

RESUMEN EXTENDIDO

Una de las causas del cambio climático es la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero, principalmente el CO₂. Para reducir estas emisiones una de las opciones que existen es el almacenamiento geológico de CO₂. En esta tesis se exponen los criterios de selección de emplazamientos adecuados para el almacenamiento geológico de CO₂, así como sus costes y riesgos asociados para, por último, proceder a un análisis de estos riesgos, para lo que se han elaborado metodologías específicas de análisis de riesgos para proyectos de almacenamiento geológico de CO₂.

Entre los problemas de mayor preocupación para la sociedad actual se encuentran los relacionados con el medio ambiente y, en concreto, los relativos al cambio climático. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas invernadero de origen antropogénico. La reducción de emisiones requerida puede ser conseguida de diferentes modos:

- Ahorro energético o reducción del consumo de energía.
- Eficiencia energética, tanto en la utilización como en la conversión.
- Promoción de los sumideros naturales de CO₂, como los bosques, suelos u océanos.
- Uso de energías renovables o energía nuclear en lugar de combustibles fósiles.
- Uso de materiales cuya elaboración sea más eficiente energéticamente.
- Uso de gas natural en sustitución del carbón y el petróleo.
- Captura y almacenamiento geológico del CO₂ procedente de combustibles fósiles.
- Cogeneración, re-uso y reciclado...

Una de las nuevas aproximaciones tecnológicas que intentan mitigar el cambio climático reforzado e inducido por dichas emisiones es la captura del CO₂ emitido por las grandes fuentes estáticas, y su almacenamiento en formaciones geológicas tales como campos de petróleo o gas ya agotados, formaciones permeables profundas saturadas con aguas salinas y/o en yacimientos de carbón no explotables.

A la hora de elegir un emplazamiento para este tipo de proyectos, deben valorarse determinados aspectos para garantizar que el sistema de almacenamiento en su conjunto se comporte de acuerdo con los requisitos de seguridad y permanencia del CO₂ inyectado durante todo el periodo requerido. El emplazamiento debe ser geológicamente

adecuado, económicamente viable, técnicamente posible, seguro, socialmente sostenible y aceptado por la sociedad. Los riesgos asociados al almacenamiento geológico de CO₂ no han sido hasta ahora estudiados en profundidad. Comprender estos riesgos es indispensable para facilitar la formulación de unos criterios y de un marco regulador requerido para el desarrollo de este tipo de proyectos a largo plazo.

Los riesgos son combinaciones de la probabilidad de que ocurran sucesos no deseados y la gravedad de las consecuencias en caso de que esos sucesos ocurriesen. La cuestión clave está en decidir qué tipo y nivel de riesgos estamos dispuestos a admitir en contrapartida a los beneficios que supone la actividad industrial. En nuestro caso, el éxito de un proyecto de almacenamiento geológico de CO₂ depende de varios aspectos, tales como la aptitud del sello para confinar CO₂, la capacidad de almacenamiento del almacén, la viabilidad económica del proyecto, los impactos que éste pueda tener para la seguridad, salud o medioambiente, etc.

Para las fugas de CO₂ asumiremos un máximo del 0,01% del CO₂ almacenado al año, que supondría una fuga del 1% en 100 años y del 10% en 1000 años. Este límite ha sido escogido de entre las estimaciones de múltiples investigadores del ratio de fuga de CO₂ que es aceptable, que varían desde el 1% hasta el 0,01% por año del total almacenado.

La capacidad efectiva del almacén puede verse reducida, principalmente, por un cálculo erróneo de su capacidad (capacidad limitada) o una inyectividad reducida. Asumiremos que la capacidad efectiva debe ser, al menos, de un 90% de la calculada.

En una primera aproximación, para que el proyecto sea viable, los beneficios, como mínimo, deben ser mayores que los costes. En los costes hay que tener en cuenta tanto los costes de captura y transporte, como los de perforación e inyección. Y en los beneficios, habrá que tener en cuenta los beneficios derivados de la mitigación de CO₂ de la atmósfera y los incentivos de la Administración, así como los beneficios derivados de una posible recuperación secundaria de metano o petróleo.

