreo Jiménez

Institución: CIEMAT

E-mail: fernando.recreo@ciemat.es

Otros autores: Luis Pérez del Villar (CIEMAT), Celsa Ruiz (CIEMAT), Rocío Campos (CIEMAT), Sonsoles Eguilior (CIEMAT), Antonio Hurtado (CIEMAT), Luis Lomba (CIEMAT), Marta Pelayo (CIEMAT) y Antonio J. Prado (CIEMAT)



RESUMEN:

El concepto de 'sostenibilidad' se definió por primera vez (1987) en el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland), titulado: Nuestro Futuro Común, asociado a la idea de desarrollo sostenible. La definición de este concepto es la siguiente: 'el desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de que futuras generaciones satisfagan sus propias necesidades'. Este concepto, según ciertos autores, era y sigue siendo ambiguo. Por otra parte, la humanidad ya ha superado los límites de sostenibilidad, ya que, según algunos autores, 'la última vez que la humanidad se hallaba en niveles sostenibles fue en la década de 1980'. El almacenamiento geológico de CO₂ es una tecnología emergente que se encuadra en la necesidad de alcanzar la sostenibilidad en el uso de los recursos energéticos, partiendo de la evidencia de que, para los combustibles fósiles, el flujo entre sus fuentes y sus sumideros va a estar limitado más por el sumidero atmosférico del CO₂ que por la fuente energética, al menos para el carbón, para el que se dan más de 300 años de expectativa de vida como recurso energético. Para una fuente no renovable, se propone, como regla para ayudar a definir los límites sostenibles, que la tasa de consumo no sea superior a la tasa con la que un recurso renovable pueda sustituirla. Para un contaminante, como es el caso del CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles, la tasa de emisión sostenible no debería ser mayor que la tasa con la que este contaminante pueda ser reciclado, absorbido o neutralizado por un sumidero. Dejando la sustitución del recurso a las tecnologías energéticas renovables, y entendiendo por sumidero el almacenamiento geológico del CO₂, el reto para valorar en qué medida la tecnología de almacenamiento geológico de CO₂ es sostenible consiste en calibrar si existe o no capacidad de almacenar CO₂ a una tasa superior a la de producción, así como durante el tiempo necesario que impone la evolución de la concentración del CO₂ en la atmósfera para mantener aquella por debajo de 450 ppmv, que propone el IPCC TAR (2001).



1. INTRODUCCIÓN

El concepto de “sostenibilidad” aparece por primera vez en el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo conocido como Informe Brundtland o “Our Common Future” (Brundtland, 1987), asociado a la idea de “desarrollo sostenible”, definido éste como “*el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de que futuras generaciones satisfagan sus propias necesidades*”. Este concepto fue posteriormente modificado en la Segunda “Cumbre de la Tierra” de Río de Janeiro, 1992, en la que nace la Agenda 21, y en la que se aprueban el Convenio sobre Cambio Climático, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (Declaración de Río), y la Declaración de Principios Relativos a los Bosques.

La definición original del Informe Brundtland, centrada en la preservación del medio ambiente y en el consumo prudente de los recursos no renovables, se amplió para incluir la idea de que deben conciliarse tres “pilares” en la perspectiva del desarrollo sostenible: el progreso económico, la justicia social y la preservación del medio ambiente.

Con anterioridad, en 1972, el Club de Roma, había publicado el Informe “Los límites del crecimiento”, que revelaba que los condicionamientos ecológicos globales asociados al uso de recursos y a las emisiones supondrían la necesidad de un profundo cambio tecnológico, cultural e institucional para evitar que la huella ecológica de la humanidad superara la capacidad de carga de la Tierra, si bien la posibilidad de superar ésta se veía aún lejana en esa fecha.

Veinte años después, los mismos autores (D. Meadows *et al.* 1992), constataban en el Informe “Más allá de los límites del crecimiento” que la humanidad ya había traspasado los límites de la capacidad de carga de la Tierra, que la extralimitación era ya un hecho, concretamente en cuanto a la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, y que “la tarea esencial era reconducir el mundo hacia la sostenibilidad”.

Actualmente, más del 50% de la electricidad de la UE procede de combustibles fósiles (carbón y gas natural). A nivel mundial más del 80% del consumo de energía comercial procede de combustibles fósiles no renovables y otro 10% más, de combustibles renovables que también emiten CO₂. En los próximos 20 años, se espera que el carbón suministre una cuarta parte de las necesidades energéticas primarias mundiales, con un incremento del consumo del 60% (dos terceras partes de este incremento en países en desarrollo, especialmente China e India), lo que con las actuales tecnologías supondría un aumento del 20% en las emisiones globales en 2025. Aún más, la producción de energía total se espera que descansa en los combustibles fósiles hasta por lo menos el año 2050 [2].

Por lo tanto, si los combustibles fósiles van a jugar un importante papel en el *mix* energético, hay que proveer soluciones para limitar el impacto de su utilización y hacerla compatible con los objetivos de sostenibilidad climática [1].

El problema central es la urgencia de conciliar el cambio climático con la necesidad de asegurar el suministro energético.



Entre las tecnologías de los combustibles fósiles sostenibles y económicamente viables que pueden ayudar a conseguir importantes reducciones de carbono a un coste aceptable, el “carbón sostenible” reviste especial importancia ya que puede permitir reducciones de carbono muy acusadas al tiempo que garantiza una seguridad del suministro energético con buena relación coste-eficacia, especialmente si los precios del petróleo y gas siguen siendo elevados. Aunque la transición del carbón tradicional al carbón sostenible sin duda no estará exenta de costes, puede ser una aportación valiosísima para la lucha contra el cambio climático.

La Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones de 10 de enero de 2007, titulada «Limitar el calentamiento mundial a 2 °C - Medidas necesarias hasta 2020 y después», COM(2007) final, precisa que, en el contexto de la reducción global de las emisiones de CO₂ en un 50 % de aquí a 2050, es necesario reducir en un 30 % las emisiones en el mundo desarrollado de aquí a 2020, y entre un 60 % y el 80 % de aquí a 2050. Señala también que dicha reducción es técnicamente factible y que los beneficios compensan ampliamente los costes, si bien para alcanzar este objetivo es necesario promover todas las opciones de reducción de emisiones.

La energía es responsable de un 80% de las emisiones de gases de invernadero de la UE y constituye la causa fundamental del cambio climático y de la contaminación de la atmósfera. La UE se ha comprometido a luchar contra todo ello mediante una reducción de las emisiones de gases de invernadero en la UE y en el mundo, a un nivel que limitaría a 2° C el incremento de la temperatura, en comparación con los niveles preindustriales. Sin embargo, si se mantienen las políticas de energía y transportes vigentes en la actualidad, las emisiones de CO₂ de la UE aumentarán en un 5 % para 2030, y las emisiones a nivel mundial en un 55%. Las políticas energéticas actualmente vigentes en la UE no son sostenibles [17].

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero sólo es posible con tecnologías que permitan una drástica reducción de la huella producida por la combustión del carbón. Entre las medidas concretas que se citan en dicha Comunicación para permitir a la UE establecer un sistema energético competitivo, fiable y más sostenible, y conseguir las necesarias reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero de aquí a 2020, está la de adoptar una política de captura y almacenamiento geológico del carbono que preserve el medio ambiente.

2. SOSTENIBILIDAD Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Si bien sostenibilidad no es un término nuevo, el desarrollo sostenible ha sido el paradigma político de los años 90. Este concepto nace en los años 70 en el contexto de los recursos renovables, con una orientación netamente ecológica. A su vez, el concepto de desarrollo sostenible ha incluido la sostenibilidad ecológica que promovían los movimientos ecologistas, junto con las dimensiones social y económica.

Lo atractivo de ese concepto reside en el hecho de que ha conseguido reconciliar los intereses de las comunidades medio-ambientalistas y el desarrollo, descartando la idea de que la conservación ambiental necesariamente constriñe el desarrollo o de que el desarrollo necesariamente implica contaminación ambiental.



No obstante, no fue sino hasta 1992, en la Cumbre de la Tierra de Naciones Unidas en Río de Janeiro, cuando este término entró de forma oficial en el mapa político global, siguiendo las directrices del informe de la “World Commission on Environment and Development” de 1987, generalmente conocido como el “Brundtland Report”, como ya se ha dicho.

En la discusión acerca de cómo alcanzar la sostenibilidad, se ha reconocido el papel central que juega la energía [10], puesto que siendo ésta el motor del crecimiento económico, las dificultades de acceso a la misma por parte de millones de personas hace que sus necesidades básicas no se estén alcanzando, conculcando así el pilar social del concepto de desarrollo sostenible. Un sistema energético global sostenible requiere transitar hacia fuentes de energía libres de emisiones de gases de efecto invernadero sin por ello comprometer las necesidades energéticas de los países en vías de desarrollo [5].

Por otra parte, los efectos ambientales del uso de la energía se manifiestan a varias escalas, incluyendo la desertificación, la acidificación de los océanos y el cambio climático global. Este último, está considerado como una de las mayores amenazas para el desarrollo sostenible, dadas su magnitud, severidad, duración temporal e irreversibilidad.

Antes de considerar los criterios e indicadores que pueden utilizarse para valorar la sostenibilidad de un sistema energético dotado de tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂ (CAC) hay que entender qué se entiende por un sistema energético sostenible.

En el estudio llevado a cabo por M. Hoogwijk, *et al* (2007) [10] sobre unas 40 publicaciones acerca del desarrollo sostenible, un tercio de las mismas no llega a explicitar qué se entiende por desarrollo sostenible o por sistema energético sostenible y en los que sí se da una definición, éstos adoptan la dada por el Informe Brundtland: “*el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de que futuras generaciones satisfagan sus propias necesidades*”.

Pero incluso partiendo de esta definición clásica, las interpretaciones suelen diferir, si bien hay un amplio consenso de que en dicho concepto se contienen dos ideas principales:

- Que desarrollo sostenible es un concepto que involucra tres dimensiones: económica, social y medioambiental.
- Que hay una obligación intergeneracional por la que el bienestar de las siguientes generaciones sea al menos como el nuestro.

La mayoría de los autores lo definen como un sistema que satisface al menos dos características:

- a) Seguridad del suministro energético, es decir, un sistema capaz de satisfacer las necesidades energéticas básicas de la generación actual y de las futuras,



- b) Que los impactos ambientales derivados de tal sistema no excederán la capacidad de los ecosistemas de absorber sus efectos sin incurrir en daños permanentes.

A estas características se suelen añadir otras dos:

- a) La disponibilidad de recursos, es decir, que un sistema energético sostenible debería utilizar los recursos de forma tal que las futuras generaciones tuvieran el mismo nivel de acceso a los servicios energéticos que la actual,
- b) Que ofrezca una igualdad de oportunidades de acceso a los servicios energéticos a todos los miembros de la sociedad y que lo haga de forma que promueva el crecimiento económico y el empleo.

