

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología
Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica

TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

Trabajo de Fin de Grado realizado por
Lara Borges Hernández

Tutores:

Karina E. Rodríguez Espinoza.

Luis Antonio González Mendoza.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría comenzar agradeciendo a todas aquellas personas que me han ayudado a lo largo de la carrera, en especial, al grupo que en un principio éramos desconocidos y acabamos siendo familia.

En segundo lugar, a mi madre y a mi hermano, Encarna y Cristian, por su paciencia y apoyarme en este periodo.

A mis tutores, Karina E. Rodríguez Espinoza y Luis Antonio González Mendoza, por estar ahí siempre, aun teniendo en cuenta mi situación estos meses.

Me gustaría mostrar mi gratitud a aquellos profesores, que a pesar de ciertos problemas que hemos tenido, se han esforzado en enseñarnos y mostrarnos las asignaturas con pasión.

Por último, también quiero agradecer al proyecto “ACLIEMAC MAC2/3.5b/380” financiado con fondos FEDER (Programa INTERREG MAC 2014-2020) y a la “Fundación CajaCanarias” y “Fundación Bancaria "la Caixa"” a través de la “Convocatoria Proyectos Investigación 2019”.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	1
ÍNDICE DE FIGURAS.	6
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	8
CAPÍTULO 1. RESUMEN.....	9
1.1. RESUMEN.	10
1.2. ABSTRACT.	11
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN.....	12
2.1. PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.....	13
2.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.	13
2.3 METODOLOGÍA Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.	13
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	15
3.1. DEFICIÓN DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO ₂	16
3.2. IMPACTO DEL CO ₂ EN EL MEDIO AMBIENTE Y EN LA SALUD.	16
3.3. POLÍTICAS Y ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	16
3.3.1 Acuerdo de París y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.	16
3.3.2. COP26.....	17
3.4. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO ₂	18
3.5. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE CCS.	20
CAPÍTULO 4. ESTADO DEL ARTE.	22
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES PROYECTOS DE CCS EN EL MUNDO.....	23
4.1.1. Proyecto Sleipner field.....	23
4.1.2. Proyecto Gorgon.	23
4.1.3. Proyecto Boundary Dam.	24
4.1.4. Proyecto Petra Nova.	25
4.2. INVERSIÓN Y FINANCIAMIENTO DE PROYECTOS DE CCS.....	25
4.2.1. Inversiones privadas:.....	26
4.2.2. Fondos públicos:	26
4.2.3. Colaboraciones público-privadas:	26
4.2.4. Iniciativas de financiamiento específicas:.....	26

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

4.3. PROGRAMAS E INICIATIVAS A NIVEL MUNDIAL.....	27
4.4. PROGRAMAS E INICIATIVAS EN EUROPA.....	27
4.5. PROGRAMAS E INICIATIVAS EN ESPAÑA Y CANARIAS.....	28
4.6. MARCO REGULATORIO Y POLÍTICO EN CCS.	29
CAPÍTULO 5. EMISIONES DE CO ₂ AL MEDIO AMBIENTE.....	31
5.1. EMISIONES DE CO ₂ A NIVEL MUNDIAL.....	32
5.2. EMISIONES DE CO ₂ EN EUROPA.....	33
5.3. EMISIONES DE CO ₂ EN ESPAÑA.	36
5.4. EMISIONES DE CO ₂ EN CANARIAS.	38
5.5. ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO ₂ EN CANARIAS.....	40
5.5.1 Sectores clave y fuentes de emisiones.	40
5.5.2. Tendencias y evolución de las emisiones.	41
5.5.3. Medidas y políticas para reducir las emisiones.	41
CAPÍTULO 6. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO ₂	42
6.1. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO ₂	43
6.1.1. POSTCOMBUSTIÓN.	43
6.1.2. PRECOMBUSTIÓN.....	44
6.1.3. OXICOMBUSTIÓN.....	45
6.2. TRANSPORTE DE CO ₂	47
6.3. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE CO ₂	49
6.3.1. ALMACENAMIENTO EN FORMACIONES GEOLÓGICAS.	49
6.3.2. ALMACENAMIENTO OCEÁNICO.....	56
6.4. USOS DEL CO ₂	57
6.4.1. INYECCIÓN DE CO ₂	57
6.5. UTILIZACIÓN COMO MATERIA PRIMA.....	58
6.5.1. Polimetileno Espumado (PME).....	58
6.5.2. Metanol (MeOH) / Dimetil éter (DME).....	59
6.5.3. Producción de carbonatos.....	59
6.5.4. Generación de urea.....	60
6.5.5. Síntesis de carbono orgánico.	60
6.6. CONSIDERACIONES TÉCNICAS, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES..	60
6.6.1. CONSIDERACIONES TÉCNICAS.	60

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

6.6.2. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.....	61
6.6.3. CONSIDERACIONES AMBIENTALES.	62
CAPÍTULO 7. IMPACTO AMBIENTAL DEL CO ₂	63
7.1. EFECTO INVERNADERO Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	64
7.2. IMPACTO DEL CO ₂ EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS Y TERRESTRES.	68
7.2.1. ECOSISTEMAS MARINOS.....	68
7.2.2. ECOSISTEMAS TERRESTRES:.....	69
7.3. PERSPECTIVA FUTURA DEL IMPACTO DEL CO ₂ EN LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE.	70
7.3.1. IMPACTO EN LA SALUD HUMANA.	70
7.3.2. IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE.....	71
7.4. MEDIDAD DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN.	73
7.5. EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS E IMPACTO AMBIENTAL DE LA CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO ₂	73
7.5.1. Riesgos del almacenamiento geológico.	73
7.5.2. Riesgos del almacenamiento oceánico:	74
CAPÍTULO 8. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN SOBRE CCS.....	75
8.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PROYECTOS DE CCS EN ESPAÑA Y CANARIAS.....	76
8.1.1. PROYECTO CASTOR.	76
8.1.2. PROYECTO TOSCA.....	76
8.2. ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS EN LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE CCS.	77
8.2.1. AVANCES EN TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO ₂	77
8.2.2. DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO.....	78
8.2.3. INTEGRACIÓN CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE.	79
8.2.4. EVALUACION DE ALTERNATIVAS DE CAPTURA.....	80
8.3. MARCO REGULATORIO Y POLÍTICAS DE APOYO.	82
8.4. INVESTIGACION EN NUEVOS USOS Y APLICACIONES DEL CO ₂	83
CAPÍTULO 9. PERSPECTIVAS PARA EL USO DE CCS EN CANARIAS.....	85
9.1. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES HALLAZGOS.	86
9.2. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CCS EN CANARIAS.....	87

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES.....	90
10.1. CONCLUSIONES.....	91
10.2. CONCLUSIONS.....	93
CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Configuraciones de los sistemas de captura (Fuente: Gutiérrez Bravo, J y otros, 2012).....	19
Figura 2. Proyecto Sleipner field (Mar del Norte, Noruega) (Fuente: PTECO2).	23
Figura 3. Proyecto Gorgon de Chevron en la isla de Barrow (Fuente: El periódico de la energía, 2016).....	24
Figura 4. Central eléctrica de Boundary Dam (Fuente: Energy Procedia, 2014).	24
Figura 5. Proyecto Petra Nova (Fuente: Departamento de Energía).....	25
Figura 7. Diagrama simplificado de una central térmica de oxidación para la captura de CO ₂ (Fuente: Cámara, Á.).....	46
Figura 8. Diagrama de fases de CO ₂ (Fuente: Cedrón, Landa & Robles, 2018).	47
Figura 9. Métodos para almacenar CO ₂ en formaciones geológicas subterráneas profundas (Fuente: Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).	51
Figura 10. La plataforma de petróleo y gas que ahora almacena carbono en el yacimiento de Nini West, cerca de Esbjerg (Dinamarca) (Fuente: CincoDías). 52	
Figura 11. Esquema del proyecto de CCS Greensand (Dinamarca) (Fuente: CincoDías).....	53
Figura 12. Métodos de almacenamiento oceánico (Fuente: Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).	57
Figura 13. Esquema del proceso de la producción de metanol bajo en emisiones (Fuente: ABC).	59
Figura 14. Países con mayor riesgo climático (Fuente: Germanwatch).	68
Figura 15. El antes y después del Lago Urmia, Irán (Fuente: Zahumenszky, C, 2017)	70
Figura 16. Aumento del nivel del mar (Fuente: Revistapetlovers).	72
Figura 17. Estimación del incremento del nivel del mar (Fuente: Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).	72

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

Figura 18. Análisis de riesgo de un almacenamiento geológico de CO ₂ (Fuente: Abós García, y otros, 2012).....	74
Figura 19. Captura y almacenamiento de CO ₂ de las centrales eléctricas (Fuente: Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).	80

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 1. Evolución de las emisiones de CO ₂ en el mundo (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).....	32
Gráfica 2. Evolución en las emisiones globales de CO ₂ según su origen (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).	33
Gráfica 3. Evolución en las emisiones de CO ₂ procedentes de combustibles fósiles en el conjunto de la Unión Europea (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).....	34
Gráfica 4. Emisiones de CO ₂ procedentes de combustibles fósiles en la Unión Europea en 2020 y 2019 (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es). ...	35
Gráfica 5. Emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea por actividad (Fuente: Eurostat, www.epdata.es)..	36
Gráfica 6. Evolución de las emisiones de CO ₂ en España (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).....	37
Gráfico 7. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España por actividad (Fuente: INE, www.epdata.es).	38
Gráfica 8. Evolución de las emisiones de GEI totales en Canarias (Fuente: Anuario Energético de Canarias).	39
Gráfica 9. Aumento de la concentración de CO ₂ en la atmósfera (Observatorio de Izaña, Tenerife) (Fuente: AEMET, www.epdata.es).	40
Gráfica 10. Variación de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1984 (Fuente: IMM, www.epdata.es).....	64
Gráfica 11. Incremento de la temperatura global (Fuente: Copernicus, www.epdata.es).....	65
Gráfica 12. Variación estimada de la temperatura en superficie a escala mundial por encima de los niveles de referencia de 1979-2022 (Fuente: Copernicus, www.epdata.es).....	66
Gráfica 13. Muertes prematuras debidas a emisiones de carbón por comunidades autónomas (Fuente: IIDMA, www.epdata.es).....	67

CAPÍTULO 1. RESUMEN

1.1. RESUMEN.

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio de las tecnologías de almacenamiento y captura de CO₂ (CCS) como herramientas fundamentales para la descarbonización y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Se analiza el impacto del CO₂ emitido en la atmósfera y su contribución al cambio climático. Se destaca la necesidad de abordar este problema global mediante la implementación de estrategias de mitigación.

Luego, se explora en detalle la tecnología de CCS, que se basa en la captura del CO₂ emitido por fuentes industriales y su posterior almacenamiento de forma segura a largo plazo. Se presentan diferentes técnicas de captura, como la postcombustión, la precombustión y la captura directa del aire, cada una con sus propias ventajas y desafíos.

En cuanto al almacenamiento, se examinan las opciones de almacenamiento geológico en formaciones subterráneas, como yacimientos de petróleo y gas agotados, acuíferos salinos profundos y capas de roca porosa. Se destacan los requisitos para la selección de formaciones geológicas adecuadas y los protocolos de monitoreo para garantizar la seguridad y evitar fugas de CO₂.

Además, se abordan las limitaciones y desafíos asociados a la implementación de la tecnología de CCS, como los altos costos, el consumo adicional de energía y los riesgos ambientales y de seguridad. Se destaca la importancia de abordar estos desafíos para lograr una implementación efectiva y sostenible de las tecnologías de CCS.

Finalmente, se resalta el papel crucial de las tecnologías de almacenamiento y captura de CO₂ en la descarbonización y la transición hacia una economía baja en carbono. Se enfatiza la necesidad de políticas y marcos regulatorios favorables, así como la colaboración entre los sectores público y privado, para promover la investigación, el desarrollo y la implementación de estas tecnologías.

1.2. ABSTRACT.

This Final Degree Project focuses on the study of CO₂ storage and capture (CCS) technologies as fundamental tools for decarbonization and reduction of greenhouse gas emissions.

The impact of CO₂ emitted in the atmosphere and its contribution to climate change is analyzed. It highlights the need to address this global problem by implementing mitigation strategies.

CCS technology is then explored in detail, which is based on capturing CO₂ emitted from industrial sources and subsequently storing it safely over the long term. Different capture techniques are presented, such as afterburner, pre-combustion, and direct air capture, each with its own advantages and challenges.

In terms of storage, geological storage options are examined in underground formations, such as depleted oil and gas reservoirs, deep saline aquifers, and porous rock layers. Requirements for the selection of suitable geological formations and monitoring protocols to ensure safety and prevent CO₂ leakage are highlighted.

In addition, the limitations and challenges associated with the implementation of CCS technology are addressed, such as high costs, additional energy consumption, and environmental and safety risks. It highlights the importance of addressing these challenges to achieve effective and sustainable implementation of CCS technologies.

Finally, the crucial role of CO₂ storage and capture technologies in decarbonization and the transition to a low-carbon economy is highlighted. It emphasizes the need for favorable policies and regulatory frameworks, as well as collaboration between the public and private sectors, to promote research, development, and implementation of these technologies.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN.

2.1. PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.

La problemática de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y su impacto en el cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad. Las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles en la generación de energía y el transporte han llevado a un aumento significativo en la concentración de CO₂ en la atmósfera, lo que ha contribuido al calentamiento global y a los cambios en los patrones climáticos. La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ y limitar el aumento de la temperatura global ha llevado a la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles, entre las cuales las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CCS, por sus siglas en inglés) han surgido como una opción prometedora.

La motivación de este estudio radica en la urgencia de abordar el problema del cambio climático y la necesidad de descarbonizar la economía mundial. El Acuerdo de París, adoptado en 2015, establece el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 grados Celsius con respecto a los niveles preindustriales, y se reconoce la importancia de reducir las emisiones de CO₂ como parte fundamental de este esfuerzo. En este trabajo, se pretende hacer un estudio bibliográfico de recopilación, análisis y síntesis de información sobre las diferentes tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂, así como de las diferentes vías de aprovechamiento de ese dióxido de carbono como materia prima para la fabricación de otros productos. Esto juega un papel crucial a la hora de ofrecer una forma de mitigar las emisiones de CO₂ a gran escala.

2.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.

El objetivo principal de esta investigación es realizar un estudio del arte donde se exploren y analicen las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ como vía hacia la descarbonización. Se busca examinar en detalle los procedimientos y enfoques utilizados en la captura y almacenamiento de CO₂, así, como evaluar su eficacia, viabilidad técnica, ambiental y económica. Además, se pretende identificar los desafíos y barreras asociadas con la implementación de estas tecnologías, tanto a nivel global, como en el contexto específico de España y las Islas Canarias. El estudio también tiene como objetivo proponer recomendaciones y estrategias para promover la adopción y el despliegue efectivo de las tecnologías CCS. Así como, posibles aprovechamientos del CO₂ como materia prima.

2.3 METODOLOGÍA Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.

La metodología utilizada en esta investigación consistirá en la revisión bibliográfica y el análisis crítico de los datos obtenidos. Se consultará una amplia variedad de fuentes, incluyendo artículos científicos, informes de organizaciones internacionales y gubernamentales, noticias y documentos de políticas públicas. Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura disponible sobre las

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

tecnologías de CCS, incluyendo sus alcances, limitaciones y desafíos. Además, se analizarán los proyectos de CCS existentes en todo el mundo, evaluando su impacto ambiental y social, su viabilidad técnica y económica y su relevancia en el contexto de la descarbonización.

Las limitaciones de este estudio se relacionan, principalmente, con la disponibilidad de información sobre los proyectos de CCS, ya que, algunos de ellos pueden no estar bien documentados o no estar accesibles públicamente debido a razones de confidencialidad. Además, es posible que existan diferencias entre los datos reportados por diferentes fuentes, lo que puede afectar la comparabilidad y la precisión de los resultados obtenidos. Sin embargo, se harán todos los esfuerzos posibles para garantizar la calidad y la fiabilidad de los datos utilizados en este estudio.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.

3.1. DEFICIÓN DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂.

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CCS) es un conjunto de tecnologías y procesos diseñados para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera y su posterior almacenamiento a largo plazo. La captura de CO₂ implica la separación y recolección del gas emitido por fuentes industriales o de combustión, evitando su liberación a la atmósfera. El almacenamiento de CO₂ implica su transporte y su confinamiento seguro en formaciones geológicas subterráneas o en otros medios adecuados.

3.2. IMACTO DEL CO₂ EN EL MEDIO AMBIENTE Y EN LA SALUD.

El dióxido de carbono es uno de los principales gases de efecto invernadero emitidos por actividades humanas, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático. Las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera se ha relacionado con el aumento de la temperatura media del planeta, provocando eventos climáticos extremos, la acidificación de los océanos, el aumento del nivel del mar y la pérdida de biodiversidad. Además, la exposición a niveles elevados de CO₂ puede ser perjudicial para la salud humana causando síntomas como dolor de cabeza, mareo y fatiga.

3.3. POLÍTICAS Y ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

3.3.1 Acuerdo de París y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

El Acuerdo de París es un tratado internacional firmado en 2015 por los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales, y si es posible, a 1,5°C. El acuerdo también busca fortalecer la capacidad de adaptación de los países y movilizar financiamiento para apoyar la mitigación y adaptación al cambio climático.

El Acuerdo de París establece una serie de compromisos y acciones para lograr estos objetivos. Uno de los aspectos clave es la reducción de las emisiones de GEI que contribuyen al calentamiento global. Los países signatarios se comprometen a establecer metas nacionales de reducción de emisiones, conocidas como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), y a informar regularmente sobre sus avances.

El Acuerdo de París reconoce la importancia de la cooperación internacional para alcanzar estos objetivos. Se establece un marco para la financiación climática, que incluye la movilización de fondos para apoyar a los países en desarrollo en la implementación de medidas de mitigación y adaptación. También se

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

promueve la transferencia de tecnologías y la creación de capacidades para facilitar la adopción de tecnologías limpias y sostenibles.

La implementación del Acuerdo de París implica la adopción de políticas y medidas a nivel nacional, así como la colaboración entre los gobiernos, el sector privado, la sociedad civil y otros actores relevantes. Se alienta la colaboración en áreas como la investigación y el desarrollo de tecnologías bajas en carbono, la promoción de energías renovables, la eficiencia energética y la gestión sostenible de los bosques.

El Acuerdo de París ha sido ratificado por la mayoría de los países y ha impulsado un mayor compromiso global para abordar el cambio climático. Sin embargo, también enfrenta desafíos, como la necesidad de aumentar la ambición de las metas de reducción de emisiones y garantizar la implementación efectiva de las acciones propuestas (Acuerdo de París, 2015).

3.3.2. COP26.

La COP26 hace referencia a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en 2021. Esta conferencia es la 26ª reunión de las Partes y tuvo lugar en Glasgow. Después de dos años sin poder celebrarse de manera presencial debido a la pandemia, la COP26 abordó los temas pendientes de la agenda prevista para 2020 y 2021, con el objetivo de minimizar el retraso en el proceso de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

El 13 de noviembre de 2021, la COP26 concluyó con la adopción del Pacto Climático de Glasgow. En este pacto, todos los países acordaron mantener el objetivo de limitar el calentamiento global a 1,5°C y finalizar los aspectos pendientes del Acuerdo de París. Las decisiones tomadas en la COP26 se basaron en los tres tratados climáticos de la ONU: la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP), el Protocolo de Kioto (CMP) y el Acuerdo de París (CMA).

Los resultados de la COP26 se pueden resumir en los siguientes aspectos (COP26, 2022):

- Mitigación:

- Compromiso de lograr emisiones netas cero (net-zero): más del 90% del PIB mundial está cubierto por compromisos de emisiones netas cero.
- 153 países presentaron nuevos objetivos de reducción de emisiones para 2030 (NDC, por sus siglas en inglés).

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- Se impulsaron compromisos para reducir el uso de energía a base de carbón, detener la deforestación, disminuir las emisiones de metano y acelerar la transición a vehículos eléctricos.
- **Adaptación, pérdidas y daños:**

Se han aumentado los esfuerzos para hacer frente a los impactos climáticos:

 - Actualmente, 80 países están cubiertos por Comunicaciones de Adaptación o Planes Nacionales de Adaptación para aumentar la preparación ante los riesgos climáticos.
 - Se ha acordado *The Glasgow - Sharm el - Sheikh Work Programme* sobre el objetivo global de adaptación. El cual impulsará las acciones de adaptación.
 - Se han comprometido unas cantidades de financiación sin precedentes de fondos de adaptación, que incluyeron el compromiso de duplicar para 2025 los niveles de adaptación registrados en 2019.
- **Finanzas:**
 - Los países desarrollados han avanzado hacia el objetivo de financiamiento climático de 100 mil millones de dólares, meta que deberán alcanzar este año 2023.
 - 34 países y 5 instituciones financieras públicas dejarán de suministrar apoyo internacional al sector de energía a base de combustibles fósiles sin limitación de emisiones.
 - Los países desarrollados se han comprometido a una financiación significativamente mayor a fondos vitales como el Fondo para los Países Menos Adelantados.
- **Colaboración:**
 - Los Avances de Glasgow acelerarán la colaboración entre gobiernos, empresas y la sociedad para lograr los objetivos climáticos con mayor rapidez.
 - Los consejos colaborativos y los diálogos sobre energía, vehículos eléctricos, transporte y productos básicos ayudarán a cumplir los compromisos.
 - En la COP26 se ha finalizado el Reglamento de París, acordado el “Marco de Transparencia Mejorados” (informes comunes de emisiones y apoyo), un nuevo mecanismo y estándares para los mercados internacionales de carbono y unos plazos comunes para los objetivos de reducción de emisiones.