Además, el proyecto no debe plantear un riesgo apreciable a la salud, particularmente en lo que respecta a pérdida de vidas o daños a la salud graves. Si el riesgo es suficientemente bajo será aceptable socialmente. Así, una frecuencia de una víctima

mortal cada 1 000 años sería aceptable. También son aceptables daños al medioambiente por un valor de hasta 1 000 €/año. El cumplimiento de todos estos requisitos redundará en una buena imagen pública de este tipo de proyectos.

Para evaluar estos riesgos, se han elaborado metodologías específicas de análisis de riesgos para proyectos de almacenamiento geológico de CO₂. La primera se ha elaborado según el método FMEA (Failure Modes and Effects Analysis). En ella, la gravedad (o magnitud del daño) y la probabilidad del fallo pueden ser usadas para evaluar el riesgo, a través de una Matriz de Riesgo. En el caso del almacenamiento geológico de CO₂ se han identificado los modos de fallo que muestra la tabla 1.

Tabla 1 Modos de fallo en un almacenamiento geológico de CO₂

MODOS DE FALLO
Fugas de CO₂ en las instalaciones
Fuga de CO ₂ debida a un fallo de la tubería
Fallo en la cabeza del pozo de inyección
Fallo del dispositivo antirretorno
Riesgos geológicos
Fugas de CO ₂
Fugas de CH ₄
Sismicidad
Movimiento del terreno
Capacidad del almacén e inyectividad
Inyectividad reducida
Falta de capacidad
Riesgos sociales
Los participantes rechazan o se oponen al proyecto
Percepción pública negativa de este tipo de proyectos
Demandas legales
Cambio regulatorio
Riesgos económicos
Costes del proyecto
Bajada de precios del mercado de CO ₂
Falta de subvención
Riesgos para la seguridad, salud y medioambiente
Daños a la biosfera
Daño medioambiental de las instalaciones en superficie
Contaminación del suelo o aguas por escapes de CO ₂
Contaminación de acuíferos por salmueras

Se ha elaborado una matriz con el fin de evaluar la probabilidad de ocurrencia de estos fallos o, lo que es lo mismo, la frecuencia estimada de los mismos. La matriz clasifica la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los fallos en 6 categorías (tabla 2).

Tabla 2 Matriz de probabilidad

MATRIZ DE PROBABILIDAD	FRECUENCIA (año⁻¹)	COMENTARIOS
6. INEVITABLE	$1 \cdot 10^{-1}$	Se espera que ocurra al menos una vez cada 10 años
5. MUY PROBABLE	$1 \cdot 10^{-2}$	Se espera que ocurra una vez cada 100 años
4. PROBABLE	$1 \cdot 10^{-3}$	Puede ocurrir. Existe 1 posibilidad de que ocurra en 1000 años
3. IMPROBABLE	$1 \cdot 10^{-4}$	No se espera que ocurra, pero puede ocurrir. Existe 1 posibilidad de que ocurra en 10 000 años
2. MUY IMPROBABLE	$1 \cdot 10^{-5}$	Sería muy sorprendente que ocurriese. Existe 1 posibilidad de que ocurra en 100 000 años
1. EXTREMADAMENTE IMPROBABLE	$1 \cdot 10^{-6}$	Se supone que es imposible que ocurra el suceso

Una vez estimada la probabilidad de los diferentes fallos, se pasa a estimar su gravedad. Se entiende por gravedad, la magnitud del daño que se estima tendrá cada fallo en caso de producirse. Esta gravedad se estimará para 5 aspectos diferentes, que darán como resultado 5 indicadores de riesgo diferentes. Estos aspectos son coste, salud y seguridad, imagen pública, medioambiente y pérdidas de CO₂.

El efecto de un fallo lleva generalmente un coste asociado. Este coste será la suma de los costes de remediación de los daños ocasionados a la salud y seguridad de las personas, el medioambiente, la imagen pública y las pérdidas de CO₂ asociadas. Para estimar la imagen pública se tendrá en cuenta la cobertura que tendría un determinado fallo en los medios de comunicación, así como las posibles demandas que pueda inducir ese fallo. Asimismo, es importante la estimación de los daños que posibles accidentes pueden tener en el medioambiente, la salud y la seguridad. Para esta estimación se tendrán en cuenta la magnitud de los daños y su reversibilidad.