Sin embargo, la mayoría de tales publicaciones hacen especial énfasis en el pilar medioambiental del concepto de desarrollo sostenible y no tanto en los aspectos económico o social, y, en general, adolecen de un marco conceptual en el que puedan conciliarse dichos objetivos. Así mismo, sólo algunas de ellas tratan los combustibles fósiles; la mayoría hacen referencia en exclusiva a las energías renovables, o a las energías renovables en combinación con la eficiencia energética.

3. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ (CAC)

Limitar el aumento de la temperatura media global a 2° C por encima de los niveles preindustriales para evitar los principales efectos derivados del cambio climático reforzado antropogénicamente por las emisiones de CO₂ supone que la concentración atmosférica de todos los gases de efecto invernadero no supere las 400 ppm de CO₂ equivalente. Si las concentraciones aumentaran hasta las 550 ppm, es muy improbable que la temperatura media global pueda mantenerse por debajo de los 2° C. Teniendo en cuenta los rangos de incertidumbre de la sensibilidad climática, con la estabilización en 450 ppm de CO₂ equivalente sólo se tendría una probabilidad del 50% de permanecer por debajo del aumento pretendido de 2° C [6]. En este contexto, el Informe Stern concluye que las tecnologías CAC son clave por contribuir al esfuerzo global para combatir el cambio climático:

El concepto “Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂” se viene desarrollando desde los últimos años de la década de los 80 del pasado siglo. Este concepto contempla la recuperación del CO₂ emitido por los procesos de conversión de energía y su disposición lejos de la atmósfera, en formaciones geológicas profundas saturadas con aguas salobres, en campos petroleros o gasistas ya explotados, en capas de carbón metanífero no explotables o en las profundidades de los océanos, esta última opción desechada por la UE ante las incertidumbres aún remanentes.

Este concepto parece ser una opción prometedora a medio y largo plazos para la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera ya que:

- a) se puede aplicar de forma inmediata o a medio plazo porque la tecnología está disponible



- b) la capacidad de almacenamiento a nivel mundial es alta ya que se estima que la capacidad global de almacenamiento a nivel mundial es de al menos 2000 Gt- CO_2 , lo que equivale a la emisión total mundial de 100 años (IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005).
- c) puede ser una respuesta rentable en términos económicos a los crecientes derechos de emisión
- d) permite continuar utilizando combustibles fósiles a gran escala durante el tiempo necesario para la sustitución de tales combustibles por otras formas de generación de energía
- e) puede ser una opción necesaria durante largo tiempo en el caso de que otras opciones energéticas tales como la eólica, o la nuclear no alcanzaran una cuota de mercado importante u obtuvieran suficiente respaldo de la opinión pública [10].

Sin embargo, las tecnologías CAC también pueden justificar soluciones energéticas des-optimizadas manteniendo al sistema energético global excesivamente dependiente de los combustibles fósiles, dada su actual seguridad de suministro, y distraer la atención acerca del desarrollo de fuentes de energía renovables, así como incrementar otros efectos medioambientales colaterales al uso de combustibles fósiles tales como los asociados a la minería y la emisión de otros contaminantes.

Un análisis realizado recientemente por la Comisión Europea [7] demuestra, por otra parte, que las soluciones tecnológicas que contemplan sólo mejoras en la eficiencia energética mediante las denominadas tecnologías de Carbón limpio o con las tecnologías CAC exclusivamente, no son suficientes para alcanzar el objetivo de emisiones casi-cero a costes aceptables preservando al mismo tiempo la diversidad del *mix* energético necesaria para garantizar la seguridad del abastecimiento. La combinación de las tecnologías avanzadas de Carbón limpio con los elementos de las tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO_2 dan lugar a las denominadas Tecnologías Sostenibles del Carbón (Sustainable Coal Technologies) [1].

3.1. CONDICIONES Y CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

La expresión Tecnologías Sostenibles del Carbón hace referencia a un caso concreto de las Tecnologías Sostenibles de los Combustibles Fósiles, entendiendo por éstas la solución tecnológica integrada que puede conducir a una generación eléctrica con emisiones casi-cero mediante la mejora de la eficiencia energética combinada con la captura y el almacenamiento del CO_2 del proceso de generación eléctrica. Aun siendo el carbón el combustible fósil con mayor impacto medioambiental negativo, las tecnologías sostenibles del carbón podrían reducir las emisiones atmosféricas a menos del 10% del contenido en carbono del combustible fósil [1].

Si bien las tecnologías CAC han ganado interés en los últimos años como opción de mitigación, la medida en que puedan contribuir al desarrollo sostenible es una cuestión importante, pero compleja [10].

Para una fuente no renovable como el carbón, petróleo o gas natural, Herman Daly (1990) propone como regla para definir el criterio sostenible de insumos totales que la



tasa de consumo sostenible no sea superior a la tasa con que un recurso renovable, utilizado de modo sostenible, pueda sustituirla. Y para un contaminante como el CO₂, que la tasa de emisión no sea mayor que la tasa con la que este contaminante pueda ser reciclado, absorbido o neutralizado en sus sumideros [3].

En el capítulo 3 “Los Límites: Fuentes y Sumideros”, D. Meadows *et al.* (1992) constatan en su Informe “Más allá de los límites del crecimiento” que “cada recurso usado por la economía humana (...) está limitado tanto por sus fuentes como por sus sumideros”. Hoy parece más probable que el extremo “sumidero” del ciclo de los combustibles fósiles vaya a ser más limitador que el extremo “fuente”, es decir, que pese a las notables reservas globales de carbón, (equivalentes a 130 años de producción a las tasas actuales para lignito y de 200 años para hulla [4]), su uso pueda quedar limitado por el sumidero atmosférico de dióxido de carbono.