3.4. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂.

Existen varios tipos de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ que se utilizan para mitigar las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Estos métodos son fundamentales para lograr la reducción de gases de efecto invernadero y avanzar hacia la descarbonización. A continuación, se describen los principales tipos de tecnologías de CCS:

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- **Tecnologías de poscombustión:** Estas tecnologías se utilizan cuando se captura el CO₂ de los gases finales generados en procesos industriales, ya sea para la producción de calor, energía o transformación de materias primas. En esta etapa, el CO₂ se separa de los gases generados.
- **Tecnologías de precombustión:** Las tecnologías de precombustión se aplican después de la gasificación de combustibles sólidos. En esta etapa, se separa el CO₂ del hidrógeno, que es el combustible final que se quiere generar en este proceso para usarlo en calderas, turbinas, etc.
- **Tecnologías de oxicomcombustión:** En las tecnologías de oxicomcombustión, se reemplaza el aire comburente convencional por oxígeno de alta pureza o aire altamente enriquecido en oxígeno. Esto produce una corriente de gases con una alta concentración de CO₂, facilitando el confinamiento.

En la Figura 1 se muestra la configuración de los tipos de captura y almacenamiento de CO₂ que se han descrito.

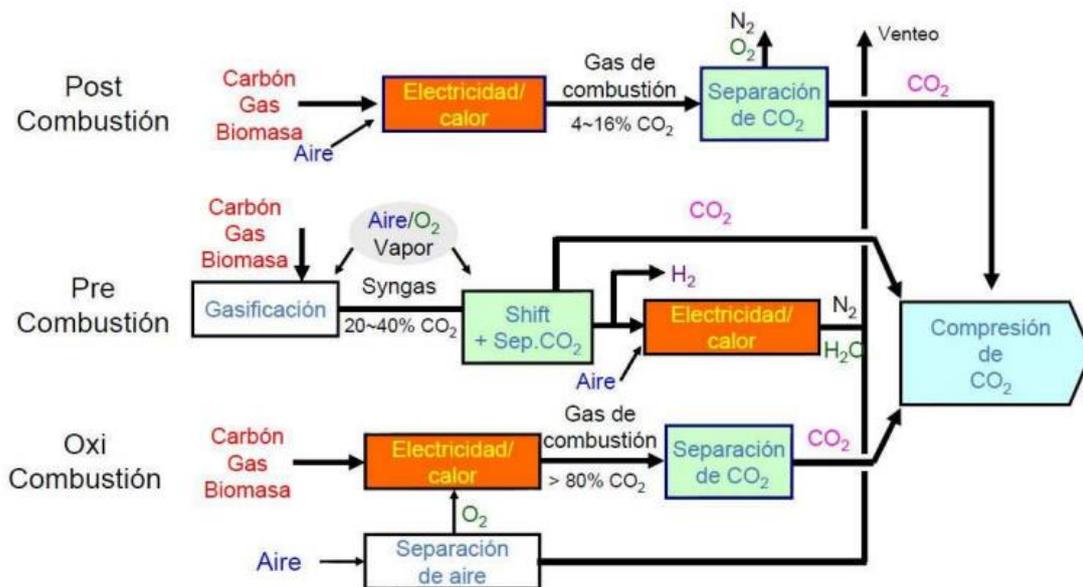


Figura 1. Configuraciones de los sistemas de captura (Fuente: Gutiérrez Bravo, J y otros, 2012).

Estas tecnologías son fundamentales en el proceso de captura y almacenamiento de CO₂, ya que permiten separar y concentrar el CO₂ generado en los procesos industriales para su posterior almacenamiento o utilización. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias ventajas y consideraciones técnicas, económicas y ambientales, y su elección depende de las características específicas de cada proceso industrial.

En cualquiera de las tres opciones de captura de CO₂, es necesario separar un componente específico de una mezcla gaseosa que puede ser CO₂ del gas de proceso, O₂ del aire o ambos. Este proceso de separación requiere una considerable cantidad de energía, especialmente cuando el CO₂ se encuentra

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

diluido en la mezcla, lo que hace que la etapa de captura sea la más costosa de toda la cadena.

La selección de la tecnología de captura más adecuada para cada tipo de fuente de emisión depende de varios factores. Es necesario caracterizar la corriente gaseosa a tratar en función de su ubicación en el proceso, la concentración de CO₂ y el destino de la corriente resultante, ya sea almacenamiento o uso posterior. A nivel internacional, no hay un acuerdo claro sobre la clasificación de las fuentes de emisión. Sin embargo, el *Centre for Low Carbon Futures* ha propuesto una clasificación basada en el impacto de la concentración de CO₂ en el consumo energético del proceso de captura y, por lo tanto, en los costos de separación de CO₂. Esta clasificación distingue cuatro categorías: muy alta (>90%), alta (50-90%), moderada (20-50%) y baja (<20%).

- **Usos del CO₂:** además del almacenamiento geológico, el CO₂ capturado puede ser utilizado como materia prima en diversas aplicaciones industriales.

En cuanto a las tecnologías de almacenamiento de CO₂, aparte del almacenamiento geológico, también se encuentra el almacenamiento en el subsuelo y el almacenamiento en acuíferos.

3.5. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE CCS.

Las tecnologías de CCS tienen un alcance significativo en la reducción de las emisiones de CO₂ y en el camino hacia la descarbonización. Sin embargo, también presentan ciertas limitaciones y desafíos que deben tenerse en cuenta (Global 2021).

Alcance de las tecnologías de CCS:

1. **Reducción de emisiones.** Las tecnologías de CCS tienen el potencial de reducir las emisiones de CO₂ en una amplia gama de sectores, como la generación de energía, la industria y el transporte.
2. **Descarbonización de sectores difíciles de electrificar.** Pueden ser una solución para sectores que son difíciles de electrificar completamente, como la industria petroquímica, mineras (industria pesada) y los procesos de producción de alta temperatura.
3. **Compensación de emisiones existentes.** Estas tecnologías pueden ayudar a compensar las emisiones existentes al capturar y almacenar CO₂ emitido por fuentes industriales y de combustión.

Limitaciones de las tecnologías de CCS:

1. **Costo.** La implementación de las tecnologías de CCS puede ser costosa, tanto en términos de captura y almacenamiento de CO₂ como en infraestructuras asociadas, lo que puede ser una barrera para su adopción a gran escala.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

2. **Consumo de energía adicional.** Requieren una cantidad significativa de energía para capturar, transportar y almacenar el CO₂, lo que puede afectar la eficiencia general de los procesos y aumentar la demanda de recursos energéticos.
3. **Disponibilidad de almacenamiento geológico.** La efectividad de las CCS depende de la disponibilidad de formaciones geológicas adecuadas para el almacenamiento seguro y a largo plazo del CO₂. Estas formaciones deben ser lo suficientemente porosas y permeables para permitir la inyección y confinamiento del CO₂.
4. **Riesgos ambientales y seguridad.** Existen preocupaciones sobre la integridad y la seguridad a largo plazo de las instalaciones de almacenamiento geológico, así como la posibilidad de fugas de CO₂ hacia la superficie o impactos en los recursos hídricos subterráneos.

Es importante considerar tanto el alcance como las limitaciones de las tecnologías de CCS al evaluar su viabilidad y potencial impacto en la reducción de las emisiones de CO₂. Cada proyecto debe ser evaluado caso por caso, teniendo en cuenta los aspectos económicos, técnicos, ambientales y de seguridad.

CAPÍTULO 4. ESTADO DEL ARTE.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES PROYECTOS DE CCS EN EL MUNDO.

En los últimos años, se han llevado a cabo numerosos proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ en diferentes partes del mundo, con el objetivo de reducir las emisiones de GEI y mitigar el cambio climático. Estos proyectos han demostrado ser fundamentales para explorar soluciones a largo plazo para la descarbonización. A continuación, se describen algunos de los principales proyectos de CCS que han sido destacados a nivel mundial.

4.1.1. Proyecto Sleipner field

Es uno de los proyectos de CCS más antiguos y exitosos del mundo, ubicado en el Mar del Norte, frente a la costa de Noruega, como se observa en la Figura 2. Es operado por Equinor (anteriormente conocido como Statoil) y se centra en la captura y almacenamiento de CO₂ producido durante la extracción de gas natural y se inyecta en un acuífero salino a aproximadamente 1.000 metros por debajo del lecho marino. Desde su inicio en 1996, este proyecto ha evitado la emisión de millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera (PTECO2).



Figura 2. Proyecto Sleipner field (Mar del Norte, Noruega) (Fuente: PTECO2).

4.1.2. Proyecto Gorgon.

Situado en la isla de Barrow, en Australia Occidental, como se muestra en la Figura 3, es uno de los proyectos de CCS más grandes del mundo. Es una colaboración entre Chevron, ExxonMobil y Shell. El objetivo del proyecto es capturar y almacenar el CO₂ generado durante la producción de gas natural en el campo de gas de Gorgon. Utiliza tecnología de captura en la fuente y el CO₂ capturado se comprime y se inyecta en un acuífero salino a aproximadamente 2.000 metros bajo el lecho marino. Este proyecto ha sido un hito importante en el desarrollo de la tecnología de CCS y tiene por objetivo reducir significativamente las emisiones de CO₂ de la producción de gas natural, teniendo una capacidad de captura que se encuentra entre 3,4 y 4 Mt CO₂/año (El periódico de la energía, 2016).

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.



Figura 3. Proyecto Gorgon de Chevron en la isla de Barrow (Fuente: El periódico de la energía, 2016).

4.1.3. Proyecto Boundary Dam.

Ubicado en Saskatchewan, Canadá, el proyecto Boundary Dam (Figura 4) se enfoca en la captura de CO₂ de los gases de escape de una planta de energía a base de carbón. Utiliza tecnología de captura postcombustión, donde los gases de escape se tratan con un solvente para capturar el CO₂. El dióxido de carbono capturado se comprime y se transporta a través de un gasoducto para su almacenamiento en un acuífero profundo subterráneo. El proyecto Boundary Dam, que comenzó en 2014, es considerado uno de los primeros proyectos comerciales de captura de CO₂ en plantas de energía a base de carbón y ha demostrado la viabilidad de esta tecnología en aplicaciones industriales, con una capacidad de 110 MW (Energy Procedia, 2014 y Jones y Lawson, 2022)).

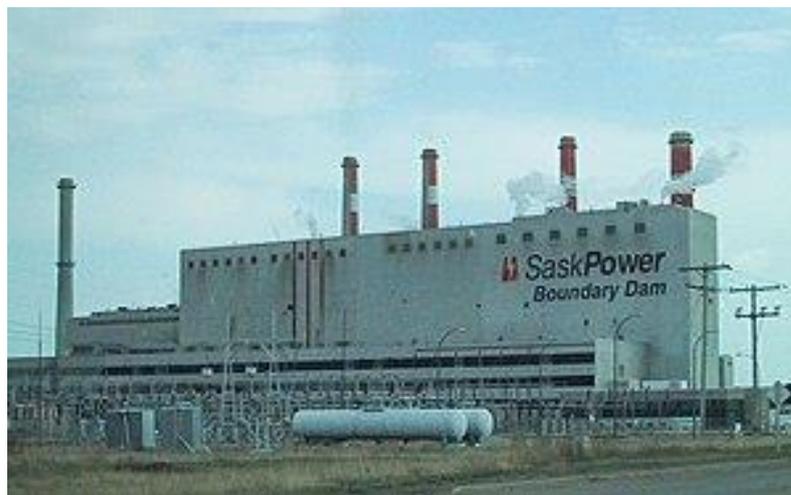


Figura 4. Central eléctrica de Boundary Dam (Fuente: Energy Procedia, 2014).

4.1.4. Proyecto Petra Nova.

Ubicado en Texas, Estados Unidos, este proyecto se centra en la captura de CO₂ de los gases de escape de una planta de energía a base de carbón (Figura 5). Utiliza la tecnología de captura de postcombustión empleando un solvente químico para separar el CO₂ de los gases de escape. El CO₂ capturado se comprime y se transporta a través de un gasoducto para su uso en aplicaciones de recuperación mejorada de petróleo en campos petroleros cercanos. El proyecto Petra Nova, que comenzó en 2017, tiene una capacidad de captura de 1,6 millones de toneladas de CO₂ anuales y ha demostrado la viabilidad técnica y económica de la captura de CO₂ en plantas de energía a base de carbón y su utilización en aplicaciones adicionales (Departamento de energía y Jones y Lawson, 2022).



Figura 5. Proyecto Petra Nova (Fuente: Departamento de Energía).

Estos proyectos representan ejemplos destacados de la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ a nivel mundial. Han demostrado avances significativos en la aplicación comercial de CCS y han contribuido a la reducción de las emisiones de CO₂ en sus respectivas regiones. Cada proyecto ha enfrentado desafíos únicos en términos de tecnología, financiamiento y marco regulatorio, pero han demostrado el potencial de las tecnologías de CCS como una vía hacia la descarbonización y la mitigación del cambio climático.

4.2. INVERSIÓN Y FINANCIAMIENTO DE PROYECTOS DE CCS.

La implementación de proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ (CCS) requiere una inversión sustancial debido a la complejidad y los altos costos asociados con la tecnología. En esta sección, se explorarán en detalle los diferentes modelos de financiamiento utilizados y las iniciativas destacadas en el campo de CCS.

4.2.1. Inversiones privadas:

Las inversiones privadas juegan un papel importante en la financiación de proyectos de CCS. Empresas energéticas, compañías involucradas en la reducción de emisiones y fondos de inversión privados son algunos de los actores que destinan capital a proyectos de CCS. Estas inversiones se realizan con el objeto de obtener retornos financieros a largo plazo y contribuir a la sostenibilidad ambiental. Las empresas petroleras y gasíferas a menudo invierten en proyectos de CCS como parte de su estrategia para reducir su huella de carbono y cumplir con los objetivos climáticos. Además, los inversores privados interesados en la mitigación del cambio climático pueden encontrar oportunidades de inversión en proyectos de CCS que ofrecen retornos financieros atractivos.

4.2.2. Fondos públicos:

Los gobiernos y las agencias gubernamentales desempeñan un papel fundamental en el financiamiento de proyectos de CCS. Estos fondos públicos se utilizan para apoyar la investigación y el desarrollo de tecnologías de CCS, así como para financiar proyectos piloto y demostrativos. Los fondos públicos pueden provenir de presupuestos nacionales asignados a la mitigación del cambio climático y la transición energética. Además, algunos países han establecido fondos de carbono o mecanismos de comercio de emisiones que generan ingresos a través de la reducción de emisiones de CO₂. Estos ingresos se reinvierten en proyectos de CCS para acelerar su implementación. Asimismo, los programas de financiamiento climático internacionales, como el Fondo Verde para el Clima, proporcionan recursos financieros para proyectos de CCS en países en desarrollo.

4.2.3. Colaboraciones público-privadas:

Las colaboraciones público-privadas desempeñan un papel importante en la financiación de proyectos de CCS. Estas asociaciones permiten compartir los riesgos financieros y tecnológicos entre los sectores público y privado, facilitando así la implementación de proyectos de gran envergadura. A través de estas colaboraciones, se pueden establecer fondos conjuntos en los que los gobiernos y las empresas privadas aportan capital para financiar proyectos de CCS. Además, los gobiernos pueden proporcionar incentivos fiscales y regulatorios para fomentar la participación del sector privado en la financiación de proyectos de CCS.

4.2.4. Iniciativas de financiamiento específicas:

Existen varias iniciativas de financiamiento específicas destinadas a impulsar el desarrollo de proyectos de CCS, por ejemplo, el Fondo Europeo para Inversiones Estratégicas (FEIE) establecido por la Unión Europea ofrece apoyo financiero y apoyo técnico a proyectos de CCS en el país. Además, algunas instituciones financieras internacionales y bancos de desarrollo tienen programas y líneas de

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

crédito dedicadas a proyectos de energía limpia y mitigación del cambio climático, lo que incluye financiamiento para proyectos de CCS.

La financiación de proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ es fundamental para su implementación a gran escala. Los modelos de financiamiento mencionados, como las inversiones privadas, los fondos públicos y las colaboraciones público-privadas, permiten asegurar los recursos necesarios para el desarrollo y la operación de proyectos de CCS. Las iniciativas de financiamiento específicas complementan estos modelos al proporcionar apoyo adicional y promover la inversión en proyectos de CCS. A medida que la conciencia sobre la importancia de la descarbonización aumenta, es probable que se destinen mayores recursos financieros a los proyectos de CCS, impulsando así su desarrollo y construyendo a la reducción de las emisiones de CO₂ (The New Climate Economy, 2018).

4.3. PROGRAMAS E INICIATIVAS A NIVEL MUNDIAL.

- **Fondo Verde para el Clima (GCF).** Es un mecanismo financiero establecido bajo la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Proporciona financiamiento para proyectos de mitigación y adaptación al cambio climático en países en desarrollo. Los proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ pueden acceder a financiamiento a través de este fondo para promover su implementación a nivel mundial (United Nations).
- **Iniciativa Internacional de Captura de Carbono (GCCSI).** Organización global que tiene como objetivo acelerar la implementación de proyectos de captura y almacenamiento de carbono. Colabora con gobiernos, empresas y otras partes interesadas para facilitar el desarrollo de proyectos de CCS y brindar orientación técnica y apoyo financiero (CONAMA, 2020).
- **Banco Mundial.** El Grupo del Banco Mundial ha establecido programas de financiamiento para proyectos de CCS en países en desarrollo. Estos programas se centran en reducir las emisiones de carbono y apoyar la transición hacia una economía baja en carbono. A través de préstamos y asistencia técnica, el Banco Mundial brinda apoyo financiero para la implementación de proyectos de CCS (AIF).

4.4. PROGRAMAS E INICIATIVAS EN EUROPA.

- **Programa de Innovación y Tecnología de la Unión Europea (Horizonte Europa).** Horizonte Europa es el principal programa de financiamiento de investigación e innovación de la Unión Europea (UE). A través de este programa, se ofrecen oportunidades de financiamiento para proyectos de CCS que contribuyen a los objetivos de descarbonización de Europa. Los proyectos de CCS pueden recibir financiamiento para la

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

investigación, desarrollo y demostración de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂.

- **Fondo de Innovación de la Unión Europea.** Este fondo se dedica a financiar proyectos de tecnología limpia, incluyendo tecnologías de CCS. Está destinado a apoyar la etapa de demostración y despliegue comercial de proyectos innovadores de CCS. A través de este fondo, se brinda financiamiento para proyectos que demuestren la viabilidad técnica y económica de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂.
- **Plan de Recuperación y Resiliencia de la Unión Europea.** Como parte de la respuesta de la UE a la crisis de COVID-19, se han destinado fondos para impulsar la recuperación económica y la transición ecológica. Estos fondos se utilizan para financiar proyectos relacionados con la descarbonización, incluyendo inversiones en tecnologías de CCS. Los países de la UES, incluyendo España, pueden acceder a estos fondos para promover la implementación de proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ (**Comisión Europea**).

4.5. PROGRAMAS E INICIATIVAS EN ESPAÑA Y CANARIAS.

- **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC).** Es el plan estratégico de España para la transición energética y la lucha contra el cambio climático. En este plan se contemplan inversiones en tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ como parte de los esfuerzos para reducir las emisiones de CO₂. Se asignan recursos financieros para apoyar la implementación de proyectos de CCS y promover su desarrollo en el país (La Moncloa).
- **Fondos Europeos para la Recuperación.** España ha recibido financiamiento a través de los fondos de recuperación de la UE, conocidos como *Next Generation EU*, para impulsar la recuperación económica y la transición ecológica. Estos fondos se utilizan para financiar proyectos de CCS y otras iniciativas relacionadas con la sostenibilidad y la descarbonización. Los proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ pueden acceder a estos fondos para su desarrollo y ejecución (Comisión Europea).
- **Estrategia Energética de Canarias 2030:** La Estrategia Energética de Canarias establece objetivos de descarbonización para la región y promueve la implementación de tecnologías limpias, incluyendo la captura y almacenamiento de CO₂. Dentro de esta estrategia se contemplan medidas y programas de financiamiento para impulsar el desarrollo de proyectos de CCS en Canarias, reducir las emisiones de CO₂ y promover una economía más sostenible en la región (La Moncloa).