Además, el proyecto industrial objeto de este análisis tiene como objetivo el almacenamiento de CO₂. Por ello, se ha considerado importante incluir un indicador de pérdidas de CO₂, que establecerá la magnitud de la pérdida de CO₂ (en porcentaje anual del total almacenado) ocasionada al producirse un determinado fallo. Para la estimación de todos estos factores de riesgo se ha construido una matriz de gravedad (tabla 3).

Cruzando estas dos matrices, probabilidad y gravedad, se ha obtenido una matriz de clases de riesgo (tabla 4) con 6 clases, desde riesgo mínimo a riesgo extremo. La definición de estas clases de riesgo se define en función de la aptitud del emplazamiento para el almacenamiento geológico (tabla 5), teniendo en cuenta cada aspecto concreto (coste, salud y seguridad, imagen pública, medioambiente o pérdidas de CO₂).

Tabla 3 Matriz de gravedad

MATRIZ DE GRAVEDAD					
NIVEL	EFFECTOS				
	COSTE	SALUD Y SEGURIDAD	IMAGEN PÚBLICA	MEDIO AMBIENTE	PÉRDIDAS DE CO₂
10	> 10 M€	Alguna fatalidad o daño permanente a la salud	Cobertura en los medios de comunicación internacionales	Impacto catastrófico e irreversible	> 3%/año
9	1 - 10 M€				1 - 3 %/año
8	0,5 - 1 M€	Graves o múltiples lesiones	Cobertura en los medios de comunicación nacionales	Impacto irreversible significativo	0,7 - 1 %/año
7	0,2 - 0,5 M€				0,4 - 0,7 %/año
6	0,1 - 0,2 M€	Lesiones leves	Muchas demandas o quejas locales	Impacto reversible significativo	0,1 - 0,4 %/año
5	0,05 - 0,1 M€				0,05 - 0,1 %/año
4	0,01 - 0,05 M€	Tratamiento médico	Algunas demandas o quejas locales	Impacto menor	0,01 - 0,05 %/año
3	5000 - 10000 €				0,007 - 0,01 %/año
2	1000 - 5000 €	No se requieren atenciones médicas	Quejas o demandas por asuntos menores	Impacto inapreciable	0,003 - 0,007 %/año
1	< 1000 €				0 - 0,003 %/año

Tabla 4 Matriz de clases de riesgo

MATRIZ CLASES DE RIESGO	GRAVEDAD									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
6. INEVITABLE	EXTREMO	EXTREMO	EXTREMO	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	BAJO	MÍNIMO
5. MUY PROBABLE	EXTREMO	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	MÍNIMO
4. PROBABLE	MUY ALTO	ALTO	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	MÍNIMO
3. IMPROBABLE	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	MÍNIMO	MÍNIMO
2. MUY IMPROBABLE	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
1. EXTREMADAMENTE IMPROBABLE	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO

No debe olvidarse que el objetivo no es otro que la determinación del riesgo. Este riesgo será individual y cuantificado para cada uno de los modos de fallo y cada uno de los indicadores (coste, salud y seguridad, etc.). La cuantificación se hará con la ayuda del

método Delphi. Una Delphi consiste en la selección de un grupo de expertos a los que se les pregunta su opinión sobre cuestiones referidas a acontecimientos del futuro. Los promedios de los resultados obtenidos mediante el método Delphi se introducirán en la matriz de riesgo (tabla 6), obteniéndose la clase de riesgo correspondiente a cada dupla fallo-indicador para el emplazamiento objeto de estudio. Los valores altos, muy altos o extremos obtenidos merecerán análisis más profundo.

Tabla 5 Definición de clases de riesgo

MÍNIMO	Aptitud excelente para el almacenamiento geológico de CO ₂
BAJO	Aptitud buena para el almacenamiento geológico de CO ₂
MEDIO	Aptitud media para el almacenamiento geológico de CO ₂ . Deben introducirse mecanismos de control del riesgo
ALTO	Aptitud baja para el almacenamiento geológico de CO ₂ . Deben introducirse mecanismos de control del riesgo y realizar acciones preventivas que disminuyan el riesgo
MUY ALTO	Aptitud muy baja para el almacenamiento geológico de CO ₂ . Deben introducirse fuertes acciones preventivas si se pretende llevar a cabo el proyecto
EXTREMO	Emplazamiento no apto para el almacenamiento geológico de CO ₂

En la tabla 6 se puede observar la matriz de riesgo correspondiente a un acuífero salino profundo situado en un anticlinal en España. Los datos han sido proporcionados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Se puede observar que, siguiendo la metodología, no existe ningún riesgo extremo o muy alto, mientras que el único riesgo alto que existe es el debido a los costes que acarrearía una inyectividad reducida.