En sus “Reflexiones sobre Sostenibilidad, Crecimiento de la población y Medio Ambiente”, el Profesor Albert Allen Bartlett (2006) señala que en los términos “sostenible” y “sostenibilidad” va implícita de idea de “por largo periodo de tiempo”, aunque no se especifique su duración [8]. En el caso de las tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂, el periodo de tiempo mínimo durante el que deberían ser “sostenibles” está ligado al periodo de tiempo establecido por las reservas y las expectativas de vida del recurso, superiores a los 200 años a la actual tasa de consumo [4]. Esto desde el extremo “fuente” del ciclo del carbón como combustible.

Desde el extremo “sumidero”, la duración viene impuesta por el objetivo ya citado de limitar la temperatura global media a 2° C por encima de los niveles preindustriales a finales del presente siglo, lo que implica una reducción de los gases de efecto invernadero del 15 al 50% en 2050 con respecto a los niveles de 1990. En este punto, la singularidad del almacenamiento geológico de CO₂ lleva a que la extensión temporal en que debe comportarse como “sostenible” esté ligada a la tasa de escape anual máxima admisible, que discutiremos más adelante. Ese límite temporal se establece actualmente en 10.000 años.

En el ya citado “Sustainability Framework for Carbon Capture and Storage”, M. Hoogwilt *et al.* (2007), presentan un conjunto de criterios para un sistema energético sostenible desarrollado a partir de un estudio bibliográfico y una discusión con los grupos de interés y afectados (“stakeholders”) llevados a cabo en 2007. Para cada criterio se ha identificado también una lista de limitaciones, cada una de las cuales plantea problemas o barreras para la implementación de las tecnologías de CAC de forma sostenible. Si las tecnologías CAC pretenden formar parte de un sistema energético sostenible, deberían satisfacer todos los criterios expuestos, pero se dan determinadas limitaciones en varios de ellos que pueden cuestionar la sostenibilidad s. s. de las tecnologías CAC:

Limpieza: Es decir, que suponga una carga mínima para el medio ambiente, en sentido amplio: reducción de las emisiones atmosféricas, y de los efluentes a los suelos y a las aguas superficiales y/o subterráneas. Este criterio tiene importantes dimensiones temporales y espaciales, ya que requiere que no suponga cargas a las futuras generaciones ni transfronterizas.

Sin embargo, con la utilización de tecnologías CAC, y por tanto, de los combustibles fósiles, sólo se reducen las emisiones de CO₂, quedando otros contaminantes tales como



los aerosoles, los óxidos de nitrógeno y azufre, NO_x y SO_2 . Tampoco se reducen los impactos de la minería. Además, durante los procesos de captura se introducen otros contaminantes y productos químicos. En el caso del almacenamiento geológico de CO_2 pueden producirse pequeñas pérdidas de CO_2 más o menos continuas que pueden suponer emisiones significativas a largo plazo.

Seguridad: Es decir, que minimice los impactos negativos para la salud humana y la prevención de situaciones de riesgo, en cuyo caso, los riesgos inducidos deben valorarse considerando su probabilidad y su magnitud.

Sin embargo, las posibles consecuencias de potenciales escapes de gases son difícilmente controlables y aunque con probabilidades muy bajas, podrían ser importantes tanto para los animales como para el hombre. También es incierta la seguridad de los almacenamientos geológicos en caso de acciones de sabotaje. Las probabilidades de fugas durante el transporte de CO_2 aumentarán con el uso a gran escala de las tecnologías CAC.

Justicia: Implica que la disponibilidad de energía y su accesibilidad debe ser la misma para todas las regiones y generaciones, incluyendo la actual. Del mismo modo, los riesgos y potenciales efectos negativos de los sistemas energéticos deberían ser compartidos por igual. Esto supone equidad entre beneficios y cargas para todos.

Ahora bien, cuando se adoptan tecnologías CAC en combinación con combustibles fósiles, la implantación de un sistema energético sostenible como solución final se traslada a las siguientes generaciones. También las tecnologías CAC son menos accesibles a los países en vías de desarrollo por su alto coste.

Flexibilidad: Implica que los sistemas energéticos tengan diversidad de fuentes energéticas para disminuir la dependencia de otras regiones para su propio abastecimiento actual y futuro.

Pero las tecnologías CAC no contribuyen a una menor dependencia de los combustibles fósiles ni a su disminución en el suministro energético global. Las inversiones requeridas para las tecnologías CAC, pueden reducir las dedicadas a otras alternativas u opciones energéticas y/o en infraestructuras para las energías eólica y solar.

Continuidad: Implica que las actuales fuentes de energía estén disponibles durante un periodo de tiempo mayor para que exista tiempo suficiente para el desarrollo de fuentes alternativas.

Ahora bien, las tecnologías CAC suponen el uso continuado de combustibles fósiles y disminuyen la eficiencia del proceso de conversión, lo que podría agotar los combustibles fósiles con mayor rapidez. Las tecnologías de CAC son menos eficientes que las convencionales y eso supone un mayor consumo y por tanto una reducción de la expectativa de vida de los recursos fósiles.

El almacenamiento geológico de CO_2 podría conducir a situaciones de monopolio por parte de “empresas de almacenamiento” y crear situaciones geopolíticas conflictivas.



Independencia: Implica un sistema energético no dependiente de otras regiones para su suministro.

Accesibilidad: Implica que las tecnologías energéticas tengan costes de generación bajos para los consumidores y que las industrias y empresas energéticas compartan condiciones equilibradas de mercado.

Pero las tecnologías CAC incrementan los costes de generación y los precios de la electricidad. Por otra parte, aun siendo más caras que las medidas de ahorro energético, pueden reducir la necesidad de mejorar la eficiencia energética.