4.6. MARCO REGULATORIO Y POLÍTICO EN CCS.

El marco regulatorio y político desempeña un papel fundamental en la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂. Es necesario analizar de manera exhaustiva este marco para comprender las políticas y regulaciones que afectan el desarrollo de proyectos de CCS, así como para evaluar los desafíos y las oportunidades que surgen de él.

A nivel internacional, el Acuerdo de París (descrito dentro del capítulo de “Marco Teórico”) es un hito clave en la lucha contra el cambio climático y establece un marco regulatorio global para abordar las emisiones de gases de efecto invernadero, incluido el CO₂. El acuerdo busca limitar el calentamiento global a menos de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales y perseguir esfuerzos para limitarlo a 1,5 grados Celsius. Para lograr estos objetivos, el Acuerdo de París reconoce la importancia de las tecnologías de CCS como una herramienta para la mitigación de emisiones de CO₂ a gran escala (Acuerdo de París, 2015).

En la Unión Europea, se han implementado políticas y regulaciones específicas para fomentar el desarrollo de proyectos de CCS como parte de su estrategia de descarbonización. La Directiva sobre Captura y Almacenamiento Geológico de CO₂ establece un marco normativo para la autorización y supervisión de proyectos de CCS en el ámbito de la UE. Además, se han creado programas de financiamiento, como el Programa Horizonte 2020, para respaldar la investigación, el desarrollo y la demostración de tecnologías de CCS (Comisión Europea).

En el ámbito nacional, muchos países han desarrollado marcos regulatorios y políticas específicas para impulsar la implementación de proyectos de CCS. Estas políticas pueden incluir incentivos económicos, subsidios, esquemas de comercio de carbono y programas de financiamiento, entre otros. Además, los gobiernos establecen regulaciones relacionadas con la seguridad, el almacenamiento geológico, la captura de CO₂ y el transporte para garantizar la viabilidad y el cumplimiento de los proyectos de CCS.

En el caso de España, se han establecido planes y estrategias nacionales para promover la implementación de tecnologías de CCS. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) establece objetivos específicos de reducción de emisiones y promueve la adopción de tecnologías limpias, incluyendo el desarrollo de proyectos de CCS. Este plan establece una hoja de ruta para la descarbonización del sector energético y establece medidas y regulaciones para facilitar la implementación de proyectos de CCS en el país.

A pesar de los avances en el marco regulatorio y político, existen desafíos significativos que pueden obstaculizar la implementación de proyectos de CCS. Entre estos desafíos se incluyen:

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

1. **Complejidad regulatoria.** La implementación de proyectos de CCS implica cumplir con una serie de regulaciones y requisitos técnicos, lo que puede generar complejidad y retrasos en el proceso.
2. **Barreras financieras.** Los proyectos de CCS requieren una inversión considerable y la disponibilidad de financiamiento adecuado puede ser un desafío. La falta de incentivos financieros adecuados y la incertidumbre sobre los precios del carbono pueden dificultar la viabilidad económica de los proyectos.
3. **Aceptación social.** La implementación de proyectos de CCS puede encontrarse con resistencia y preocupaciones de la comunidad local y las partes interesadas. Es importante abordar estas preocupaciones y garantizar la participación pública y la transparencia en el proceso de toma de decisiones.
4. **Infraestructura y logística.** La captura y el transporte de grandes volúmenes de CO₂ requieren una infraestructura adecuada, como redes de transporte y almacenamiento geológico. La falta de infraestructura puede ser un obstáculo para la implementación de proyectos de CCS.

Para abordar estos desafíos y aprovechar las oportunidades, es fundamental que el marco regulatorio y político proporcione un entorno claro, estable y propicio para la implementación de proyectos de CCS. Esto implica la cooperación entre los sectores público y privado, la alineación de objetivos y políticas, la simplificación de los procesos regulatorios y la promoción de la inversión y la financiación adecuadas.

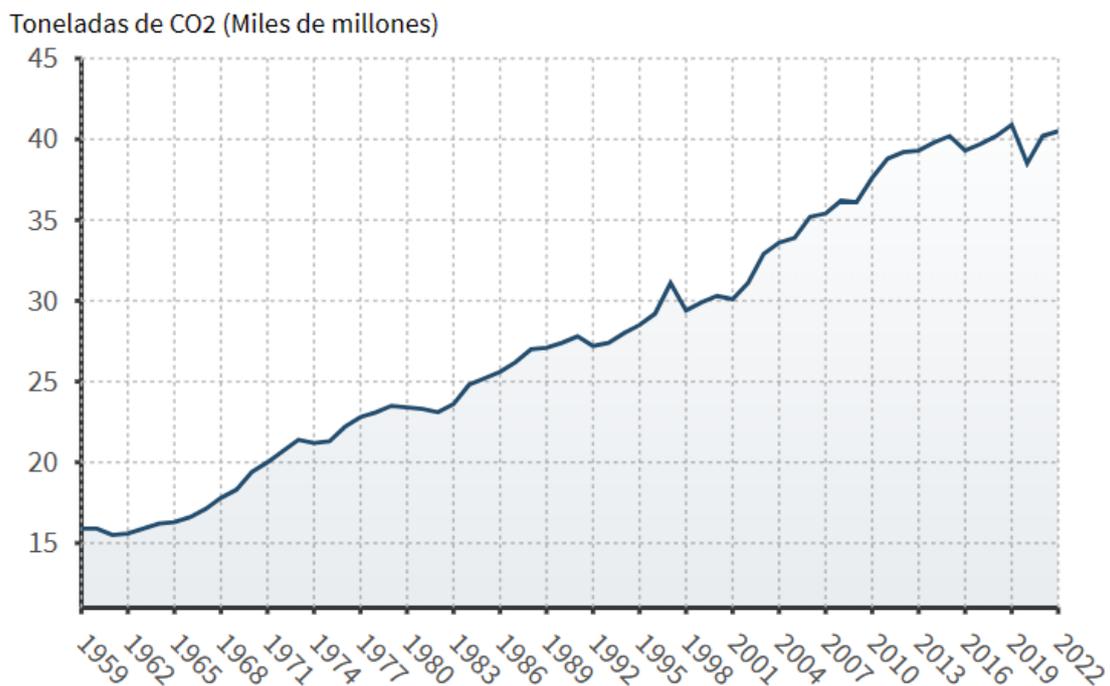
CAPÍTULO 5. EMISIONES DE CO₂ AL MEDIO AMBIENTE.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

El aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera es uno de los principales desafíos ambientales y uno de los principales contribuyentes al cambio climático. Por consiguiente, se analizarán las emisiones de CO₂ a nivel mundial, en Europa, España y, específicamente, en Canarias.

5.1. EMISIONES DE CO₂ A NIVEL MUNDIAL.

Las emisiones de CO₂ a nivel mundial han experimentado un aumento significativo en las últimas décadas debido al crecimiento económico, la industrialización y el consumo de combustibles fósiles. Estas emisiones contribuyen de manera significativa al calentamiento global y al cambio climático. A continuación, se presentan datos en las Gráficas 1 y 2 relevantes sobre las emisiones de CO₂ en el mundo.

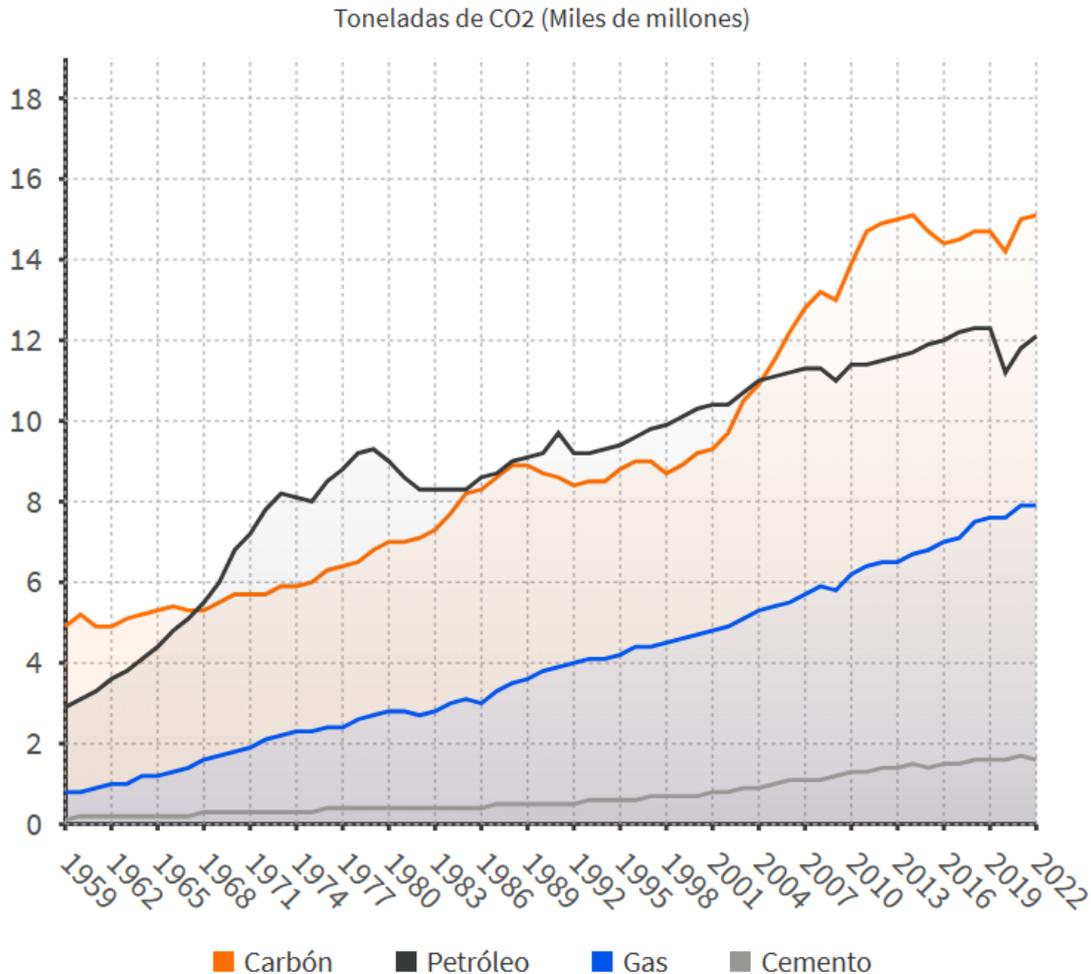


Gráfica 1. Evolución de las emisiones de CO₂ en el mundo (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).

Según los informes más recientes, las emisiones de CO₂ alcanzaron un aumento máximo histórico en 2021 con más de 2000 millones de toneladas como se observa en la Gráfica 1, su mayor aumento anual en términos absolutos y se debe principalmente a la recuperación de la economía mundial después de la crisis del COVID-19, representando el carbón más del 40% del crecimiento global. Esta tendencia ascendente refleja la continua dependencia de los combustibles fósiles en la generación de energía, el transporte, la industria y la deforestación a nivel mundial. La generación de energía a partir de combustibles

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

fósiles, como el carbón y el petróleo, representa una proporción significativa de las emisiones totales, como se observa en la Gráfica 2. Además, el sector del transporte, incluyendo la aviación y el transporte marítimo, también contribuyen considerablemente a las emisiones de CO₂.



Gráfica 2. Evolución en las emisiones globales de CO₂ según su origen (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).

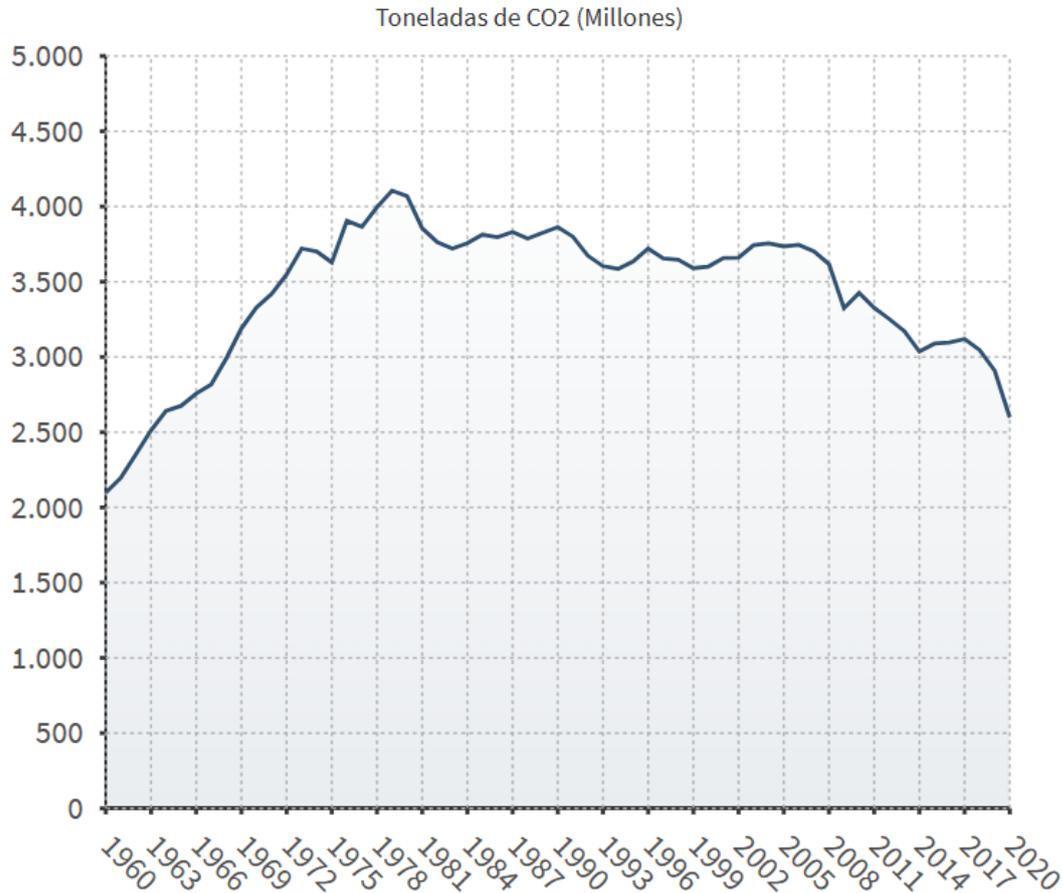
El aumento de las emisiones de CO₂ tiene consecuencias significativas en el cambio climático. El CO₂ y otros gases de efecto invernadero atrapan el calor en la atmósfera, lo que conduce al aumento de la temperatura global. Esto provoca efectos adversos como el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar, eventos climáticos extremos y la alteración de los ecosistemas.

5.2. EMISIONES DE CO₂ EN EUROPA.

Europa se ha destacado por tomar medidas significativas para abordar las emisiones de CO₂ y reducir su impacto en el cambio climático, en la Gráfica 3 se

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

muestra la evolución en las emisiones de CO₂ en la Unión Europea procedentes de la utilización de combustibles fósiles.

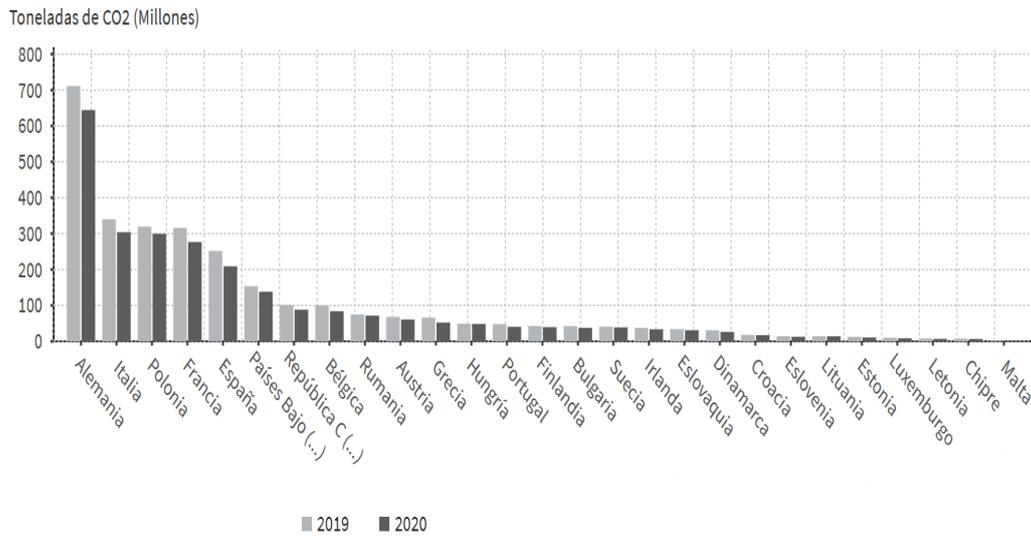


Gráfica 3. Evolución en las emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles en el conjunto de la Unión Europea (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).

En los últimos años como se observa en la Gráfica 3, las emisiones de CO₂ en Europa han demostrado un descenso, aunque aún se requiere un esfuerzo continuo para alcanzar los objetivos establecidos en el Acuerdo de París.

En la Gráfica 4 se presenta una comparación en las emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles en la Unión Europea para los años 2019 y 2020, se observa cómo disminuyó la cantidad de emisiones de CO₂ al disminuir el uso de combustibles fósiles durante la crisis del COVID-19.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.



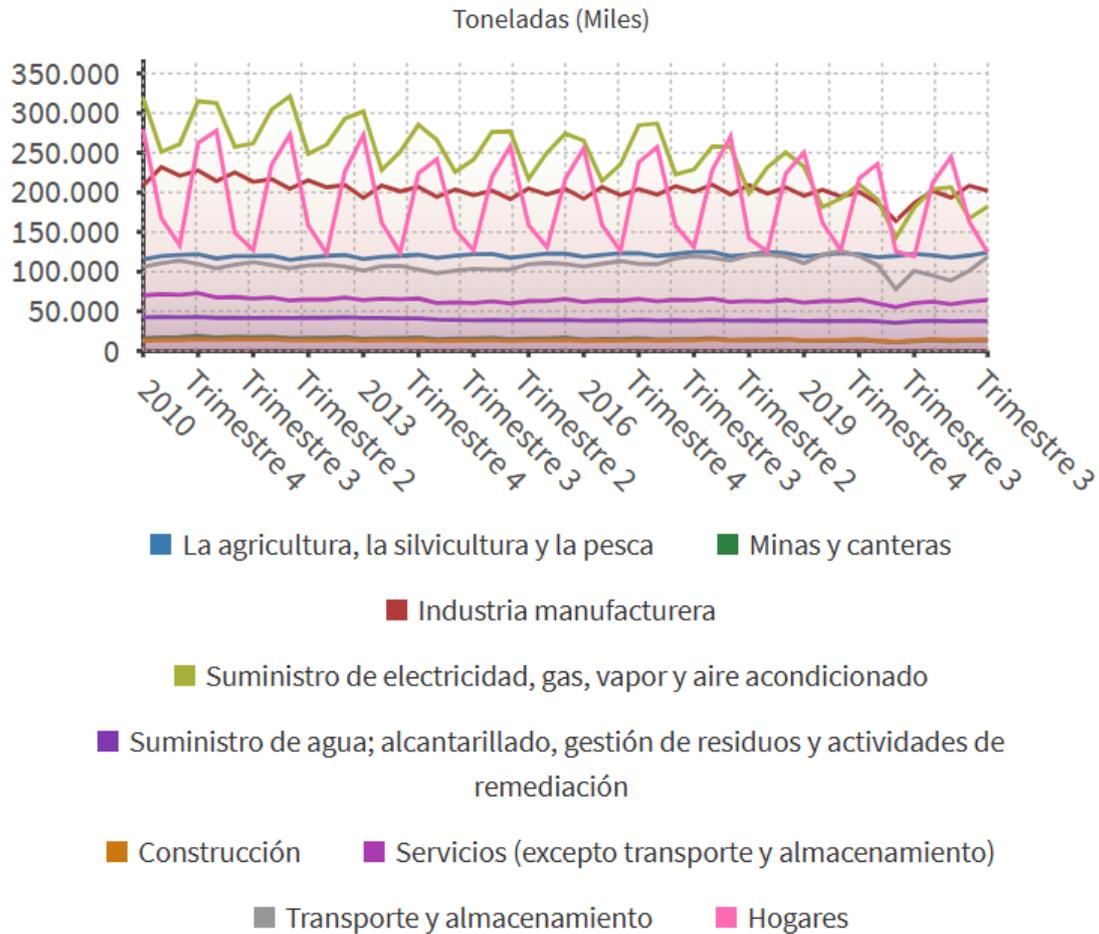
Gráfica 4. Emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles en la Unión Europea en 2020 y 2019 (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).

Esta gráfica además nos permite evaluar la posición relativa de España en términos de emisiones de CO₂ y comprender el panorama general de las emisiones en el contexto europeo. También destaca la necesidad de implementar medidas eficaces para reducir las emisiones y cumplir con los compromisos internacionales.