La otra metodología elaborada se basa en el método de análisis por árbol de fallos. Se trata de un método deductivo de análisis que parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", para averiguar sus orígenes. En el caso del almacenamiento geológico de CO₂, las fugas de CO₂ son uno de los sucesos más importantes que se pretende evitar. La aplicación del análisis mediante árbol de fallos al almacenamiento geológico de CO₂ puede resultar muy útil a la hora de valorar el nivel de riesgo que existe en un emplazamiento determinado para un determinado fallo. Por ejemplo, se puede construir un árbol de fallos para las fugas de CO₂ (figura 1).

En este árbol de fallos habrá que introducir la frecuencia (o probabilidad) de cada uno de los sucesos básicos o sin desarrollar que aparecen en el mismo. Para ello, al igual que en el método FMEA, se utilizará el método Delphi. Así, un grupo de expertos determinará las frecuencias para cada fallo, que serán introducidas en un programa

específico de análisis por árbol de fallo (FaultrEASE), dando como resultado una frecuencia (o probabilidad) de fuga de CO₂.

Esta frecuencia de fuga de CO₂ se referirá sólo a fugas que superen el umbral establecido del 0,01% por año del total de CO₂ almacenado. Por lo tanto, a la hora de valorar la frecuencia de los sucesos básicos (círculos azules) o no desarrollados (rombos amarillos), se tendrán en cuenta únicamente las fugas mayores a dicho umbral. La frecuencia resultante, calculada mediante el programa FaultrEASE, de fugas de CO₂ será función de las frecuencias de los sucesos básicos o no desarrollados. De la misma manera, se puede estimar la frecuencia (o probabilidad) de cualquier otro suceso intermedio existente en el árbol.

Los datos de frecuencias se han obtenido mediante el reparto de un cuestionario a expertos en almacenamiento geológico de CO₂ del IGME, y están referidos a un acuífero salino profundo situado en un anticlinal en España. La frecuencia de cada evento se ha calculado como la media de la opinión de los expertos y se han introducido los datos en el programa FaultrEASE, dando como resultado las frecuencias de los diversos sucesos intermedios y del suceso final, que son las fugas de CO₂. Todas estas frecuencias se recogen en la tabla 7.

Como puede observarse en la tabla 7 se ha obtenido una frecuencia de fugas de CO₂ de 0,0706. Esto quiere decir que, por ejemplo, cada 100 años se producirían alrededor de 7 fugas de CO₂ mayores del 0,01% del total almacenado. Como se puede observar en la tabla, de estas 7 fugas cada 100 años, 4 se producirían por los pozos. Se puede concluir entonces que las fugas por los pozos constituyen el elemento crítico en almacenamientos de CO₂ en acuíferos salinos profundos situados en anticlinales en España. Asimismo, se pueden observar las frecuencias de otros sucesos intermedios.