Las tecnologías CAC requieren un incentivo económico o una política internacional que estimule un sistema energético respetuoso con el clima.

Aceptación pública: Implica que el sistema energético es aceptable para una gran parte de la sociedad y que es percibido por el público como transparente y garante del interés común.

Sin embargo las tecnologías CAC pueden verse como soluciones tecnocráticas y centralizadas que no cuenten con la aceptación del público.

También los impactos ambientales locales debidos al tendido de gaseoductos o al transporte y almacenamiento de CO₂ pueden ser motivo de rechazo popular.

Fiabilidad: Implica que el sistema energético suministre un flujo continuo de energía. La complejidad del sistema no debe reducir ese flujo constante.

4. ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂

Las soluciones técnicas previstas para el almacenamiento de CO₂ a largo plazo contemplan utilizar formaciones geológicas profundas saturadas en aguas salinas, campos petroleros o gasistas agotados y yacimientos de carbón metanífero difícilmente explotables. No obstante, todavía es necesario un esfuerzo en I+D para poder garantizar la integridad y la seguridad del almacenamiento geológico así como en temas de responsabilidad intergeneracional para aumentar la confianza en la opción de CAC [4].

La implementación a gran escala de las tecnologías sostenibles del carbón va a requerir el almacenamiento de grandes volúmenes de CO₂. En Europa, manteniendo la actual participación del carbón en el *mix* energético y admitiendo una penetración de las tecnologías CAC del 30% para el año 2030, deberán almacenarse anualmente entre 300-400 mil toneladas de CO₂, y si la penetración alcanzara el 100% en el año 2050, la inyección estimada sería de 900 mil toneladas. No obstante, Europa posee la suficiente capacidad para almacenar cantidades de CO₂ correspondientes a varios siglos de consumo de carbón, de hecho, durante un tiempo superior al de las expectativas de vida del recurso y a las reservas de carbón esperadas.

El principal impacto medioambiental negativo derivado del uso continuado de combustibles fósiles y de la implantación de la captura y almacenamiento del CO₂



proceden fundamentalmente de las posibles fugas de CO₂ que tendrían efectos tanto locales (en la biosfera local) como globales (en el clima) en función de la magnitud y/o duración del escape [15].

Desde el principio de precaución, todo almacenamiento geológico de CO₂ puede verse como una potencial fuente de emisiones CO₂ en el futuro. La seguridad del almacenamiento va a depender principalmente de las condiciones específicas de la formación geológica de su emplazamiento, pero también del sellado de los sondeos realizados para la caracterización o preexistentes, especialmente cuando el almacenamiento se beneficia de un campo petrolero o gasista agotado. De aquí que la seguridad a largo plazo, el almacenamiento de CO₂ deba contemplar una evaluación integrada del riesgo de fugas de CO₂ que incluya requisitos para la selección de la instalación orientados a minimizar el riesgo de fugas, y criterios de monitoreo para verificar la eficacia del almacenamiento, y para la reparación de cualquier fuga que se produzca [15]. En este sentido, la Comisión Europea ha iniciado en el año 2007 un estudio para evaluar en detalle los riesgos potenciales derivados de la captura y almacenamiento del CO₂ y para identificar las salvaguardias necesarias para garantizar que la captura y almacenamiento del CO₂ pueda realizarse sin peligro, así como una estrategia de sensibilización para hacer participar al público en general [1].

El Informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC Special Report, 2005) dedicado al almacenamiento geológico de CO₂ estima que la fracción de CO₂ que puede mantenerse retenida en almacenamientos que hayan sido adecuadamente seleccionados, caracterizados y gestionados, puede, con una muy alta probabilidad superar el 99% del CO₂ total inyectado durante los primeros 100 años, y con una alta probabilidad, más de 1000 años [4]. En el proyecto australiano GEODISC (Geological Disposal of Carbon Dioxide) se establece como criterio de aceptación una confianza del 80 % en que el 99% del CO₂ inyectado permanezca retenido durante 1000 años [16].

De aquí que sea necesario establecer límites acerca de las máximas emisiones anuales permitidas como criterios de seguridad a largo plazo y también como criterio de sostenibilidad.

El valor límite a imponer a la tasa de fuga máxima permisible tiene que estar definido de forma que excluya cualquier riesgo inadmisibles a las personas y al medio ambiente por escapes inadvertidos de CO₂, y su cuantificación se habrá de establecer en base a las concentraciones de CO₂ en o cerca de la superficie del suelo. Además, tanto desde el punto de vista de la seguridad a largo plazo como desde la sostenibilidad del almacenamiento de CO₂, tampoco las futuras generaciones deben quedar expuestas a las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los almacenamientos industriales de CO₂ [14].

Si bien el IPCC Special Report sobre almacenamiento geológico de CO₂ (IPCC, 2005) no explicita valores de las tasas de fuga aceptables, es posible establecer de modo tentativo valores basados, por un lado, en el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global a 2° C y por otro, en los escenarios de emisión definidos por el propio IPCC en su Special Report sobre Escenarios de Emisión (IPCC, 2000).

Las emisiones acumuladas de los escenarios SRES (Special Report Emission Scenarios) para 1990-2100 varían entre las 1000 Gt CO₂ (escenario B1) y las 2200 Gt CO₂



(escenario A1FI) y para cumplir el objetivo de los 2° C de incremento límite de la temperatura global, las emisiones acumuladas a la atmósfera desde el momento actual no deben exceder las 500 Gt CO₂ (Meinshausen, 2006). Un escenario intermedio supondría unas emisiones del orden de las 1500 Gt CO₂ en el año 2100, por lo que a esa fecha, deberían haberse mitigado a escala mundial unas 1000 Gt CO₂ [14].