Es importante destacar que las emisiones de CO₂ en Europa no están distribuidas de manera uniforme entre los países. Algunos países, debido a su tamaño, densidad de población y estructura industrial, contribuyen de manera más significativa a las emisiones totales. Entre los países con mayores emisiones se encuentran Alemania, Reino Unido, Polonia y Francia, que representan aproximadamente 22, 11, 10 y 9% de total de emisiones de CO₂ en Europa.

Existen diversos sectores responsables de las emisiones de CO₂ en Europa, como se muestra en la Gráfica 5, donde se presenta la contribución de las emisiones de gases efecto invernadero en la Unión Europea según el tipo de actividad. Los sectores de generación de energía, transporte e industria son los principales contribuyentes. La generación de energía a partir de combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, constituyen una parte significativa de las emisiones totales. Además, el transporte, que incluye el transporte por carretera, aéreo y marítimo, también desempeña un papel importante en las emisiones de CO₂ en Europa.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.



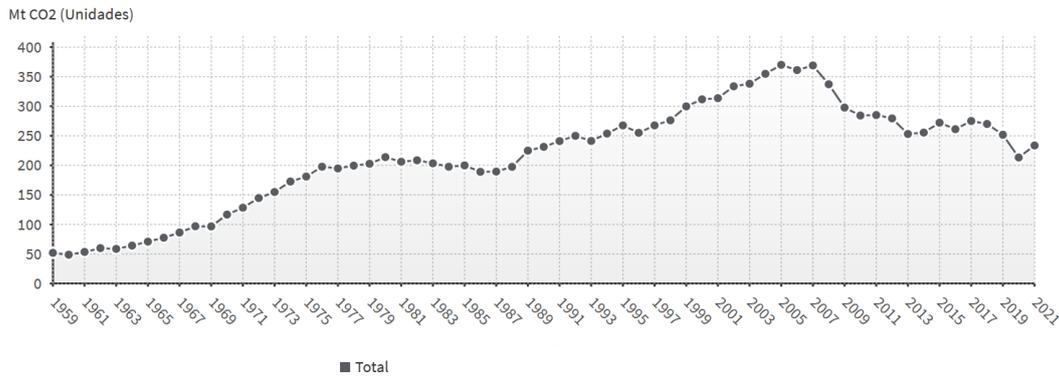
Gráfica 5. Emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea por actividad (Fuente: Eurostat, www.epdata.es).

5.3. EMISIONES DE CO₂ EN ESPAÑA.

Las emisiones de CO₂ en España han sido objeto de análisis y preocupación debido a su impacto en el cambio climático y la necesidad de abordar el problema de las emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se proporciona un análisis detallado de las emisiones de CO₂ en España, considerando los sectores clave y los factores que influyen en estas emisiones.

En términos generales, España ha experimentado una disminución gradual en las emisiones de CO₂ en los últimos años, como se observa en la Gráfica 6. Sin embargo, según datos de la revista *ecoavant.com*, en 2022, las emisiones de CO₂ en España alcanzaron 305 millones de toneladas, lo que representa un aumento significativo en comparación al año anterior (2021).

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.



Gráfica 6. Evolución de las emisiones de CO₂ en España (Fuente: Global Carbon Project, www.epdata.es).

La Gráfica 6 muestra la evolución de las emisiones de CO₂ en España desde 1990 hasta 2020. Se puede observar una tendencia al alza en las emisiones durante las décadas de 1990 y 2000, seguida de una disminución gradual en los últimos años. Esta disminución puede atribuirse a una mayor conciencia sobre la importancia de reducir las emisiones y a la adopción de medidas de mitigación en diversos sectores.

Los sectores clave que contribuyen a las emisiones de CO₂ en España incluyen la generación de energía, el transporte, la industria y los sectores residencial y comercial. Estos sectores representan la mayor parte de las emisiones totales de CO₂ en el país y son los principales focos de atención en los esfuerzos por reducir las emisiones.

La generación de energía es uno de los sectores más relevantes en términos de emisiones de CO₂ en España. Históricamente, España ha dependido en gran medida de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, lo que ha contribuido significativamente a las emisiones de CO₂. Sin embargo, en los últimos años se ha observado una transición hacia las fuentes de energía más limpias y renovables, como la energía solar y eólica, lo que ha permitido reducir las emisiones en este sector.

El sector del transporte también desempeña un papel importante en las emisiones de CO₂ en España. El aumento del parque automovilístico y el uso intensivo de vehículos privados han contribuido al aumento de las emisiones en este sector. Sin embargo, se ha implementado medidas para fomentar el uso de transporte público, la electrificación de vehículos y el desarrollo de infraestructuras para movilidad sostenible, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ relacionadas con el transporte.

En el sector industrial, la actividad manufacturera y la producción de bienes también generan emisiones de CO₂ significativas. Aquí, los esfuerzos se centran en la implementación de tecnologías más limpias y eficientes, así como en la

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

promoción de la economía circular y la reducción de residuos, con el fin de reducir las emisiones asociadas con las actividades industriales.

La Gráfica 7 muestra la evolución desde el año 2008 hasta el 2021 de las emisiones de gases de efecto invernadero en España según el tipo de actividad.

Toneladas de Dióxido de Carbono equivalente (tCO₂e) (Miles)

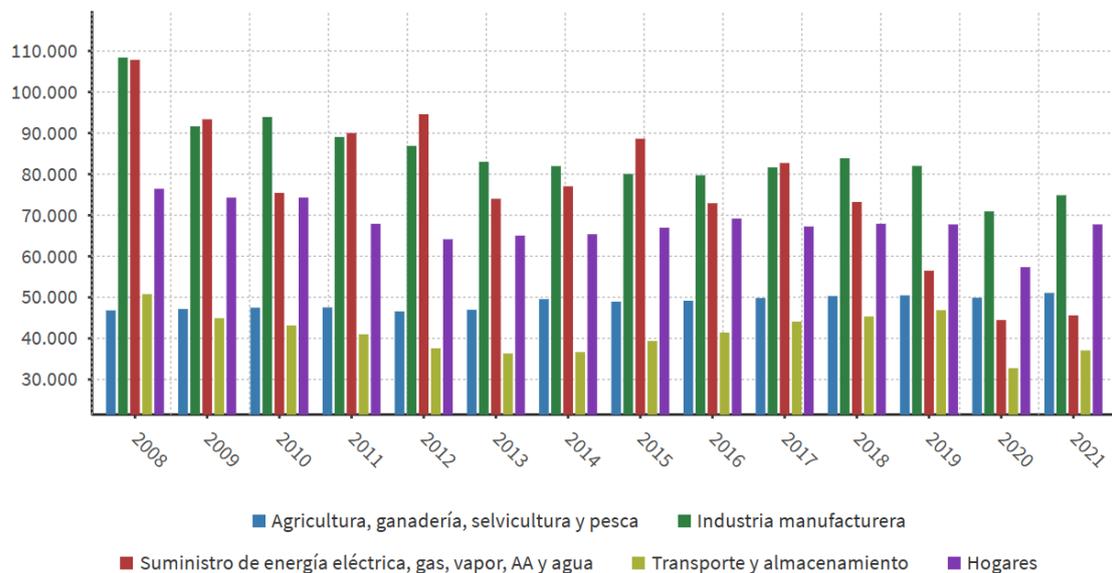


Gráfico 7. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España por actividad (Fuente: INE, www.epdata.es).

Se puede observar en el gráfico anterior que los principales sectores contribuyentes incluyen la generación de energía, el transporte, la industria y los sectores residencial y comercial. Estos sectores representan la mayor parte de las emisiones totales de CO₂ en el país.

Es importante destacar que el enfoque hacia la reducción de las emisiones de CO₂ en España se ha visto reforzado por los compromisos internacionales asumidos en el marco del Acuerdo de París y la Unión Europea. Estos acuerdos establecen metas ambiciosas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar la transición hacia una economía baja en carbono.

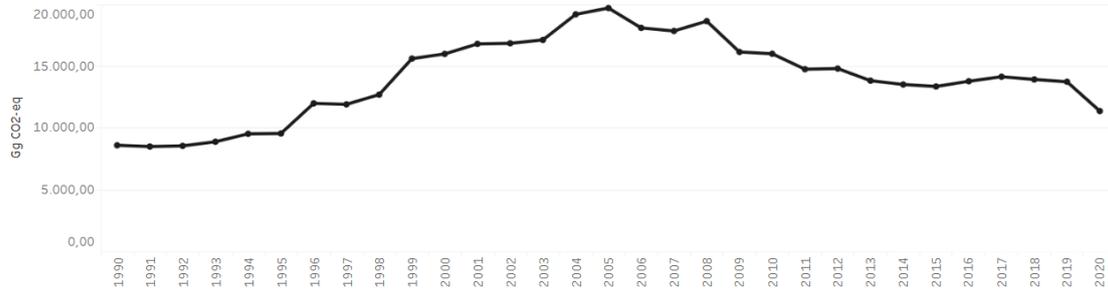
5.4. EMISIONES DE CO₂ EN CANARIAS.

Las Islas Canarias, también enfrenta desafíos en términos de emisiones de CO₂. A continuación, se presenta un análisis detallado de las emisiones de CO₂ en Canarias, considerando los sectores clave y los factores que influyen en estas emisiones.

En la Gráfica 8 se presenta la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Canarias desde el año 1990 hasta el 2020, se observa como las emisiones van aumentando desde 1990 hasta el año 2008 y a partir de

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

ese año se logra una disminución progresiva o estabilización de estas, notándose la disminución más relevante durante la crisis del COVID-19.



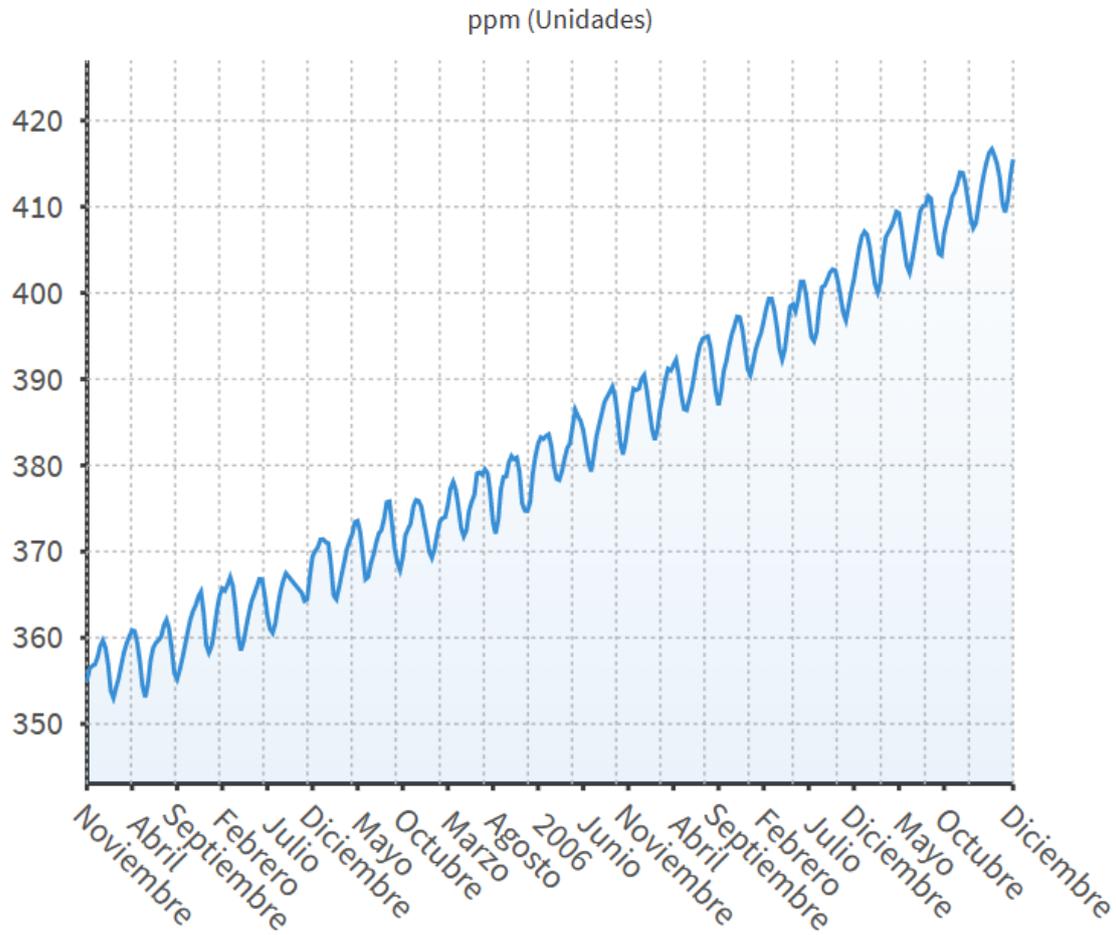
Gráfica 8. Evolución de las emisiones de GEI totales en Canarias (Fuente: Anuario Energético de Canarias).

Las emisiones de CO₂ en Canarias están influenciadas principalmente por el transporte, la generación de energía y el turismo. La dependencia de los combustibles fósiles tanto en el sector transporte como para la generación de energía, así como el turismo, juegan un papel importante en las emisiones de CO₂ en Canarias. Para abordar estas emisiones y avanzar hacia una economía más sostenible, se están implementando diversas medidas en Canarias. Estas incluyen la promoción de la movilidad sostenible, el fomento de las energías renovables y la adopción de prácticas de eficiencia energética en los sectores clave. La transición hacia el uso de energías renovables, como la energía eólica y solar, pueden reducir significativamente las emisiones de CO₂ en la generación de energía.

Además, se están promoviendo iniciativas para mejorar la eficiencia energética en el transporte, como la electrificación de vehículos y el fomento del transporte público y compartido. Estas medidas contribuyen a reducir las emisiones de CO₂ relacionadas con el transporte terrestre y marítimo.

En la Gráfica 9, se presenta como aumenta la concentración de CO₂ en la atmósfera, el cual se incrementa en, aproximadamente, 2,5 ppm por año.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.



Gráfica 9. Aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera (Observatorio de Izaña, Tenerife) (Fuente: AEMET, www.epdata.es).

5.5. ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO₂ EN CANARIAS.

Un análisis más detallado de estas emisiones en Canarias nos permite comprender mejor su origen, magnitud y las posibles soluciones para abordar este problema ambiental. A continuación, se presenta un análisis exhaustivo de las emisiones de CO₂ en Canarias (La Moncloa).

5.5.1 Sectores clave y fuentes de emisiones.

Las emisiones de CO₂ en Canarias provienen principalmente de tres sectores clave: transporte, generación de energía y turismo.

- **Transporte:** El transporte terrestre y marítimo es una fuente significativa de emisiones de CO₂ en Canarias. Debido a la dependencia de los combustibles fósiles, como el petróleo y el diésel, tanto para el transporte interno como para las conexiones con el continente, se generan emisiones considerables. Además, el crecimiento del parque automotor y el aumento de los desplazamientos turísticos contribuyen a este problema.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- **Generación de energía:** Canarias depende en gran medida de la generación de energía a partir de combustibles fósiles, como el petróleo y el gas natural. Estas fuentes de energía son responsables de la emisión de grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Sin embargo, en los últimos años, se ha trabajado en la diversificación de la matriz energética, con un mayor enfoque en las energías renovables, como la energía eólica y la energía solar fotovoltaica, con el objeto de reducir las emisiones.
- **Turismo:** El turismo es una de las principales fuentes de ingresos de Canarias, pero también tiene un impacto significativo en las emisiones de CO₂. El transporte de turistas hacia y desde las islas, especialmente por vía aérea, contribuye a las emisiones. Además, la demanda de energía y recursos durante la estancia de los turistas también genera emisiones adicionales.

5.5.2. Tendencias y evolución de las emisiones.

A lo largo de los años, se ha observado una tendencia al aumento de las emisiones de CO₂ en Canarias debido al crecimiento económico y la mayor demanda de energía. Sin embargo, es importante destacar los esfuerzos realizados para reducir estas emisiones y avanzar hacia una economía más sostenible.

5.5.3. Medidas y políticas para reducir las emisiones.

En Canarias se han implementado diversas medidas y políticas para reducir las emisiones de CO₂ y mitigar el impacto ambiental. Estas incluyen:

- **Fomento de las energías renovables:** se ha promovido activamente el uso de energías renovables, como la energía eólica y la energía solar fotovoltaica, mediante incentivos y programas de apoyo para impulsar la transición hacia una matriz energética más limpia.
- **Movilidad sostenible:** se ha implementado acciones para fomentar la movilidad sostenible, como la promoción del transporte público, el impulso de la electrificación del transporte y la creación de infraestructuras para la movilidad no motorizada, como carriles para bicicletas y peatonales.
- **Eficiencia energética:** se han llevado a cabo iniciativas para mejorar la eficiencia energética en edificios, tanto en el sector residencial como en el sector empresarial, promoviendo la adopción de tecnologías más eficientes y la implementación de medidas de ahorro de energía.
- **Sensibilización y educación ambiental:** Se han desarrollado campañas de sensibilización y educación ambiental para concienciar a la población sobre la importancia de reducir las emisiones de CO₂ y adoptar prácticas más sostenibles en su vida cotidiana.

CAPÍTULO 6. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂.

6.1. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO₂.

La captura de CO₂ es un proceso crucial para reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. En este capítulo se detallan las características de las principales tecnologías de captura y almacenamiento del CO₂ que se han mencionado en el capítulo de Marco Teórico.

6.1.1. POSTCOMBUSTIÓN.

Las técnicas conocidas como poscombustión se aplican generalmente a los gases provenientes de los procesos industriales justo antes de su emisión por la chimenea, siguiendo el esquema común de las plantas de depuración de gases de combustión.

Estas técnicas son la opción más adecuada para la captura en instalaciones industriales que generan gases con bajas o moderadas presiones parciales de CO₂, como centrales térmicas, CCGN, industria papelera, acerías, cementeras, entre otras, según el estado actual de la tecnología. También son adecuadas para la captura directa de aire (DAC).

Las opciones de captura incluyen operaciones que separan selectivamente el CO₂ del resto de los componentes gaseosos de las corrientes a tratar. Algunas de estas opciones son:

- **Absorción del CO₂ sobre un sustrato líquido (adsorbente):** en el que se disuelve de manera eficiente, mientras que los demás componentes del gas de proceso son prácticamente insolubles en él. La absorción puede ser física, donde el CO₂ se retiene en el líquido únicamente por su capacidad de disolverse, o química, cuando el CO₂ reacciona con alguno de los componentes del líquido adsorbente, formando una unión más efectiva.
- **Adsorción sobre la superficie de sólidos:** donde el paso de la corriente de gases el CO₂ queda retenido, separándose del resto de componentes. Estos procesos se basan en ciclos de carga/descarga en los que el gas pasa a través de un lecho de adsorción. Algunos materiales adsorbentes comunes para la captura de CO₂ son la alúmina, las zeolitas y el carbón activado. Para liberar el CO₂ adsorbido en los lechos y obtener una corriente concentrada con CO₂ atrapado, se pueden utilizar técnicas como calentamiento del lecho (TSA), ciclos de presión (PSA) o lavado con líquidos absorbentes.
- **Condensación:** mediante técnicas de enfriamiento criogénico con compresión, se logra la separación del agua y luego del CO₂, mientras que los demás gases permanecen en la corriente como incondensables a las temperaturas de trabajo.
- **Membranas:** en los últimos años, se ha investigado el desarrollo de materiales poliméricos con mayor permeabilidad y selectividad al CO₂ para su utilización en la captura selectiva mediante membranas. Se han encontrado buenos resultados con membranas de óxido de polifenilo y polidimetilsiloxano para la separación directa en fase gaseosa, y se están

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

probando con éxito membranas de polipropileno para la combinación de membranas y absorción. Sin embargo, existe una limitación en el compromiso entre permeabilidad y selectividad de los polímeros, donde los más permeables tienden a tener menor selectividad y viceversa. Se han explorado enfoques como la incorporación de puntos reactivos en la estructura del polímero para mejorar el transporte de CO₂ y la capacidad de procesamiento, como las membranas de matriz mixta (MMM) y las que contienen estructuras organometálicas (MOF).

- **Procesos biológicos:** en este caso, se utilizan microorganismos que consumen el CO₂ de los gases y lo fijan como carbono orgánico a través de la fotosíntesis, al ponerlos en contacto con un medio acuoso y exponerlos a la luz solar.

Tanto la absorción como la adsorción son técnicas maduras que se utilizan comúnmente en la industria para la separación de gases ácidos. En ambos casos, es necesario separar posteriormente el CO₂ del sustrato en el que se ha retenido, y precisamente este proceso de separación final es el que consume más energía.

La elección del tipo de absorbente (físico o químico) depende principalmente de la presión parcial de CO₂ en el gas a tratar. La absorción química con aminas primarias, especialmente la monoetanolamina (MEA), es preferible para corrientes con una presión parcial de CO₂ por debajo de 1 bar, mientras que los absorbentes basados en aminas terciarias, como la metildietanolamina (MDEA), se suelen emplear para corrientes con presiones parciales de CO₂ entre 1 y 8 bar.