Tabla 6 Matriz de riesgo correspondiente a un acuífero salino profundo en España

MODOS DE FALLO	PROBABILIDAD (P)	GRAVEDAD (G)					RIESGO = P x G				
		COSTE	SALUD Y SEGURIDAD	IMAGEN PÚBLICA	MEDIO AMBIENTE	PÉRDIDAS DE CO ₂	COSTE	SALUD Y SEGURIDAD	IMAGEN PÚBLICA	MEDIO AMBIENTE	PÉRDIDAS DE CO ₂
Fugas de CO₂ en las instalaciones											
Fuga de CO ₂ debida a un fallo de la tubería	3	2	6	6	6	4	MÍNIMO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	BAJO
Fallo en la cabeza del pozo de inyección	1	6	7	6	8	6	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
Fallo del dispositivo antirretorno	1	6	8	8	8	8	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
Riesgos geológicos											
Fugas de CO ₂	2	5	2	8	8	10	BAJO	MÍNIMO	BAJO	BAJO	MEDIO
Fugas de CH ₄	1	5	4	8	8	10	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
Sismicidad	1	6	4	8	10	10	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
Movimiento del terreno	2	6	6	8	10	10	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
Capacidad del almacén e inyectividad											
Inyectividad reducida	4	8	1	4	1	1	ALTO	MÍNIMO	BAJO	MÍNIMO	MÍNIMO
Falta de capacidad	2	8	1	4	1	1	BAJO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
Riesgos sociales											
Los participantes se oponen al proyecto	2	1	1	4	1	1	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
Percepción pública negativa del proyecto	4	6	1	6	1	1	MEDIO	MÍNIMO	MEDIO	MÍNIMO	MÍNIMO
Demandas legales	1	5	1	6	1	1	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
Cambio regulatorio	2	1	1	8	1	1	MÍNIMO	MÍNIMO	BAJO	MÍNIMO	MÍNIMO
Riesgos económicos											
Costes del proyecto	3	8	1	1	6	6	MEDIO	MÍNIMO	MÍNIMO	MEDIO	MEDIO
Bajada de precios del mercado de CO ₂	3	6	1	1	6	1	MEDIO	MÍNIMO	MÍNIMO	MEDIO	MÍNIMO
Falta de subvención	4	6	1	4	4	4	MEDIO	MÍNIMO	BAJO	BAJO	BAJO
Riesgos al medioambiente y la salud											
Daños a la biosfera	2	6	8	8	10	1	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MÍNIMO
Daño de las instalaciones en superficie	2	6	8	8	8	1	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MÍNIMO
Contaminación del suelo o aguas por escapes de CO ₂	2	6	7	8	10	1	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MÍNIMO
Contaminación de acuíferos por salmueras	1	6	6	8	10	1	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO

Figura 1 Árbol de fallos para las fugas de CO₂ en un almacenamiento geológico de CO₂