Esta sería la cantidad de CO₂ a almacenar globalmente. Si se establece un periodo de retención de 1000 años como base de diseño para la aceptación de un almacenamiento geológico, la tasa de fuga sería del 0.1% anual, lo que supondría un escape incontrolado de 1 Gt CO₂ cada año, por término medio. Una emisión acumulada de 1 Gt CO₂ por año sólo es aceptable a más largo plazo (año 2200), pero no es compatible con el criterio de los 2° C, ni siquiera con un teórico objetivo de 3° C (Caldeira et al., 2003). Por tanto, aceptando un escenario intermedio de 1500 Gt CO₂ aunque no represente el caso peor y con esa tasa de fuga, las emisiones de los almacenamientos industriales de CO₂ superarían por sí solos la totalidad de las emisiones admisibles de CO₂ a la atmósfera. Teniendo en cuenta las incertidumbres existentes acerca de la sensibilidad climática, la posibilidad de que otros gases de efecto invernadero, como el CH₄, puedan contribuir en mayor medida como consecuencia de la fusión de los hielos de Groenlandia o del Polo Norte, la tasa de fuga de los almacenamientos geológicos de CO₂ no debería exceder una décima parte de la calculada anteriormente, es decir, una tasa anual del 0.01%, que se corresponde con un periodo de retención de 10.000 años.

Este es el límite temporal del extremo “sumidero” para que el almacenamiento geológico de CO₂ pueda considerarse una tecnología de mitigación sostenible.

Por lo tanto, el almacenamiento geológico de CO₂ sólo podría considerarse como una tecnología de mitigación sostenible si puede garantizarse un periodo de retención efectivo de al menos 10.000 años [12].

Por otra parte, una tasa de escape máxima anual del 0.01% implica que un 90.5% del CO₂ almacenado deba permanecer confinado en el repositorio en los primeros 1000 años desde la inyección por cualquiera de los mecanismos de atrapamiento o como fase gaseosa [14].

4.1. RIESGOS DEL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂

La selección y la gestión de los emplazamientos son, por lo tanto, factores clave a la hora de minimizar los riesgos inherentes al almacenamiento geológico [15].

Los riesgos asociados al almacenamiento geológico de CO₂ como opción de mitigación, están relacionados fundamentalmente con la integridad física del sistema de almacenamiento, pero también pueden señalarse riesgos de carácter económico, o relacionados con la percepción del público y con la confianza en esta opción.

Esencialmente, los riesgos a tener en cuenta desde el punto de vista de la seguridad del almacenamiento a largo plazo, y que son los que van a condicionar la sostenibilidad de la opción, son los conocidos como riesgos HSE (health, safety, environment) o SSM (salud, seguridad y medioambientales, en español).



Como quiera que las emisiones de CO₂ pueden constituir un peligro tanto a nivel local (efectos sobre la salud de las poblaciones cercanas, o sobre la flora y fauna del emplazamiento) como a nivel global (cambio climático), los riesgos se agrupan en dos categorías: Riesgos locales y riesgos globales.

El principal riesgo local se relaciona con la salud humana por eventuales altas concentraciones de CO₂ en el aire. Incluso considerando que el CO₂ es un gas no tóxico, concentraciones del mismo superiores al 10% en volumen causan pérdida de conciencia, cambios en el pH de la sangre y fallos en las vías respiratorias [13].

Estas concentraciones podrían alcanzarse en caso de pérdidas súbitas de CO₂ asociadas a procesos rápidos, pero incluso las emisiones lentas de CO₂ procedentes de los almacenamientos geológicos podrían causar daños si se produjeran acumulaciones en recintos cerrados (Benson et al., 2002).

También es conocido que las emanaciones lentas de CO₂ provocan daños en la flora y en la fauna que utiliza el suelo como madriguera.

Los riesgos globales asociados a las emisiones a la atmósfera de CO₂ están relacionados con los efectos sobre el calentamiento global.

No podemos olvidar que un riesgo se cuantifica por la magnitud de las consecuencias (daño) del peligro en cuestión, y por la probabilidad de que se produzca el suceso que genera el peligro, generalmente como producto de ambos factores, consecuencias y probabilidad.

La probabilidad de un escape súbito de CO₂ desde un almacenamiento geológico subterráneo es prácticamente nula [13], y la eliminación de ese peligro es el objetivo primordial de la caracterización de las formaciones almacén y de sello previa al almacenamiento.

No obstante, el CO₂ puede migrar a lo largo y a través de las fallas que intersecten la formación de sello, tanto las no detectadas en las fases de selección y caracterización, como aquéllas cuyo grado de sellado no se valoró adecuadamente, o que han devenido transmisivas por reactivación mecánica debida a las altas presiones de inyección.

Otro daño medioambiental ligado a la evolución del CO₂ en el almacenamiento, y por tanto, diferidos en el tiempo, es la potencial contaminación de las aguas subterráneas de acuíferos utilizados como recurso económico, por el desplazamiento de la salmuera de la formación almacén por el CO₂ inyectado antes de la completa disolución de éste. Este riesgo incluye también la movilización de metales pesados inducida por la acidificación de las aguas subterráneas por la acción del CO₂ [13].

La Comisión Europea está identificando todos los riesgos potenciales de la Captura y Almacenamiento Geológico de CO₂ [16] para desarrollar el necesario marco normativo y establecer las salvaguardias adecuadas [1].



5. UNA VISIÓN CRÍTICA

Para cumplir con el objetivo estratégico de no superar en 2º C la temperatura media de la atmósfera respecto a la de 1990 de aquí a final de siglo, la Unión Europea ha suscrito el compromiso de reducir sus emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en un 40% para el año 2020 y en un 80% para el año 2050, también respecto a las de 1990 [4].