Para presiones parciales superiores a 8 bar, resulta más eficiente el uso de absorbentes físicos. Entre los más utilizados a nivel comercial se encuentran el Selexol, el Rectisol, etc. El método Selexol es altamente selectivo para la absorción de H₂S y CO₂, incluso a niveles de partes por millón, y requiere una baja cantidad de calor para la recuperación de CO₂ en comparación con los absorbentes químicos. El método Rectisol utiliza metanol como solvente orgánico físico y opera a temperaturas mucho más bajas que la mayoría de los otros procesos físicos (Berges, 2014).

6.1.2. PRECOMBUSTIÓN.

Este término se utiliza para describir los procesos de conversión de combustibles sólidos (tanto fósiles como renovables) que pasan por una etapa inicial de gasificación con inyección de aire o, preferiblemente, oxígeno de alta pureza para evitar la presencia de N₂ en el gas final combustible. Después de la gasificación, se lleva a cabo una reacción de desplazamiento para maximizar la presencia de H₂ y CO₂ en el gas. Esta corriente gaseosa se somete luego a un proceso de absorción para separar el CO₂, lo que da como resultado una corriente de gases muy rica en hidrógeno (Figura 6). En este caso, la técnica

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

más adecuada para la captura de CO₂ es la absorción física, ya que las presiones parciales de CO₂ superan los 8 bar (Abanades García y otros, 2014).

El proceso de captura de CO₂ antes de la combustión requiere de tres etapas, recogidas en la Figura 6:

- **Etap 1:** Producción de gas de síntesis: En esta etapa, se lleva a cabo la producción de una corriente gaseosa compuesta principalmente por hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) a partir de un combustible primario. Se emplean diversos procesos como el reformado con vapor de agua, la oxidación parcial, el reformado autotérmico y la gasificación con vapor de agua. Estos procesos permiten obtener un gas rico en hidrógeno para su uso en aplicaciones específicas.
- **Etap 2:** Conversión de CO a CO₂: En esta etapa, se realiza la conversión del monóxido de carbono (CO) a dióxido de carbono (CO₂). La tecnología utilizada es la reacción gas-agua (*Water-Gas-Shift*), que implica la adición de agua para desplazar el equilibrio y producir una corriente compuesta mayoritariamente por CO₂ e hidrógeno (H₂). Esta conversión es fundamental para fijar el carbono en una molécula de bajo nivel energético, como el CO₂.
- **Etap 3:** Separación de CO₂/H₂: En esta última etapa, se lleva a cabo la separación del CO₂ y el hidrógeno. Se utilizan diferentes procedimientos para lograr esta separación, dependiendo de las tecnologías utilizadas en las etapas anteriores. El objetivo es obtener un gas combustible rico en hidrógeno, que se utilizará en la producción de electricidad u otros procesos, y una corriente compuesta principalmente por CO₂ con cierto grado de impurezas. Esta corriente de CO₂ puede ser almacenada o utilizada en otras aplicaciones.

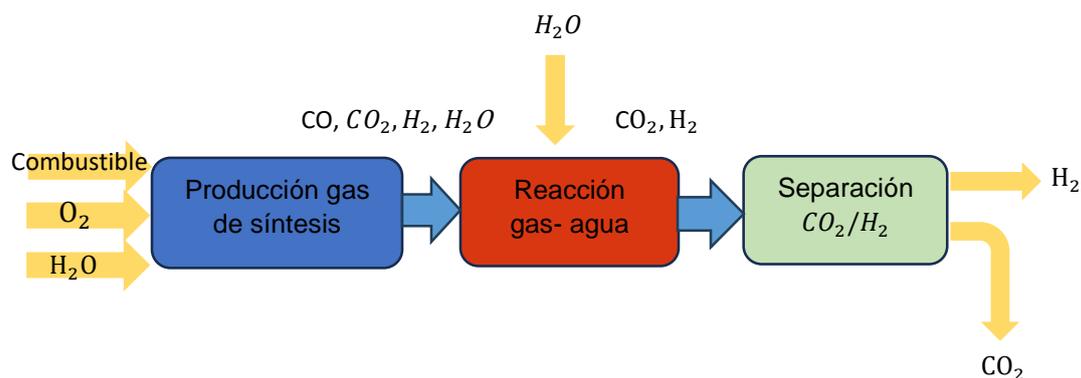


Figura 6. Proceso de captura de CO₂ antes de la combustión (Fuente: Abanades García y otros, 2014).

6.1.3. OXICOMBUSTIÓN.

Este término se utiliza para describir procesos en los que la combustión se lleva a cabo utilizando oxígeno de alta pureza en lugar de aire como oxidante. Debido a la ausencia de nitrógeno (N₂), la concentración de CO₂ en los gases de

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

combustión es muy alta. El otro componente principal de los gases de combustión es el vapor de agua, que se puede eliminar fácilmente mediante condensación, lo que resulta en una corriente final altamente concentrada en CO₂. Los operadores de los sistemas de transporte y almacenamiento pueden establecer especificaciones que requieran la separación de impurezas.

Por lo tanto, la oxidación no se considera propiamente una tecnología de captura en el sentido de que no incorpora un proceso específico para separar el CO₂ del resto de componentes del gas de combustión, pero sí requiere un proceso de separación del oxígeno del aire.

La Figura 7 ilustra el esquema de una instalación de captura utilizando oxidación en una caldera de carbón pulverizado. Se destacan las diferentes etapas del proceso y las nuevas demandas energéticas y de refrigeración que son necesarias en comparación con una instalación convencional que opera con aire. En el esquema se incluye una planta de separación de aire criogénica (ASU) (que implica una penalización energética aproximadamente equivalente a la separación en las opciones de precombustión y poscombustión) para suministrar oxígeno puro sistemas de depuración de gases (DeSO_x, DeNO_x y eliminación de partículas) adaptados a las características de los gases de escape, una posible unidad de purificación adicional para ajustar la composición de los gases a los límites establecidos por las regulaciones de transporte y almacenamiento, y finalmente, el sistema de compresión. Asimismo, la instalación debe contar con corrientes de recirculación primaria (utilizadas para el secado y transporte del combustible) y corrientes de recirculación secundaria (introducidas directamente en la caldera como corriente de comburente). Estas características y componentes son necesarios para llevar a cabo con éxito el proceso de captura de CO₂ utilizando la tecnología de oxidación (Cámara, Á.).

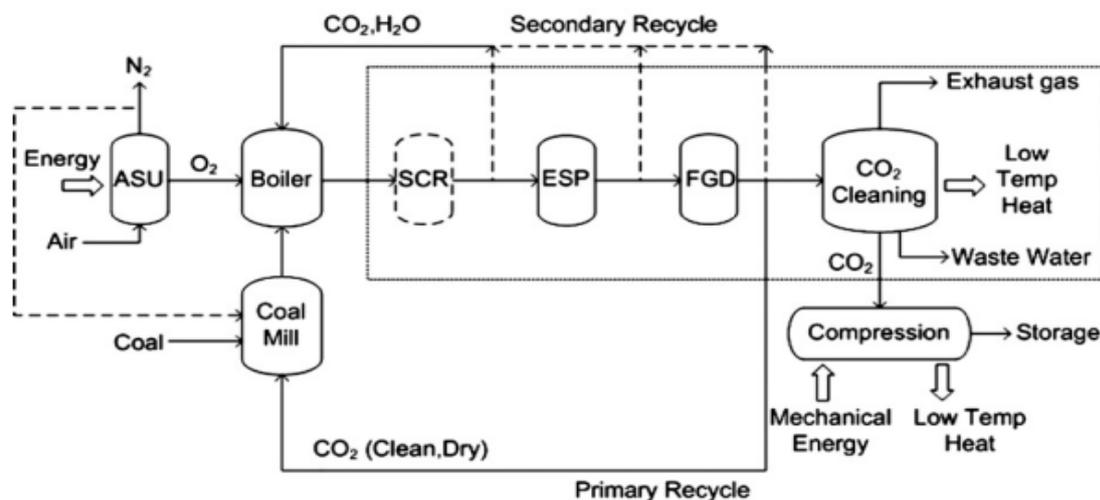


Figura 7. Diagrama simplificado de una central térmica de oxidación para la captura de CO₂ (Fuente: Cámara, Á.).

6.2. TRANSPORTE DE CO₂.

El transporte de CO₂ es una etapa crucial en los procesos de captura y almacenamiento de carbono. Una vez capturado el CO₂, es necesario transportarlo de manera segura y eficiente desde el lugar de captura hasta los sitios de almacenamiento o utilización final.

Propiedades del CO₂ para los tipos de transporte.

El dióxido de carbono (CO₂) puede ser transportado a través de tuberías en diferentes estados, ya sea como líquido, gas, fluido supercrítico o una combinación de líquido y gas, conocido como flujo de dos fases, en la Figura 12 se presenta el diagrama de fases del CO₂. El CO₂ se encuentra en estado supercrítico por encima de una temperatura de 31°C y una presión de 7,3 MPa. Si la temperatura está por debajo de los 31°C, pero la presión sigue siendo superior a 7,3 MPa, el CO₂ se denomina líquido denso.

En el transporte de CO₂, generalmente se prefiere utilizar la fase densa o supercrítica, ya que proporciona una alta densidad y una baja viscosidad. Esto permite un transporte más eficiente y una mayor capacidad de carga en las tuberías. La fase supercrítica del CO₂ se caracteriza por tener propiedades intermedias entre las fases líquida y gaseosa, lo que la hace especialmente adecuada para el transporte a larga distancia.

El transporte de CO₂ en estado supercrítico o líquido denso requiere condiciones específicas de temperatura y presión para mantener el CO₂ en el estado deseado. Además, se deben considerar aspectos de seguridad y compatibilidad de materiales en el diseño y construcción de las tuberías utilizadas para el transporte de CO₂ (Knoope, Ramirez, & Faaij, 2013).

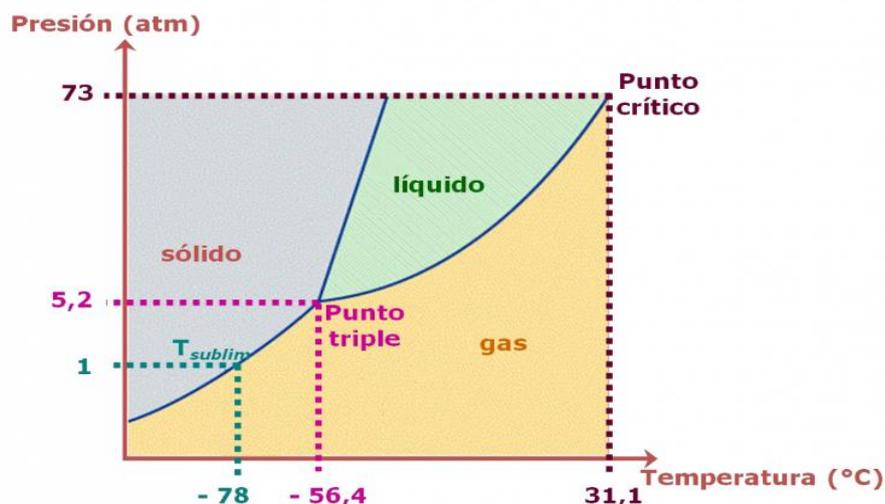


Figura 8. Diagrama de fases de CO₂ (Fuente: Cedrón, Landa & Robles, 2018).

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

Existen diferentes métodos y tecnologías utilizados en el transporte de CO₂, dependiendo de la distancia a recorrer, las características del sitio de captura y las regulaciones locales.

Se recomienda evitar el flujo de dos fases por las siguientes razones:

En primer lugar, la cavitación puede ocurrir si la presión local desciende por debajo de la presión de saturación, lo que resulta en la formación de burbujas de vapor. Estas burbujas implosionarán bajo presiones crecientes, generando velocidades y picos de presión altos que pueden erosionar el material de la tubería. Esto puede provocar daños en la tubería y reducir su resistencia. Además, la ebullición del líquido puede generar turbulencias y dañar la tubería al generar burbujas de vapor.

En segundo lugar, el flujo de dos fases conlleva complejidades operativas, ya que puede ser más difícil de manejar para compresores y bombas debido a la presencia de dos fases.

Por último, el flujo de dos fases reduce la cantidad de CO₂ transportado a través de la tubería en comparación con el transporte en fase líquida. Para evitar estos problemas, se recomienda que la presión en la tubería sea mayor que la presión de saturación.

Por lo tanto, es importante asegurar que la presión del CO₂ en la tubería no caiga por debajo de los 8,5 MPa para evitar el flujo de dos fases. Las zonas críticas donde esto podría ocurrir son los puntos más altos del recorrido y el tramo final de la tubería. También es importante garantizar que la presión del CO₂ no supere los 13 MPa al final del pozo de inyección para evitar cambios de fase. Hay dos opciones para reducir la presión en esta parte final del pozo (Nimtz, Klatt, Wiese, Kühn y Krautz, 2010):

- Reducir la densidad de la columna de CO₂ para disminuir la presión hidrostática en el fondo.
- Realizar un estrangulamiento del flujo antes de ingresar al acuífero.

Sin embargo, en el caso de otros medios de transporte, como camiones cisterna, ferrocarriles y barcos, donde la presión se mantiene constante, las condiciones líquidas son adecuadas. La densidad del CO₂ en estado líquido se aproxima a 1000 kg/m³.

Algunos de los principales tipos de transporte de CO₂ son los siguientes:

1. Transporte por tuberías.

Este es el método más comúnmente utilizado para el transporte a larga distancia del CO₂ capturado. Consiste en la construcción de una red de tuberías dedicada exclusivamente al transporte de CO₂. El CO₂ se comprime y se inyecta a alta presión en las tuberías, lo que permite un transporte eficiente a través de largas distancias. El transporte por tuberías es, generalmente, seguro y económico, pero requiere una

planificación cuidadosa de la ruta y la selección de materiales adecuados para garantizar la integridad de la tubería.

2. Transporte en tanques.

Esta opción implica el almacenamiento del CO₂ capturado en tanques a alta presión o en forma líquida para su posterior transporte. Los tanques pueden ser transportados en barcas, camiones o ferrocarriles hasta el sitio de almacenamiento final. Sin embargo, el transporte en tanques es más adecuado para distancias cortas o medianas debido a las limitaciones de capacidad y seguridad asociadas con el transporte a larga distancia.

3. Transporte en barcos.

Para el transporte de CO₂ a larga distancia sobre cuerpos de agua, se utilizan buques tanque, especialmente, diseñados para este fin. Estos buques están equipados con sistemas de almacenamiento y manipulación de CO₂, así como con medidas de seguridad para prevenir fugas o derrames. El transporte en barcos es una opción viable cuando el CO₂ debe ser transportado a través de océanos o mares hacia sitios de almacenamiento o utilización final.

6.3. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE CO₂.

El almacenamiento de CO₂ es una parte fundamental de las estrategias de mitigación del cambio climático. Hay diferentes enfoques para almacenar de manera segura y permanente el CO₂ capturado, en este apartado se explicarán las principales.

6.3.1. ALMACENAMIENTO EN FORMACIONES GEOLÓGICAS.

El almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas es una de las principales tecnologías utilizadas en la captura y almacenamiento de carbono (CCS). Esta técnica consiste en inyectar CO₂ capturado de fuentes industriales en formaciones geológicas profundas, donde se almacena de manera segura a largo plazo. A continuación, se presenta el desarrollo detallado de este proceso.

1. Selección de formaciones geológicas adecuadas.

Para el almacenamiento de CO₂, es necesario identificar formaciones geológicas que sean adecuadas y seguras para retener el CO₂ a largo plazo. Las formaciones geológicas más comunes utilizadas para el almacenamiento de CO₂ incluyen yacimientos de petróleo y gas agotados, acuíferos salinos profundos y capas de carbón profundas. Estas formaciones deben tener características geológicas que permitan la retención del CO₂ y una baja permeabilidad para evitar la migración del gas.

2. Caracterización de la formación geológica.

Antes de la inyección de CO₂, es necesario realizar una caracterización detallada de la formación geológica seleccionada. Esto implica la

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

recopilación de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos para comprender las propiedades y la estructura de la formación. Esto ayuda a determinar la capacidad de almacenamiento, la permeabilidad, la porosidad y la integridad de la formación. Es por ello por lo que, para optimizar el almacenamiento, el CO₂ debe estar en unas condiciones supercríticas con el objetivo de ocupar menos volumen que en condiciones normales (densidad 1,97 kg/m³). En estas condiciones supercríticas, se comportan como un gas, pero con menor viscosidad que el agua y mayor densidad (densidad crítica 467 kg/m³), siendo condiciones idóneas para un almacenamiento a partir de 800 metros de profundidad.

3. Preparación del sitio de inyección.

Se deben perforar pozos de inyección y extracción en la formación geológica (antes de la inyección de CO₂). Estos pozos proporcionan acceso al subsuelo y permiten la inyección controlada del CO₂ y la monitorización del almacenamiento. La construcción adecuada de los pozos es esencial para garantizar la integridad y la seguridad del almacenamiento.

4. Inyección de CO₂.

Una vez los pozos están listos, se inicia la fase de inyección. El CO₂ capturado se comprime y se inyecta en la formación geológica a través de los pozos de inyección. La inyección se realiza de manera controlada para evitar la migración del CO₂ hacia otras áreas no deseadas.

5. Monitorización y seguimiento.

Durante y después de la inyección, se lleva a cabo un monitoreo continuo para evaluar la integridad del almacenamiento y detectar cualquier posible fuga de CO₂. Esto implica la medición de parámetros como la presión, la temperatura y la composición del CO₂ en los pozos de inyección y extracción, así como la monitorización de la calidad del agua subterránea cercana para detectar cualquier impacto ambiental.

6. Sellado y cierre del sitio.

Una vez que se completa la inyección de CO₂ y se alcanza la capacidad de almacenamiento deseada, se procesa al sellado y cierre del sitio. Esto implica el sellado adecuado de los pozos y la implementación de medidas de seguridad para garantizar que el CO₂ almacenado permanezca confinado a largo plazo.

Es importante destacar que el almacenamiento en formaciones geológicas es una tecnología probada y utilizada en proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ en todo el mundo. Sin embargo, es fundamental realizar una evaluación adecuada de los aspectos geológicos y llevar a cabo una gestión cuidadosa del almacenamiento para garantizar la seguridad y la mitigación efectiva del CO₂. El potencial de almacenamiento de CO₂ en las formaciones subterráneas que se detallarán a continuación y se recogen en la Figura 9, se basa en su capacidad,

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

estructura, porosidad y otras propiedades que son necesarias para un almacenamiento seguro a largo plazo. Sin embargo, existen desafíos que limitan su desarrollo y expansión, relacionados con la seguridad y el impacto ambiental. Por ejemplo, es fundamental garantizar que el CO₂ no escape de estas formaciones, que no se desplace hacia la superficie de la tierra y que no contamine las fuentes de agua potable. Estos interrogantes deben abordarse de manera rigurosa para asegurar la viabilidad y aceptación de estas tecnologías de almacenamiento (IGME).

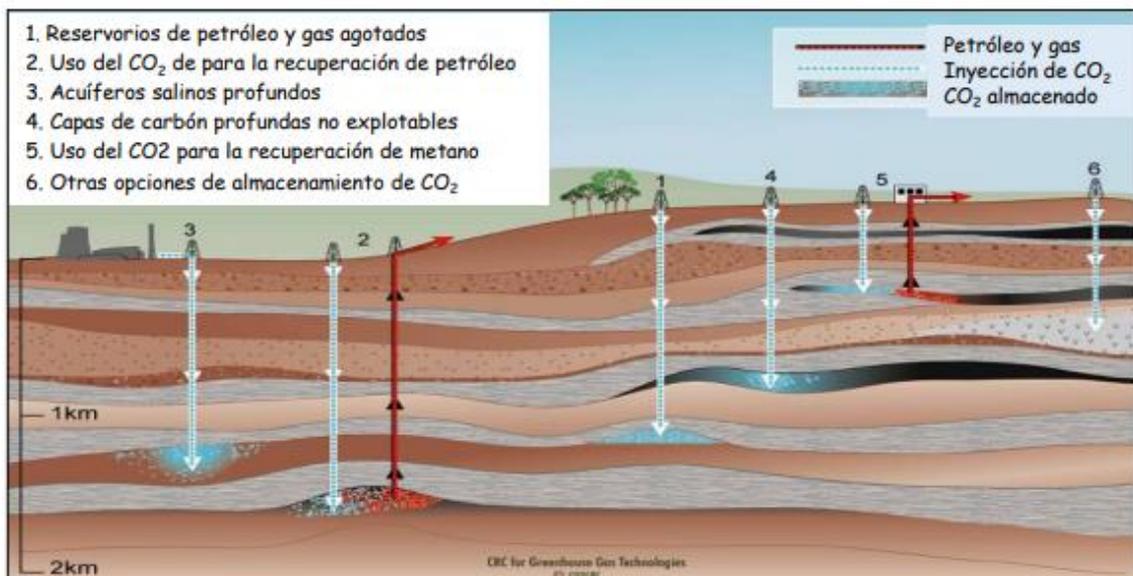


Figura 9. Métodos para almacenar CO₂ en formaciones geológicas subterráneas profundas (Fuente: Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).