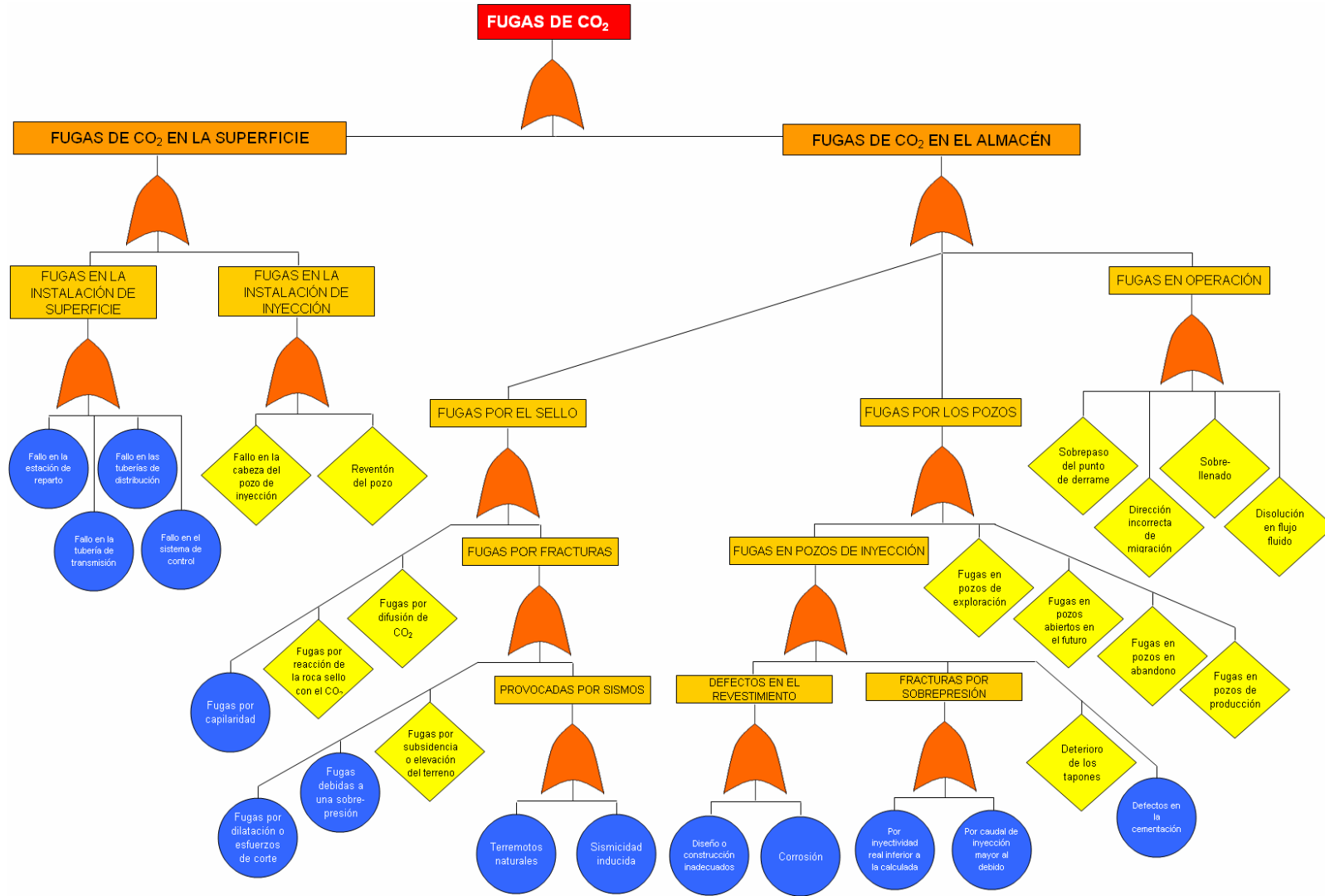


Tabla 7 Frecuencias de fallo en fugas de CO₂

	FRECUENCIA (año ⁻¹)
FUGAS DE CO₂	7,06E-02
Fugas de CO₂ en la superficie	1,01E-02
Fugas en la instalación de superficie	1,01E-02
<i>Fallo en la estación de reparto</i>	1,00E-06
<i>Fallo en la tubería de transmisión</i>	1,00E-04
<i>Fallo en las tuberías de distribución</i>	1,00E-02
<i>Fallo en el sistema de control</i>	1,00E-06
Fugas en la instalación de inyección	2,00E-06
<i>Fallo en la cabeza del pozo de inyección</i>	1,00E-06
<i>Reventón del pozo</i>	1,00E-06
Fugas de CO₂ en el almacén	6,05E-02
Fugas por el sello	3,05E-04
<i>Fugas por capilaridad</i>	1,00E-04
<i>Fugas por difusión de CO₂</i>	1,00E-06
<i>Fugas por reacción del CO₂ con la roca sello</i>	1,00E-06
Fugas por fracturas	2,03E-04
<i>Fugas por dilatación o esfuerzos de corte</i>	1,00E-06
<i>Fugas debidas a una sobrepresión</i>	1,00E-04
<i>Fugas por subsidencia o elevación del terreno</i>	1,00E-04
Provocadas por sismos	2,00E-06
<i>Terremotos naturales</i>	1,00E-06
<i>Sismicidad inducida</i>	1,00E-06
Fugas por los pozos	4,02E-02
<i>Pozos de producción</i>	1,00E-06
<i>Pozos de exploración</i>	1,00E-06
<i>Apertura de pozos en el futuro</i>	1,00E-06
<i>Pozos abandonados</i>	1,00E-02
Pozos de inyección	3,02E-02
<i>Defectos en la cementación</i>	1,00E-04
<i>Deterioro de los tapones de cemento</i>	1,00E-04
Defectos en el revestimiento	1,00E-02
<i>Diseño o construcción inadecuados</i>	1,00E-06
<i>Corrosión</i>	1,00E-02
Por sobrepresión	2,00E-02
<i>Por inyectividad real inferior a la calculada</i>	1,00E-02
<i>Por caudal de inyección mayor al debido</i>	1,00E-02
Fugas en operación	2,00E-02
<i>Por sobrepaso del punto de derrame</i>	1,00E-06
<i>Por predicción incorrecta de la dirección de migración</i>	1,00E-06
<i>Por sobrellenado</i>	1,00E-02
<i>Por disolución en flujo fluido</i>	1,00E-02