Las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ no evitan la generación de gases de efecto invernadero (es más, aumentan el consumo de combustibles fósiles y por lo tanto, las emisiones de CO₂) y reducirían su expectativa de vida como recursos energéticos, pero sí pueden contribuir en la reducción de tales emisiones a la atmósfera durante un largo periodo de tiempo y, por consiguiente, contribuir a la mitigación del cambio climático, objetivo principal perseguido con esta innovación tecnológica. Ahora bien, y en primer lugar, no se espera que las tecnologías CAC estén disponibles a escala comercial antes del año 2020 y, por tanto, no van a poder contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático hasta, al menos, ese año.

Segundo, en la medida que las tecnologías CAC dependen de la utilización de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural), no puede decirse que sean tecnologías “sostenibles” s.s., sino más bien una solución intermedia para la protección medioambiental, sujeta a las condiciones que se expondrán a continuación:

- 1) La disponibilidad de la capacidad de almacenamiento de CO₂ para gestionar las emisiones industriales hasta que los combustibles fósiles puedan ser sustituidos por fuentes energéticas sostenibles, es una condición previa y necesaria de la sostenibilidad, pero no suficiente.
- 2) La sostenibilidad del almacenamiento geológico de CO₂ está ligada también y primordialmente a la tasa de fuga de las emisiones, de forma tal que la suma de las emisiones de CO₂ procedentes de los almacenamientos industriales más otras emisiones antropogénicas y las naturales de gases efecto invernadero no pueden exceder las concentraciones de CO₂ atmosférico compatibles con la pretendida limitación de la temperatura media global a 2º C.

Respecto al primer punto, si bien en España no se ha elaborado un inventario completo de la capacidad global de almacenamiento en formaciones geológicas (yacimientos agotados de petróleo y gas, formaciones permeables profundas saturadas en aguas salobres, niveles de carbón metanífero, rocas ultrabásicas, etc.), sí existen estimaciones recientes del IGME (2008), a escala peninsular, y de CIEMAT (2008), para las cuencas del Duero y Ebro. La capacidad total estimada se cifra entre 45 y 50 Gt CO₂ eq. Suponiendo una emisión anual de CO₂ por las centrales térmicas de producción eléctrica en España de 148 Mt/año, la Península Ibérica admitiría almacenar, en el caso más favorable, unos 330 años de producción eléctrica a la tasa actual. Sin embargo, si se consideran las emisiones totales de CO₂, cifradas en 440 Mt en 2005 y teniendo en cuenta que no toda la capacidad de almacenamiento podría estar disponible debido a otras consideraciones ambientales o económicas, la capacidad de almacenamiento se reduciría a 114 años. Este valor es sensiblemente inferior al de expectativa de vida de la hulla y semejante a la del lignito.



En cuanto a las emisiones de CO₂ procedentes de los almacenamientos, los trabajos en curso en Sleipner (Noruega) y en In Salah (Argelia) están demostrando la idoneidad del almacenamiento en formaciones geológicas salobres profundas a escala industrial. No obstante persisten grandes incertidumbres acerca del valor máximo admisible para esas fugas en base anual. Como se ha expuesto con anterioridad, la reducción de emisiones requerida para cumplir el objetivo de mitigación del cambio climático a largo plazo supone que la estanqueidad del almacenamiento, basada en el principio de barreras múltiples, deba mantenerse durante el periodo de tiempo de retención efectivo establecido en 10.000 años. Este periodo excede con mucho el tiempo de vigilancia institucional en el que puede llevarse a cabo una verificación y un monitoreo sistemáticos, para adentrarse en las responsabilidades intergeneracionales.

De aquí que a la condición necesaria de la disponibilidad de capacidad de almacenamiento de CO₂ se deba sumar la de la seguridad del almacenamiento a largo plazo. Este aspecto, es decir, el garantizar de forma razonable la seguridad a largo plazo del almacenamiento de CO₂ y el que no se estén transfiriendo responsabilidades o cargas ambientales indebidas a generaciones futuras, es la clave para poder asumir, con las limitaciones inherentes a su condición de tecnología de transición, que el almacenamiento geológico de CO₂ puede ser aceptado por la opinión pública como una opción “sostenible” de mitigación del cambio climático.

7. CONCLUSIONES

- La Unión Europea ha suscrito el compromiso de reducir sus emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en un 40% para el año 2020 respecto a las de 1990 y en un 80% para el año 2050, también respecto a las de 1990.
- Limitar el aumento de la temperatura media global a 2º C por encima de los niveles preindustriales para evitar los principales efectos derivados del cambio climático reforzado antropogénicamente por las emisiones de CO₂ supone que la concentración atmosférica de todos los gases de efecto invernadero no supere las 400 ppm de CO₂ equivalente.
- Si los combustibles fósiles van a jugar un importante papel en el *mix* energético, hay que proveer soluciones para limitar el impacto de su utilización y hacerla compatible con los objetivos de sostenibilidad climática.
- La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero sólo es posible con tecnologías que permitan una drástica reducción de la huella producida por la combustión del carbón.
- Las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) no evitan la generación de gases de efecto invernadero, pero sí pueden contribuir en la reducción de tales emisiones a la atmósfera durante un largo periodo de tiempo y, por consiguiente, contribuir a la mitigación del cambio climático.
- En la medida que las tecnologías CAC dependen de la utilización de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural), no puede decirse que sean tecnologías “sostenibles” s.s., sino una solución intermedia para la protección medioambiental.
- El almacenamiento geológico de CO₂ es una tecnología emergente que se encuadra en la necesidad de alcanzar la sostenibilidad en el uso de los recursos



energéticos, partiendo de la evidencia de que, para los combustibles fósiles, el flujo entre sus fuentes y sus sumideros va a estar limitado más por el sumidero atmosférico del CO₂ que por la fuente energética, especialmente para el carbón.