6.3.1.1. YACIMIENTOS DE PETRÓLEO Y GAS.

Los yacimientos de petróleo y gas son reservorios naturales subterráneos que contienen hidrocarburos, los cuales son fuentes primarias de energía que se utilizan en todo el mundo. Estos yacimientos se forman a partir de procesos geológicos complejos que involucran la acumulación de material orgánico, su enterramiento y transformación a lo largo de millones de años.

Los yacimientos de petróleo se componen de rocas porosas y permeables, como areniscas o calizas, que actúan como reservorios para el petróleo. Estas rocas almacenan el petróleo en sus poros y permiten su flujo hacia pozos de extracción mediante la aplicación de técnicas de perforación y producción. Los yacimientos de gas, por otro lado, contienen gas natural, que se encuentra principalmente en rocas sedimentarias porosas y en cavidades subterráneas.

La exploración y producción de petróleo y gas es un proceso complejo que implica la identificación de áreas prometedoras a través de estudios geológicos y geofísicos, seguidos de la perforación de pozos de exploración para confirmar la presencia de hidrocarburos. Una vez descubierto un yacimiento, se procede a

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

su desarrollo y producción mediante la perforación de pozos de producción y la implementación de técnicas de extracción, como la inyección de agua o gas para aumentar la presión y facilitar el flujo de los hidrocarburos hacia la superficie.

Los yacimientos de petróleo y gas desempeñan un papel crucial en la economía global, ya que proporcionan la mayor parte de la energía utilizada en diversos sectores, como transporte, generación de electricidad y producción industrial. Sin embargo, su explotación también plantea desafíos en términos de impactos ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero y el riesgo de derrames o fugas.

En la actualidad, se están explorando y desarrollando nuevas tecnologías, como la extracción de petróleo y gas de esquisto mediante la fracturación hidráulica (fracking), así como la producción de gas natural licuado (GNL) para facilitar su transporte y comercialización. Además, se están promoviendo alternativas más sostenibles y limpias, como las energías renovables, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados a su explotación. Muchos de los yacimientos de petróleo y gas son utilizados para el almacenaje de CO₂ (Abós García y otros, 2012).

Un ejemplo de este tipo de almacenamiento de CO₂ es el proyecto del cementerio de carbono marino europeo (Figura 10).



Figura 10. La plataforma de petróleo y gas que ahora almacena carbono en el yacimiento de Nini West, cerca de Esbjerg (Dinamarca) (Fuente: CincoDías).

Este enfoque innovador no solo aborda la problemática de la contaminación del aire y la necesidad de reducir las emisiones, sino que también promueve la conservación y regeneración de los ecosistemas marinos.

El cementerio marino europeo es una instalación estratégicamente ubicada en áreas marinas con alta biodiversidad y actividad biológica. Consiste en

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

estructuras submarinas diseñadas para fomentar la proliferación de organismos marinos, como corales y algas, que tienen la capacidad de absorber y almacenar dióxido de carbono (CO₂). Estas estructuras actúan como hábitats artificiales que promueven la formación de sumideros de carbono en el océano, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático.

Se pretende almacenar hasta 1,5 millones de toneladas de CO₂ anuales a finales de 2026 y 8 millones a partir de 2030. En la Figura 15 se puede observar un esquema del proyecto de CCS Greensand en Dinamarca.



Figura 11. Esquema del proyecto de CCS Greensand (Dinamarca) (Fuente: CincoDías).

La implementación de cementerios marinos en todo el mundo tiene el potencial de tener un impacto significativo en el balance global de emisiones de CO₂. Al proporcionar un hábitat propicio para organismos marinos que actúan como sumideros de carbono, estos cementerios pueden reducir las emisiones de CO₂ y ayudar a neutralizar el exceso de carbono en la atmósfera. Teniendo en cuenta que en el mundo hay un total de 196 instalaciones de CCS, con capacidades de 243,9 millones de toneladas por año, según el *Global Status of CCS 2022*, elaborado por el *think tank* internacional Global CCS Institute.

En Europa, el cementerio marino se presenta como una solución prometedora para combatir el cambio climático y promover la sostenibilidad ambiental. Se estima que un solo cementerio marino europeo podría absorber y almacenar varias toneladas de CO₂ por año, ayudando así a reducir las emisiones y a promover la salud de los ecosistemas marinos. Teniendo en cuenta, según estimaciones, la cantidad total de CO₂ que puede almacenarse en los países

Europeos para 2030 es entre 360 y 790 millones de toneladas de carbono (CincoDías).

6.3.1.2. ALMACENAMIENTO EN ACUÍFEROS.

El almacenamiento de CO₂ en acuíferos subterráneos es una tecnología ampliamente utilizada y estudiada para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Consiste en la inyección de CO₂ capturado y comprimido a alta presión en formaciones acuíferas profundas y adecuadamente seleccionadas. Estas formaciones acuíferas deben tener características geológicas favorables, como una alta permeabilidad y capacidad de retención del CO₂, así como una buena integridad y aislamiento para evitar fugas.

El proceso de almacenamiento en acuíferos se realiza en varias etapas. Primero, se lleva a cabo una exhaustiva evaluación geológica y geofísica para identificar y caracterizar los acuíferos potenciales. Se recopila información sobre la porosidad, permeabilidad, espesor y continuidad de la formación acuífera, así como sobre las características del fluido y las propiedades químicas del agua subterránea. Esto ayuda a determinar la capacidad de almacenamiento y la viabilidad técnica del proyecto.

Una vez seleccionado el acuífero, se perforan pozos de inyección y extracción para permitir la inyección controlada del CO₂ y el monitoreo del proceso. El CO₂ se comprime y se inyecta a través de los pozos de inyección hasta alcanzar la formación acuífera que se tiene como objetivo. Una vez inyectado, el CO₂ puede experimentar diferentes procesos de retención, como la disolución en el agua subterránea, la adsorción en la matriz de la roca o la mineralización en minerales presentes en la formación.

Durante y después de la inyección, es fundamental realizar un monitoreo continuo para garantizar la seguridad y la efectividad del almacenamiento. Se realizan mediciones de presión y temperatura en los pozos de inyección y extracción, se toman muestras de agua subterránea para analizar la calidad y la composición química, y se realizan estudios geofísicos para evaluar la distribución y el comportamiento del CO₂ en acuífero. Esto permite detectar cualquier anomalía o fuga y tomar medidas correctivas si fuera necesario.

El almacenamiento de CO₂ en acuíferos ofrece varias ventajas. En primer lugar, los acuíferos profundos pueden tener una capacidad de almacenamiento significativa y pueden albergar grandes volúmenes de CO₂. Además, el CO₂ puede disolverse en el agua subterránea, lo que ayuda a reducir la movilidad y evita su liberación a la superficie. También se ha demostrado que el CO₂ inyectado en acuíferos puede mineralizarse y convertirse en minerales estables a largo plazo, lo que contribuye a su retención a largo plazo.

Sin embargo, también existen desafíos y consideraciones asociados al almacenamiento del CO₂ en acuíferos. Es importante asegurar la selección adecuada de los acuíferos, teniendo en cuenta factores como la integridad de las

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

formaciones geológicas, la distancia a fuentes de emisión y la capacidad de transporte del CO₂. Además, se deben implementar medidas de monitoreo y verificación a largo plazo para garantizar la seguridad y evitar fugas (IPCC).

6.3.1.3. CAPAS DE CARBONO PROFUNDAS.

Las capas de carbono profundo se refieren a las formaciones geológicas que contienen depósitos de carbono en profundidades considerablemente mayores bajo la superficie terrestre. Estas capas consisten principalmente de carbón mineralizado, que se ha formado a lo largo de millones de años a partir de materia orgánica vegetal en condiciones geológicas específicas.

El carbono contenido en estas capas profundas tiene un potencial significativo para el almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CO₂), lo que lo convierte en una estrategia prometedora para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y abordar el cambio climático. El proceso de almacenamiento implica capturar el CO₂ generado por fuentes industriales o de generación de energía y bombearlo a las capas de carbono profundas para su retención a largo plazo.

La naturaleza porosa y permeable de las capas de carbono profundo permite que el CO₂ se infiltre en la formación y se almacene en los espacios porosos. Estas capas suelen estar compuestas por rocas sedimentarias, como lutitas o pizarras, que contienen altas concentraciones de carbono y presentan una baja permeabilidad en comparación con otras formaciones geológicas.

La selección de las capas de carbono adecuadas para el almacenamiento de CO₂ implica una evaluación detallada de la geología regional y la caracterización de las capas en términos de porosidad, permeabilidad, capacidad de almacenamiento y propiedades mecánicas. También es esencial considerar la presencia de capas de sello impermeables que eviten la migración del CO₂ hacia otras formaciones o hacia la superficie.

Uno de los principales beneficios de utilizar capas de carbono profundo para el almacenamiento geológico es su capacidad de retener el CO₂ de manera segura durante largos períodos de tiempo. Debido a su ubicación en profundidades significativas, el CO₂ almacenado en estas capas se encuentra alejado de la atmósfera y de los ecosistemas terrestres, reduciendo así el riesgo de fugas o liberación del gas.

Sin embargo, es importante destacar que el almacenamiento en capas de carbono profundo todavía se encuentra en etapas tempranas de desarrollo y se requiere más investigación y evaluación para comprender plenamente sus implicaciones y viabilidad a largo plazo. Además, es fundamental llevar a cabo un monitoreo continuo y riguroso para garantizar la seguridad y la integridad de los sitios de almacenamiento.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

A medida que se avanza en la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, se espera que las capas de carbono profundo desempeñen un papel importante en la reducción de las emisiones de CO₂ y en la transición hacia un futuro más sostenible y con bajas emisiones de carbono (Pérez, 2006).

6.3.2. ALMACENAMIENTO OCEÁNICO.

El almacenamiento oceánico, también conocido como secuestro de carbono oceánico, es una estrategia que busca capturar y almacenar dióxido de carbono (CO₂) en los océanos como medida para mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este enfoque se basa en la capacidad del océano para absorber y retener grandes cantidades de CO₂.

El océano juega un papel fundamental en el ciclo del carbono, absorbiendo aproximadamente un tercio de las emisiones antropogénicas de CO₂. Este proceso se produce a través de la difusión del CO₂ atmosférico en la superficie del océano y su posterior disolución en el agua. El CO₂ disuelto puede ser transportado y almacenado en distintas áreas del océano, tanto en la superficie como en las profundidades.

El almacenamiento oceánico se puede llevar a cabo de diversas formas. Una de ellas es mediante la promoción de la fotosíntesis de organismos marinos, como las algas y las plantas marinas, que absorben CO₂ durante su crecimiento. Estos organismos pueden capturar grandes cantidades de carbono, y cuando mueren, su material orgánico puede hundirse hacia el fondo marino, llevando consigo el CO₂ almacenado.

Otra técnica de almacenamiento oceánico es la inyección directa de CO₂ en aguas profundas. Esta opción implica la captura y compresión del CO₂ producido por fuentes industriales o de generación de energía, y su posterior inyección en capas profundas del océano, donde se espera que se disuelva y se almacene de forma segura durante largos períodos de tiempo.

El almacenamiento oceánico ofrece ciertas ventajas, como la capacidad potencial de almacenar grandes volúmenes de CO₂ y la posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de manera rápida y eficiente. Sin embargo, también plantea preocupaciones y desafíos importantes. Se requiere un monitoreo riguroso para garantizar que el CO₂ almacenado no tenga efectos negativos en los ecosistemas marinos ni en la calidad del agua. Además, es necesario evaluar los impactos ambientales a largo plazo y considerar cuidadosamente los aspectos legales y regulatorios relacionados con el almacenamiento oceánico (Grande, 2014).

Es importante destacar que el almacenamiento oceánico no debe ser considerado como una solución única para abordar el cambio climático. Debe combinarse con medidas de reducción de emisiones en la fuente y el desarrollo de fuentes de energía más limpias y renovables. Además, se requiere una

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

evaluación cuidadosa de los posibles impactos ambientales y sociales antes de implementar proyectos de almacenamiento oceánico. En la Figura 16 se pueden observar algunos métodos de almacenamiento oceánico de CO₂.

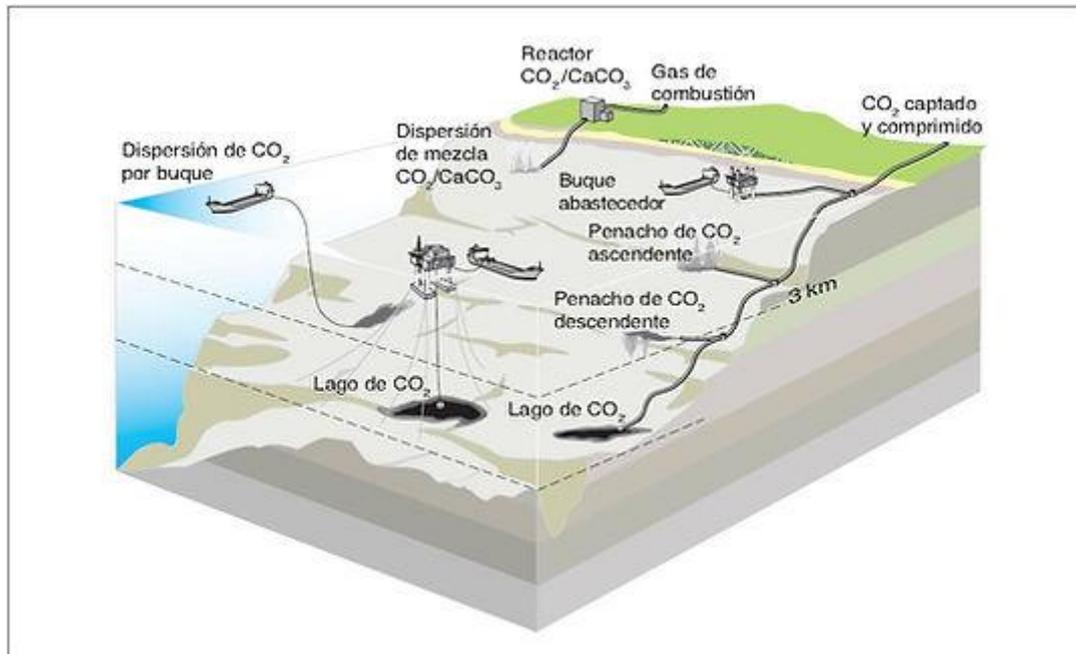


Figura 12. Métodos de almacenamiento oceánico (Fuente: Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).

6.4. USOS DEL CO₂.

En este apartado se detallan algunos usos del CO₂, motivado a que el CO₂ en lugar de almacenarse podría ser utilizados en diferentes procesos, bien sea directamente o como materia prima para transformarse en otros productos de valor añadido, disminuyendo así la problemática ambiental que este gas genera al emitirse en la atmósfera.

6.4.1. INYECCIÓN DE CO₂.

La inyección de CO₂ es una técnica ampliamente utilizada en diversos sectores, tanto industriales como ambientales. Consiste en la introducción controlada de dióxido de carbono en diferentes sistemas o procesos con el objetivo de lograr ciertos beneficios o mejoras (Bezzina, 2020).

6.4.1.1. Recuperación mejorada de hidrocarburos (EOR).

La inyección de CO₂ se utiliza en la industria petrolera y gasífera para la recuperación mejorada de hidrocarburos. En los yacimientos de petróleo y gas agotados, donde la producción convencional no es eficiente, la inyección de CO₂ permite mejorar la recuperación de los hidrocarburos remanentes. El CO₂ inyectado actúa como un fluido de desplazamiento, empujando los hidrocarburos hacia los pozos de producción. Esto aumenta la eficiencia de

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

extracción y permite obtener una mayor cantidad de petróleo o gas de los yacimientos.

6.4.1.2. Control de la acidificación del agua en acuicultura.

En la acuicultura, la inyección de CO₂ se utiliza para controlar y regular el pH y la alcalinidad del agua en los sistemas de cultivo. Esto es especialmente relevante en la acuicultura marina, donde la acidificación del agua puede afectar negativamente a la salud y al crecimiento de los organismos marinos. La inyección de CO₂ ayuda a mantener los niveles adecuados de pH y alcalinidad, proporcionando un entorno óptimo para el cultivo de especies marinas.

6.4.1.3. Control de pH en procesos industriales.

En ciertos procesos industriales, como la producción de alimentos, bebidas y productos químicos, es necesario controlar el pH de las soluciones. La inyección de CO₂ se utiliza para ajustar y regular el pH de estas soluciones, ya que el CO₂ reacciona con el agua formando ácido carbónico, lo que disminuye el pH de manera controlada. Esto permite mantener condiciones óptimas de reacción y calidad del producto final.

6.4.1.4. Extinción de incendios.

El CO₂ también se utiliza en sistemas de extinción de incendios, principalmente en áreas donde el uso de agua u otros agentes extintores podría causar daños adicionales, como en instalaciones eléctricas o en presencia de materiales sensibles al agua. El CO₂ se inyecta en el área afectada, reduciendo la concentración de oxígeno y sofocando el fuego.

6.5. UTILIZACIÓN COMO MATERIA PRIMA.

Una de las aplicaciones más prometedoras del CO₂, es que este gas causante del cambio climático puede transformarse en un gran recurso que está a nuestro alcance para frenar el calentamiento global. Aunque está presente en la naturaleza y es un elemento indispensable para nuestra vida, el derivado de la actividad humana e industrial es uno de los principales retos medioambientales, como se mostrará en el próximo capítulo. Las tecnologías y avances químicos han abierto la oportunidad de capturarlo y convertirlo en una materia prima de gran valor y potencial de aplicación. A continuación, se describen algunos productos que pueden obtenerse a partir del CO₂.

6.5.1. Polimetileno Espumado (PME).

El CO₂ se utiliza como materia prima en la producción de PME, que es un material plástico espumado ampliamente utilizado en diversas aplicaciones. El proceso de producción implica la polimerización del etileno utilizando catalizadores y, posteriormente, la incorporación de CO₂ durante la etapa de expansión. El

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

CO₂ actúa como agente de espumación, creando celdas de aire en la estructura del polímero, lo que confiere al PME sus propiedades de ligereza, aislamiento térmico y capacidad de adsorción de impactos.

6.5.2. Metanol (MeOH) / Dimetil éter (DME).

El CO₂ también puede ser utilizado como materia prima en la producción de metanol, un compuesto químico ampliamente utilizado en la industria química y como combustible. Existen diferentes rutas de síntesis del metanol a partir del CO₂ mediante catálisis. Este proceso convierte el CO₂ en metanol, que puede ser utilizado en la producción de plásticos, solventes, combustibles y otros productos químicos, en la Figura 17 se muestra un esquema del proceso de producción de metanol a partir de CO₂ (ABC).

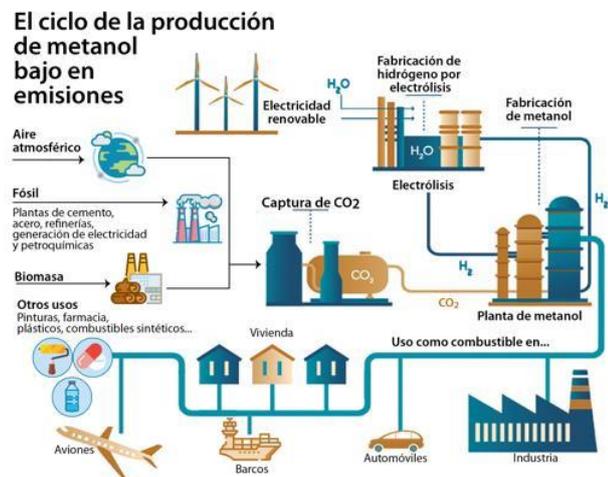


Figura 13. Esquema del proceso de la producción de metanol bajo en emisiones (Fuente: ABC).

El metanol producido a partir de CO₂ puede transformarse mediante catálisis en dimetil éter (DME), cuya fórmula química es CH₃OCH₃ y es el éter más simple. Las características del DME son similares a las de los gases licuados del petróleo (LPG). Por lo que puede usarse como combustible, tiene otros usos alternativos al transporte, como combustible de hogar o para generación de electricidad.

6.5.3. Producción de carbonatos.

En este caso, el CO₂ se utiliza como materia prima en la producción de carbonatos, como el carbonato de calcio y el carbonato de sodio. Estos compuestos son ampliamente utilizados en la industria de la construcción, la fabricación de vidrio, la producción de productos químicos y en otros sectores. El CO₂ reacciona con diferentes compuestos para formar carbonatos, lo que contribuye a la reutilización del CO₂ y reduce su liberación a la atmósfera (Castro-Osma, 2016).