- El principal impacto medioambiental negativo derivado del uso continuado de combustibles fósiles procede fundamentalmente de las posibles fugas de CO₂ que tendrían efectos tanto locales (en la biosfera local) como globales (en el clima) en función de la magnitud y/o duración del escape.
- De aquí que sea necesario establecer límites acerca de las máximas emisiones anuales permitidas como criterios de seguridad a largo plazo y como criterio de sostenibilidad.
- La disponibilidad de la capacidad de almacenamiento de CO₂ para gestionar las emisiones industriales hasta que los combustibles fósiles puedan ser sustituidos por fuentes energéticas sostenibles, es una condición previa y necesaria de la sostenibilidad, pero no suficiente.
- La sostenibilidad del almacenamiento geológico de CO₂ está vinculada a las tasas de fuga las emisiones, de forma tal que la suma de las emisiones de CO₂ procedentes de los almacenamientos industriales más otras emisiones antropogénicas y las naturales de gases efecto invernadero no excedan las concentraciones de CO₂ atmosférico compatibles con la limitación del aumento de la temperatura media global a 2° C.
- Por lo tanto, el almacenamiento geológico de CO₂ sólo podría considerarse como una tecnología de mitigación sostenible si puede garantizarse un periodo de retención efectivo de al menos 10.000 años.

8. REFERENCIAS

[1] Communication from the Commission to the Council and the European Parliament- Sustainable power generation from fossil fuels: aiming for near-zero emissions from coal after 2020, EUR Lex 52006DC0843-EN.

[2] World Demand Forecast 2006, IEA.

[3] **Daly, H. ; 1990.** Toward Some Operational Principles of Sustainable Development, *Ecological Economics* 2 (1990).

[4] Commission Communication on Sustainable Power Generation from Fossil Fuels: Aiming for Near-Zero Emissions from Coal after 2020. Summary of the Impact Assessment, 2007.

[5] **Benson, S. M. Orr, and F. M. Jr; 2008.** .Sustainability and Energy Conversions. MRS Bulletin Vol. 33 April 2008.

[6] **Tirpak, A.J. et al.; 2005.** Report of the International Scientific Steering Committee. International Symposium on the Stabilisation of Greenhouse Gas Concentrations. Hadley Center, UK, 2005.

[7] Sustainable Power Generation from Fossil Fuels: Aiming for Near-Zero Emissions from Coal after 2020. Impact Assessment, 2007. COM (2006) 843 final.



- [8] **Bartlett, A. A.; 2006:** Reflexiones sobre Sostenibilidad, Crecimiento de la población y Medio Ambiente. *Population & Environment* Vol 16, nº 1 pp 5 a 35.
- [9] **Blohm, M. ; 2007.** Sustainability Criteria and CCs in Germany. Unit KII1 National Climate Change Program, 2007.
- [10] **Hoogwijk, M.; Ramirez, A.; Hendriks, C.;2007.** "Sustainability Framework for Carbon Capture and Storage ECOFYS, 2007.
- [11] Commission Staff Working Document. Accompanying document to the Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Geological Storage of carbon dioxide. Impact Assessment. COM(2008) final.
- [12] German Advisory Council on Global Change. WBGU Special Report 2006. Chapter 5, CO₂ storage in the ocean and under the sea floor.
- [13] CO2STORE _BPM-final.
- [14] CO2 Capture and Storage – Only an Interim Solution. Sonnenseite Franz Alt – Environmental Policy.
- [15] Comisión de las Comunidades Europeas. Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo. Producción sostenible de electricidad a partir de combustibles fósiles: Conseguir centrales eléctricas de carbón con emisiones próximas a cero después de 2020. COM (2006) 843 final.
- [16] **Bowden and Rigg; 2004.** "Assessing Reservoir Performance Risk in CO2 Storage Projects. Proceedings 7th International Conference of Greenhouse Gas Technologies, GHGT-7, Paper 13-4. Vancouver.
- [17] Comunicación de la Comisión al Consejo Europeo y al Parlamento Europeo. Una política energética para Europa COM (2007) 1 final.
- Benson, S.; Apps, J.; Hepple, R.; Lippman, M.; and Chin Fu Tsang; 2002.** Health, Safety and Environmental Risk Assessment for Geologic Storage of Carbon Dioxide: Lessons Learned from Industrial and Natural Analogues. Lawrence Berkeley National Labs, 2002.
- Brundtland, G.H. ;1987.** "Our Common Future". Oxford University Press
- Caldeira, K.; Jain, A.K.; Hoffert M.I. ; 2003.** "Climate Sensitivity Uncertainty and the Need for Energy Without CO2 Emission" 28 March 2003 vol 299 *Science*.
- IPCC Special Report on Emission Scenarios (IPCC, 2000).
- IPCC TAR (2001) Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005.
- GEODISC (Geological Disposal of Carbon Dioxide) The search for geological sequestration in Australia. Andy J. Rigg. Australian Petroleum Cooperative Research Centre (APCRC).
- Meadows, D.; Randers, J., and Meadows, D.; 1992.** "Los límites del crecimiento 30 años después". Galaxia Gutemberg.
- Meinshausen, M. ; 2006.**Emission pathways and concentration levels under a 2 °C climate target" Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) EU Parliament, Temporary Committee on Climate Change.