6.5.4. Generación de urea.

Un compuesto químico utilizado, principalmente, como fertilizante y en la fabricación de productos químicos. La síntesis de urea implica la reacción del CO₂ con el amoníaco en un proceso conocido como síntesis de urea. Este proceso es fundamental en la industria agrícola, ya que permite la producción de fertilizantes nitrogenados necesarios para mejorar la productividad de los cultivos (Castro-Osma, 2016).

6.5.5. Síntesis de carbono orgánico.

El CO₂ se puede utilizar como materia prima en la síntesis de compuestos de carbono orgánico, como ácidos carboxílicos, alcoholes y otros productos químicos. Estos compuestos tienen una amplia gama de aplicaciones industriales, incluyendo la fabricación de plásticos, resinas, solventes y productos farmacéuticos. La utilización del CO₂ como materia prima en síntesis químicas puede contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover la utilización de recursos renovables (Castro-Osma, 2016).

Estos usos del CO₂ como materia prima ofrecen diversas ventajas como la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y la posibilidad de utilizar el CO₂ como un recurso valioso en lugar de considerarlo como un residuo. Sin embargo, es importante evaluar los aspectos técnicos, económicos y ambientales asociados a cada proceso de utilización del CO₂ como materia prima, incluyendo la eficiencia del proceso, los costos de producción, la disponibilidad de materias primas adicionales y los posibles impactos ambientales.

6.6. CONSIDERACIONES TÉCNICAS, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES.

6.6.1. CONSIDERACIONES TÉCNICAS.

6.6.1.1. Disponibilidad y calidad del CO₂.

Es necesario asegurar el suministro adecuado de CO₂, ya sea mediante su captura de fuentes industriales o su producción. Además, se debe garantizar que el CO₂ cumpla con los estándares de pureza y calidad necesarios para su uso en el proceso de inyección.

6.6.1.2. Selección de tecnología.

En la captura y almacenamiento de CO₂ (CCS), la selección de la tecnología adecuada es crucial para lograr una eficiente captura y aprovechamiento del CO₂. Existen diversas tecnologías de inyección de CO₂, cada una con sus ventajas y consideraciones específicas. Algunas de las tecnologías más investigadas incluyen la inyección en estado supercrítico, la inyección en fase líquida y la inyección asistida por solventes (Razi M.A, 2017).

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

La inyección en estado supercrítico implica la inyección de CO₂ en un estado donde combina propiedades de gas y líquido, lo que facilita su dispersión en el yacimiento y mejora la eficiencia de almacenamiento (Bezzina, P, 2020).

La inyección en fase líquida, por otro lado, implica la inyección de CO₂ en su estado líquido, lo que puede mejorar la movilidad y la distribución del CO₂ en el yacimiento (Mansoori, A, 2019).

Otra tecnología prometedora es la inyección asistida por solventes, que implica la adición de solventes al CO₂ para mejorar su capacidad de disolución y movilidad en el yacimiento (Yao, J, 2017).

En cuanto al uso del CO₂ como materia prima, se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la transformación del CO₂ en compuestos de valor añadido. Por ejemplo, se ha investigado la obtención de metanol a partir de CO₂ mediante diferentes rutas de síntesis catalítica (Centi, G y otros, 2009). Estos estudios exploran la viabilidad técnica y económica de convertir el CO₂ en metanol, un compuesto ampliamente utilizado en la industria química y como combustible alternativo.

Además, se han realizado investigaciones sobre la producción de dimetil éter (DME) a partir de CO₂, que es un combustible limpio con aplicaciones en la industria del transporte (Liu, D, 2017). Estos estudios evalúan las diferentes etapas de la síntesis de DME a partir de CO₂, incluyendo la captura y conversión del CO₂ en compuestos intermediarios que luego se utilizan en la producción de DME.

Estos estudios científicos demuestran el interés y los avances en la utilización del CO₂ como materia prima para la producción de compuestos de valor añadido. Sin embargo, es importante destacar que estos procesos aún se encuentran en etapas de desarrollo y se requiere una mayor investigación para optimizar la eficiencia y la viabilidad económica de estas tecnologías.

6.6.2. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.

6.6.2.1. Costos de captura y almacenamiento.

La captura y el almacenamiento de CO₂ puede implicar costos significativos, que incluyen la instalación y operación de equipos de captura, el transporte de CO₂ y la preparación de los sitios de almacenamiento. Es fundamental realizar un análisis económico exhaustivo para evaluar la viabilidad financiera de la aplicación de la tecnología de inyección.

6.6.2.2. Valorización del CO₂.

En algunos casos, la valorización del CO₂ puede ayudar a mitigar los costos asociados con su captura y almacenamiento. Por ejemplo, si el CO₂ capturado se utiliza como materia prima en la producción de productos químicos o

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

combustibles, puede generar ingresos adicionales que compensen parte de los gastos.

6.6.3. CONSIDERACIONES AMBIENTALES.

6.6.3.1. Evaluación del ciclo de vida.

Es importante realizar una evaluación completa del ciclo de vida de tecnología de inyección de CO₂ considerando tanto las emisiones reducidas de gases de efecto invernadero como otros impactos ambientales asociados, como el consumo de energía, el uso de recursos naturales y los posibles efectos secundario en la calidad del agua o la biodiversidad.

6.6.3.2. Monitoreo y seguimiento.

Para garantizar la seguridad y la efectividad a largo plazo de la inyección de CO₂, es necesario implementar sistemas de monitoreo y seguimiento adecuados. Esto implica la supervisión de la migración del CO₂, la integridad de los sitios de almacenamiento y cualquier impacto potencial en los sistemas ambientales circundantes.

CAPÍTULO 7. IMPACTO AMBIENTAL DEL CO₂.

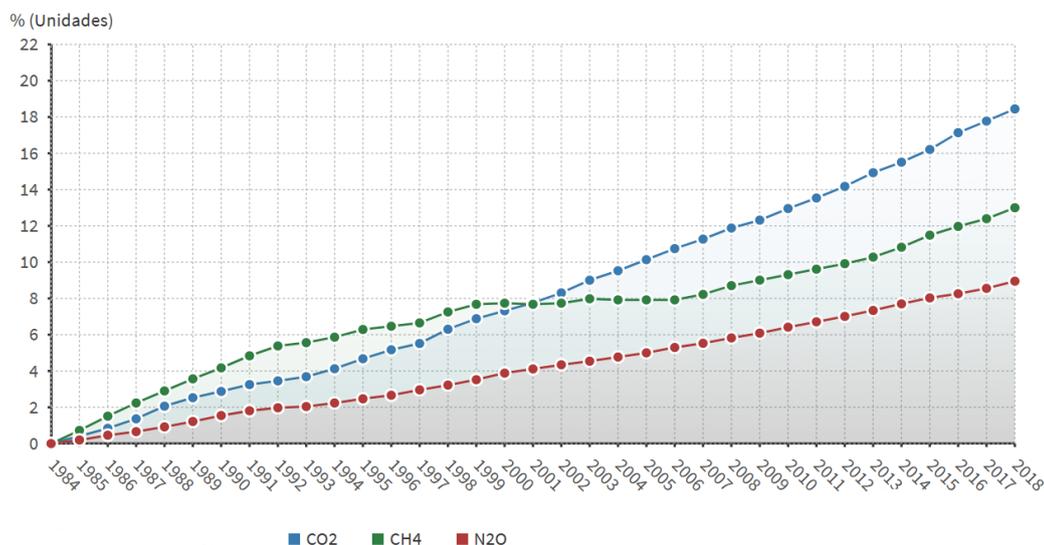
BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. Su acumulación en la atmósfera tiene impactos significativos en el medio ambiente a nivel global, afectando tanto a los ecosistemas marinos como a los terrestres. Además, se espera que el aumento continuo de las concentraciones de CO₂ tenga repercusiones importantes en la salud humana y el medio ambiente en el futuro.

7.1. EFECTO INVERNADERO Y CAMBIO CLIMÁTICO.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ocurre en la atmósfera de la Tierra y juega un papel crucial en el mantenimiento de las condiciones climáticas adecuadas para la vida en este planeta. Se produce cuando ciertos gases presentes en la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), capturan y retienen parte del calor emitido por la Tierra. Sin el efecto invernadero, la temperatura promedio de la Tierra sería mucho más fría y no sería posible la vida tal como se conoce.

Durante los últimos diez años, las concentraciones de CH₄ y N₂O han ascendido, según las observaciones de la red de la Vigilancia de la Atmósfera Global de la Organización Meteorológica Mundial y se obtiene un aumento del 18,4% de CO₂, un 13% del CH₄ y un 9% de N₂O, como se aprecia en la Gráfica 10.



Gráfica 10. Variación de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1984 (Fuente: IMM, www.epdata.es).

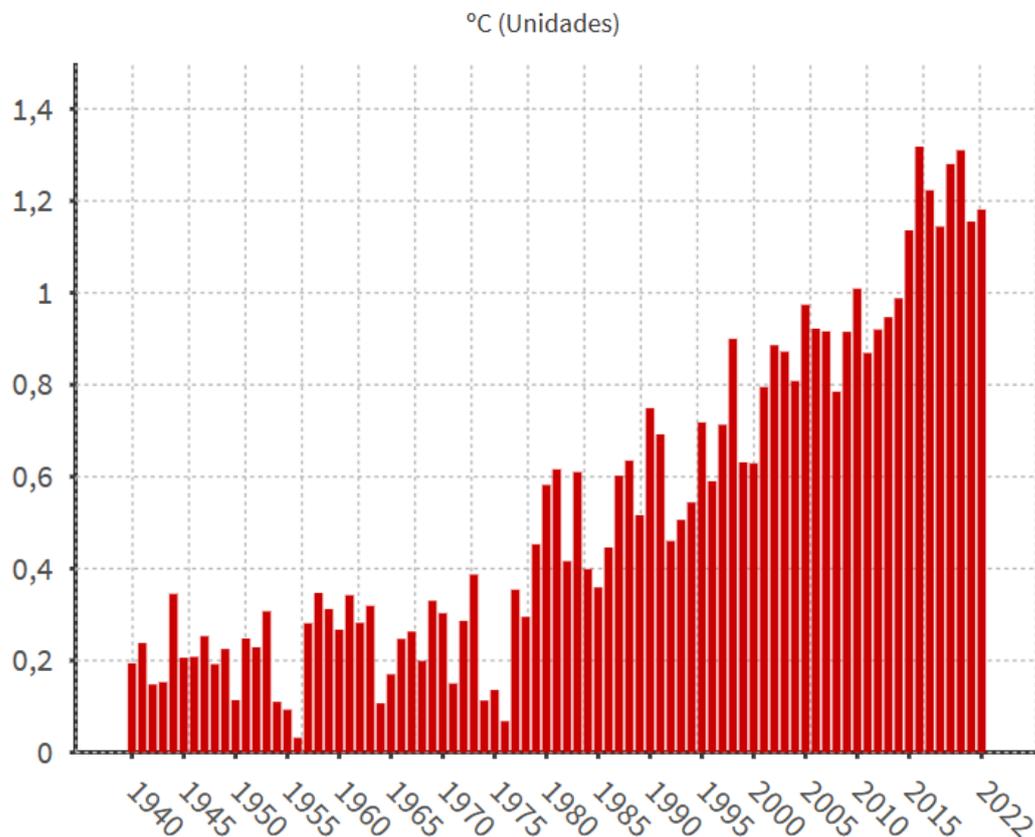
En las últimas décadas, las actividades humanas, especialmente, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la industrialización, han llevado a un aumento significativo de las concentraciones de gases de efecto invernadero en

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

la atmósfera. Este aumento desequilibrado de gases ha intensificado el efecto invernadero y ha generado el fenómeno conocido como cambio climático.

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo en los patrones climáticos de la Tierra, incluyendo cambios en las temperaturas, los patrones de precipitación, los eventos climáticos extremos y los niveles del mar. Estos cambios están directamente relacionados con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la actividad humana.

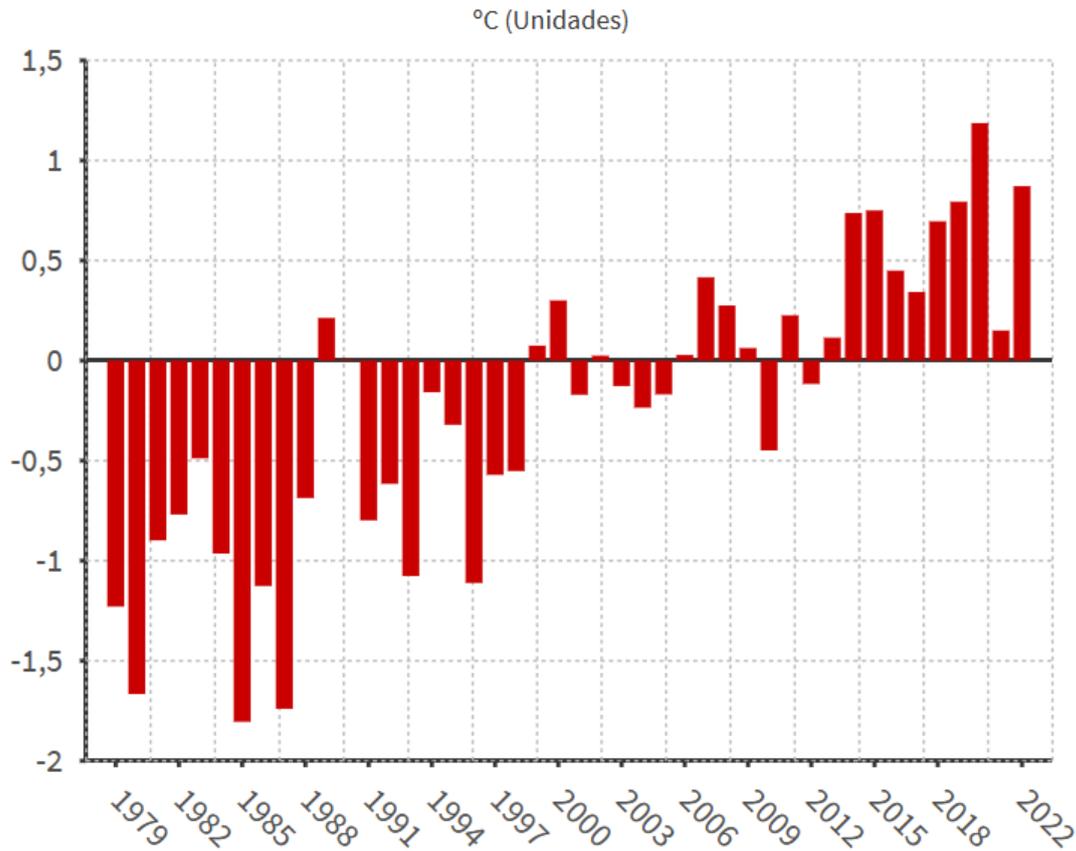
Desde el punto de vista de los cambios de temperatura, se tiene que el año 2022 concluyó como el quinto más cálido a nivel mundial desde que hay registros y el octavo consecutivo en el que la temperatura media global supera en 1 grado centígrado (°C) el valor promedio previo a la Revolución Industrial (1850), como se puede observar en la Gráfica 11.



Gráfica 11. Incremento de la temperatura global (Fuente: Copernicus, www.epdata.es).

En la Gráfica 12 se muestra la variación estimada de la temperatura en la superficie a escala mundial por encima de los niveles de referencia desde el año 1979 hasta el 2022. Las áreas sobre la línea de referencia indican un calentamiento por encima de los niveles normales, mientras que las áreas por debajo indican un enfriamiento.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.



Gráfica 12. Variación estimada de la temperatura en superficie a escala mundial por encima de los niveles de referencia de 1979-2022 (Fuente: Copernicus, www.epdata.es).

El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero causado por la actividad humana. Su liberación proviene, principalmente, de la quema de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural, el carbón, utilizados en la generación de energía, el transporte, la industria y la calefacción. La deforestación también contribuye al aumento del CO₂, ya que, los árboles absorben CO₂ durante la fotosíntesis y liberan carbono cuando se talan o queman.

El aumento de las concentraciones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera ha llevado a un calentamiento global significativo. Las temperaturas promedio de la Tierra han aumentado en las últimas décadas y se espera que continúen aumentando en el futuro si no se toman medidas adecuadas. Este calentamiento tiene numerosas consecuencias, tanto a nivel global como local.

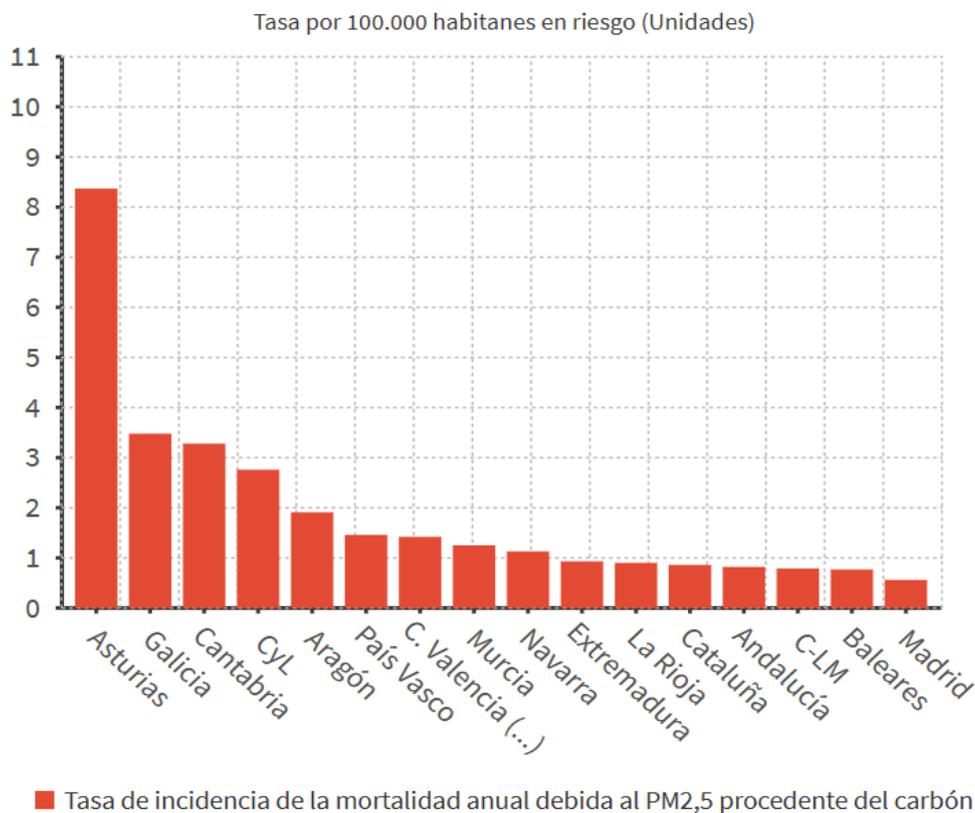
A nivel global, el calentamiento global ha llevado al derretimiento de los casquetes polares y los glaciares, lo que ha contribuido al aumento del nivel del mar. Esto representa una amenaza para las comunidades y los ecosistemas costeros, aumentando el riesgo de inundaciones y la pérdida de hábitats costeros.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

Además, el cambio climático ha alterado los patrones de precipitación, llevando a sequías e inundaciones más frecuentes e intensas. Esto tiene un impacto significativo en la disponibilidad de agua dulce, la producción agrícola y la seguridad alimentaria.

A nivel local, el cambio climático puede tener efectos diversos en diferentes regiones del mundo. Algunas áreas pueden experimentar un aumento de las temperaturas y una mayor frecuencia de olas de calor, lo que representa un riesgo para la salud humana, especialmente para los grupos vulnerables como los niños, los ancianos y las personas con enfermedades crónicas. Otras regiones pueden enfrentar un aumento de eventos climáticos extremos, como tormentas más intensas, ciclones tropicales y sequías prolongadas.

Desde el punto de vista de la salud humana, según un informe presentado por el Instituto Internacional de Derecho y Medio Ambiente (IIDMA), se ha establecido una relación entre las emisiones de las centrales térmicas del carbón en España y un total de 1.529 muertes prematuras durante los años 2015 y 2016. El estudio destaca que las comunidades autónomas más afectadas por muertes prematuras debido a las emisiones de carbón fueron Asturias, Galicia y Cantabria. En estas regiones, se registró una incidencia de entre 3 y 9 personas por cada 100.000 habitantes en riesgo (Gráfica 13).



Gráfica 13. Muertes prematuras debidas a emisiones de carbón por comunidades autónomas (Fuente: IIDMA, www.epdata.es).

Si observamos eventos extremos se tiene que los países que más han sufrido los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos entre 2000 y 2019 son Puerto Rico, Myanmar y Haití y los que más pérdidas han tenido a consecuencia de eventos extremos. En la Figura 14 se ilustran los índices de riesgo climático de cada país.

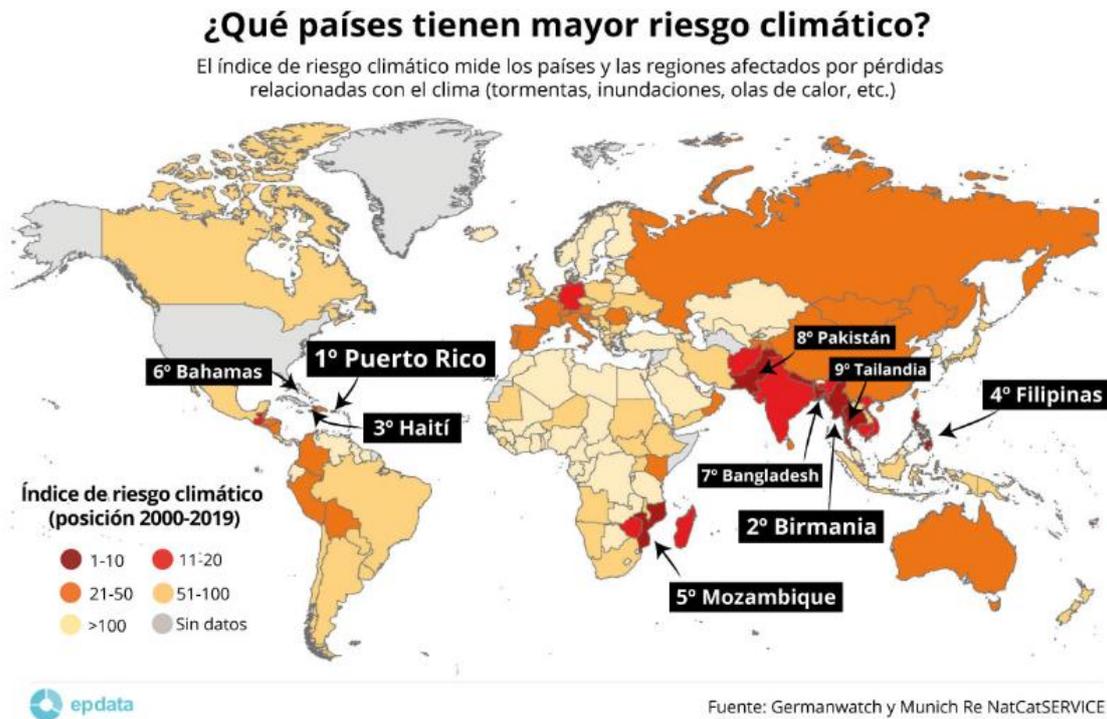


Figura 14. Países con mayor riesgo climático (Fuente: Germanwatch).

7.2. IMPACTO DEL CO₂ EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS Y TERRESTRES.

El aumento de las emisiones de CO₂ debido a la actividad humana está teniendo un impacto significativo en los ecosistemas marinos y terrestres en todo el mundo. A medida que el CO₂ se acumula en la atmósfera, una parte se disuelve en los océanos, lo que conduce a una serie de cambios químicos y físicos en el medio marino. A su vez, el aumento de CO₂ en la atmósfera también afecta directamente a los ecosistemas terrestres.

7.2.1. ECOSISTEMAS MARINOS

7.2.1.1. Acidificación de los océanos.

El CO₂ disuelto en los océanos reacciona con el agua y forma ácido carbónico, lo que resulta en una disminución del pH del agua de mar. Esto provoca la acidificación de los océanos, lo cual tiene consecuencias negativas para los organismos marinos que dependen de un entorno químico estable. La acidificación puede afectar el crecimiento y desarrollo de corales, moluscos, plancton y otros organismos marinos que contribuyen conchas o esqueletos de carbonato de calcio

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

Por ejemplo, el Instituto Australiano de Ciencia Marina ha emitido una advertencia sobre el estado de la Gran Barrera de Coral de Australia, ubicada en la costa oriental del país. Según el informe, durante los últimos veinte años, la barrera de coral ha experimentado una reducción del 14%. Esta disminución se atribuye al aumento de la acidez del agua marina. Como resultado, la supervivencia de la Gran Barrera de Coral se encuentra en grave peligro. Si la tendencia actual continúa, se proyecta que dejará de crecer aproximadamente en el año 2050. Es crucial tomar medidas para contrarrestar el incremento en la acidez del agua y preservar este valioso ecosistema coralino.

7.2.1.2. Impacto en los organismos marinos.

El aumento de CO₂ también puede tener efectos directos sobre los organismos marinos. Por ejemplo, la acidificación del océano puede afectar negativamente el crecimiento de larvas y juveniles de peces, así como la reproducción y supervivencia de otros organismos marinos, como los corales, pueden sufrir estrés y blanqueamiento debido al cambio en las condiciones químicas del agua.

7.2.1.3. Cambios en los ecosistemas marinos.

La alteración de los organismos marinos y los procesos biológicos debido a la acidificación y otros efectos del CO₂ pueden tener consecuencias en cascada en los ecosistemas marinos. Por ejemplo, la disminución de la disponibilidad de organismos con conchas o esqueletos de carbonato de calcio puede afectar la cadena alimentaria marina y la biodiversidad en general.

7.2.2. ECOSISTEMAS TERRESTRES:

7.2.2.1. Cambios en la vegetación y los ciclos biogeoquímicos.

El aumento de CO₂ en la atmósfera puede afectar la fotosíntesis de las plantas, estimulando su crecimiento en algunas regiones. Sin embargo, también puede alterar los patrones de distribución de las especies vegetales y los ciclos biogeoquímicos. Por ejemplo, se ha observado que algunas especies de plantas tiene mayor capacidad para retener el carbono en respuesta al aumento de CO₂, lo que puede tener efectos en la disponibilidad de nutrientes en el suelo y en la composición de la vegetación.

7.2.2.2. Cambios en los patrones de precipitación.

El aumento de CO₂ también puede tener efectos en los patrones de precipitación a nivel regional. Se ha observado que el cambio climático causado por el aumento de CO₂ puede alterar la distribución y la cantidad de lluvia en diferentes regiones, lo que a su vez afecta a la disponibilidad del agua y los patrones de vegetación.

7.2.2.3. Impacto en la biodiversidad.

Los cambios en los ecosistemas terrestres debido al aumento de CO₂ pueden tener consecuencias en la biodiversidad. Las especies vegetales y animales

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

pueden verse afectadas por los cambios en la disponibilidad de recursos, la competencia con especies invasoras y la pérdida de hábitats. Esto puede tener efectos en cascada en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres.

En tan solo tres meses (23 de abril de 2016 al 18 de julio de 2016) el Lago Urmia ha experimentado una transformación total en su apariencia. Este cambio se debe al crecimiento desmedido de algas y bacterias, ocasionado por el incremento de temperatura y salinidad del agua, como se observa en la Figura 15. Aunque este fenómeno suele ocurrir durante el verano, la situación se agrava debido a la pérdida del 70% de su superficie en los últimos 14 años. Esta combinación de factores ejerce un impacto significativo en la salud y el equilibrio del ecosistema del lago Urmia.

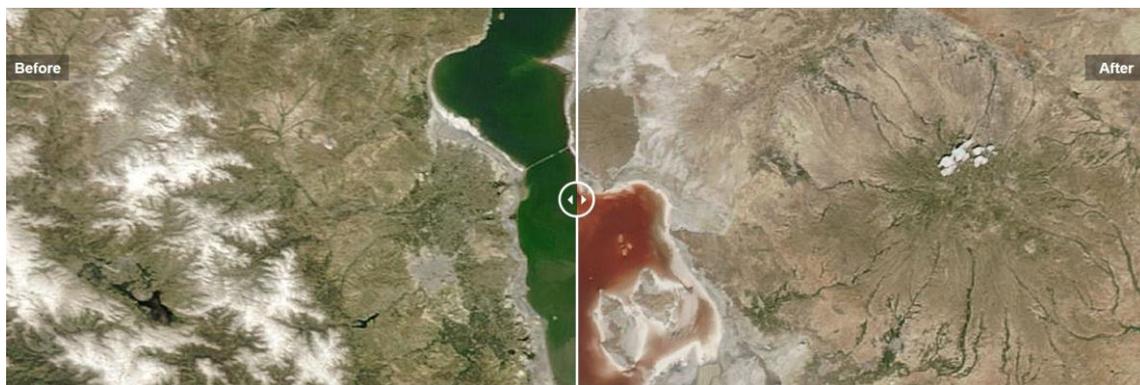


Figura 15. El antes y después del Lago Urmia, Irán (Fuente: Zahumenszky, C, 2017)

7.3. PERSPECTIVA FUTURA DEL IMPACTO DEL CO₂ EN LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE.

La perspectiva futura del impacto del CO₂ en la salud y el medio ambiente es motivo de preocupación debido a los efectos adversos que se esperan en diversos aspectos. A medida que las concentraciones de CO₂ continúan aumentando en la atmósfera debido a las actividades humanas, se prevé que estos impactos se intensifiquen en las próximas décadas.

7.3.1. IMPACTO EN LA SALUD HUMANA.

El aumento del CO₂ puede tener consecuencias directas e indirectas en la salud humana. Los efectos directos incluyen un mayor riesgo de enfermedades respiratorias, como el asma y las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, debido a la calidad del aire deteriorada. Además, altas concentraciones de CO₂ en espacios interiores pueden provocar síntomas como dolores de cabeza, fatiga y dificultades para concentrarse.

Los efectos indirectos del CO₂ en la salud humana están relacionados con el cambio climático. El aumento de las temperaturas debido al CO₂ puede contribuir

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

a un mayor riesgo de enfermedades transmitidas por vectores, como el dengue y la malaria, ya que los mosquitos y otros organismos propagadores de enfermedades se benefician del clima cálido. Además, los cambios en los patrones de precipitación pueden afectar, como se ha mencionado anteriormente, a la disponibilidad de agua potable y aumentar la propagación de enfermedades transmitidas por el agua.

7.3.2. IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE.

El CO₂ desempeña un papel clave en el cambio climático y, por lo tanto, tiene efectos significativos en el medio ambiente. El aumento de las concentraciones de CO₂ está relacionado con un aumento de las temperaturas globales, lo que provoca el derretimiento de los casquetes de hielo, el aumento del nivel del mar y cambios en los patrones climáticos.

En resumen, estos cambios climáticos pueden tener consecuencias negativas en los ecosistemas terrestres y marinos. Por ejemplo, la acidificación de los océanos debido a la absorción de CO₂ altera el equilibrio químico del agua y puede afectar de forma negativa a los organismos marinos, como los corales y moluscos, que dependen de un ambiente marino estable para su supervivencia.

Además, el cambio climático causado por el CO₂ también puede resultar en la pérdida de biodiversidad, la alteración de los patrones de migración de las especies, la desertificación y la degradación de los ecosistemas terrestres.

Si se observa más detalladamente, según la NASA, el incremento del nivel del mar se debe principalmente a dos factores asociados al calentamiento global: la fusión de las capas de hielo y los glaciares, así como la expansión del agua del mar debido al calentamiento. En la actualidad, el nivel del mar se encuentra aproximadamente 10 centímetros por encima de su extensión en 1993, como se muestra en la Figura 16.

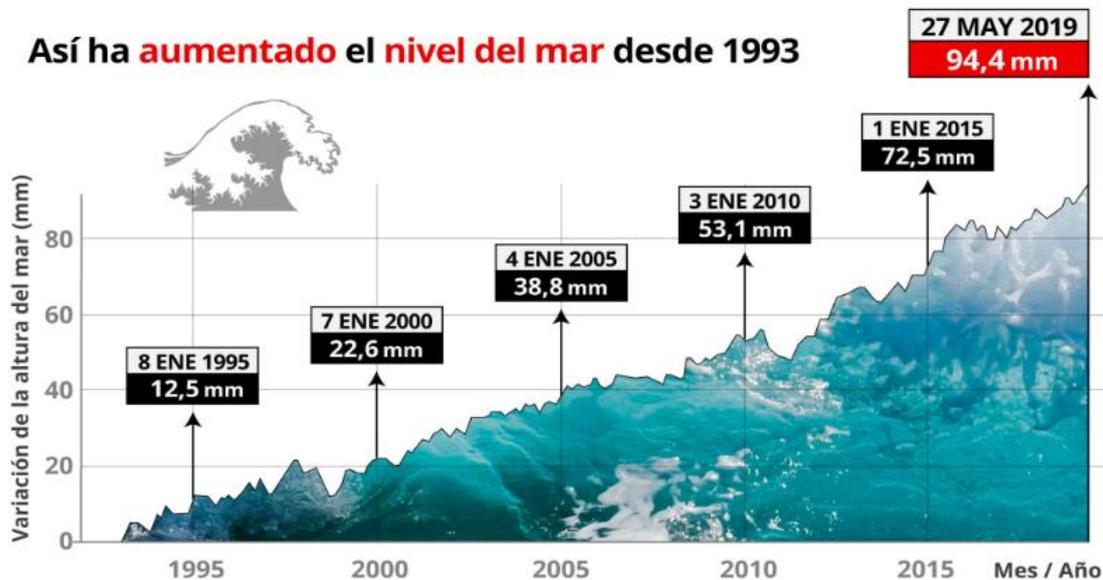


Figura 16. Aumento del nivel del mar (Fuente: Revistapetlovers).

Según un informe reciente del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se estima que para el año 2100, el nivel del mar podría aumentar entre 0,43 y 0,84 metros. Esta estimación se basa en diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. El rango más bajo de aumento corresponde al escenario de emisiones más bajo, mientras que el rango más alto se asocia con el escenario de emisiones más alto (Figura 17).



Figura 17. Estimación del incremento del nivel del mar (Fuente: Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).

7.4. MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN.

Ante la perspectiva futura del impacto del CO₂ en la salud y en el medio ambiente, es crucial tomar medidas de mitigación y adaptación. La reducción de las emisiones de CO₂ a través de la transición a fuentes de energía renovable, la eficiencia energética y la promoción de prácticas sostenibles es fundamental para frenar el cambio climático y minimizar sus efectos negativos.

Además, se requiere una adaptación adecuada para hacer frente a los impactos inevitables del CO₂ en la salud y el medio ambiente. Esto implica el desarrollo de infraestructuras resilientes, la implementación de estrategias de gestión de riesgos y la promoción de prácticas agrícolas y forestales sostenibles.

7.5. EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS E IMPACTO AMBIENTAL DE LA CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂.

La evaluación de riesgos e impacto ambiental varía dependiendo del tipo de almacenamiento, ya sea geológico u oceánico, y presenta distintos riesgos y consecuencias.

7.5.1. Riesgos del almacenamiento geológico.

Se dividen en dos categorías: riesgos a nivel global y riesgos a nivel local.

El riesgo a nivel global implica la liberación de una fracción de CO₂ a la atmósfera, contribuyendo al cambio climático. Además, existe el riesgo de afectar a seres humanos, ecosistemas y aguas subterráneas, entre otros, que son los riesgos locales.

En cuanto a los riesgos a nivel global, los análisis y observaciones de sitios donde se ha almacenado CO₂ muestran altas probabilidades (entre el 90% y 99%) de retención adecuada de las fracciones a lo largo de un período de 100 años. Se espera que la probabilidad de fugas disminuya a medida que los mecanismos de retención adicional actúen. En cuanto a los riesgos locales, se identifican dos escenarios donde pueden ocurrir fugas. En primer lugar, los fallos en los pozos de inyección o fugas en pozos abandonados pueden dar lugar a una liberación rápida de CO₂.

El principal riesgo en este tipo de fugas afecta principalmente a los trabajadores cercanos. Estos riesgos suelen ser gestionados de manera efectiva mediante controles técnicos y administrativos en la industria del petróleo y el gas.

El segundo escenario de fugas ocurre a través de fallas o fracturas no detectadas. Estos peligros afectan principalmente a acuíferos de agua potable, ecosistemas y aguas subterráneas, generando acidez en los suelos y desplazando el oxígeno presente.

Para reducir eficazmente estos riesgos, es importante diseñar y ubicar adecuadamente el sistema de almacenamiento, así como implementar métodos de detección de fugas. La vigilancia continua puede ser muy efectiva, pero es

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO_2 COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

necesario contar con experiencia para establecer niveles y resolución de detección. Una vez que se detectan las fugas, existen técnicas de mitigación y control disponibles. En la Figura 18 se muestra un análisis de riesgo de un almacenamiento geológico de CO_2 .

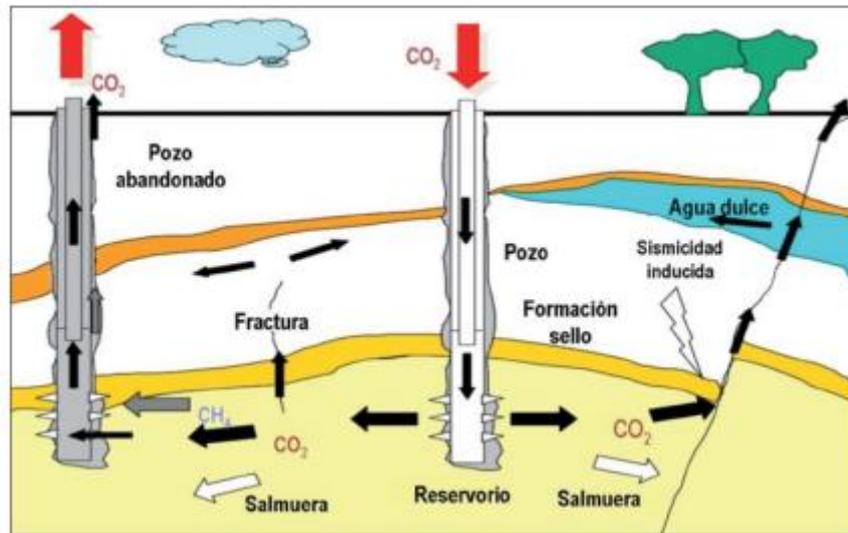


Figura 18. Análisis de riesgo de un almacenamiento geológico de CO_2
(Fuente: Abós García, y otros, 2012).

7.5.2. Riesgos del almacenamiento oceánico:

Los experimentos demuestran que la inyección de CO_2 puede afectar a los organismos marinos, especialmente aquellos que viven cerca de la superficie del océano. Estos efectos incluyen impactos directos en la reproducción, crecimiento, suministro de oxígeno y movilidad de los organismos marinos.

CAPÍTULO 8. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN SOBRE CCS.

8.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PROYECTOS DE CCS EN ESPAÑA Y CANARIAS.

En España y Canarias se están llevando a cabo proyectos de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CCS) con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático. Estos proyectos incluyen la captura de CO₂ proveniente de fuentes industriales y su posterior almacenamiento seguro a largo plazo en formaciones geológicas.

8.1.1. PROYECTO CASTOR.

Este proyecto es una iniciativa ubicada en la costa de la provincia de Castellón, en España. Inicialmente concebido como un proyecto de almacenamiento de gas natural, también se ha considerado su potencial para el almacenamiento de CO₂.

El objetivo principal es utilizar una formación geológica submarina conocida como el almacén Castor para almacenar gas natural y/o CO₂. Esta formación geológica consiste en un antiguo yacimiento de gas natural que se encuentra a una profundidad de aproximadamente 1750 metros debajo del lecho marino.

El proceso de captura de CO₂ involucra la extracción del gas natural y la inyección de CO₂ en el almacén Castor. Se utilizan técnicas de captura postcombustión, que implican la separación del CO₂ de los gases de combustión generados en la central térmica de gas asociada.

En cuanto al almacenamiento de CO₂, se estima que el almacén Castor tiene una capacidad de almacenamiento significativa. El CO₂ se inyecta a través de pozos de inyección y se desplaza hacia las rocas porosas y permeables de la formación geológicas, donde queda atrapado de forma segura a largo plazo.

El Proyecto Castor ha sido objeto de evaluaciones y estudios exhaustivos para garantizar su viabilidad técnica y ambiental. Se han llevado a cabo estudios geológicos, de modelado y monitoreo para comprender mejor las características del almacén y predecir el comportamiento del CO₂ almacenado.

Este proyecto ha enfrentado de desafíos y controversias en su desarrollo. En 2013, se produjo un evento sísmico asociado a las operaciones de inyección de gas, lo que llevó a la suspensión temporal del proyecto y su posterior cierre definitivo. Desde entonces, se han llevado a cabo investigaciones adicionales y se ha implementado un programa de monitoreo para evaluar y mitigar los posibles riesgos sísmicos (La Vanguardia).

8.1.2. PROYECTO TOSCA.

El Proyecto TOSCA (Tackling Oil Spills and Coastal Awareness Network) es una iniciativa de investigación y desarrollo que se centra en abordar el problema de la saturación del océano por el carbono. El proyecto tiene como objetivo principal

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

comprender mejor el ciclo de carbono en los océanos y desarrollar estrategias para mitigar los efectos del exceso de CO₂ en el medio marino.

El Proyecto TOSCA cuenta con la participación de numerosas instituciones científicas, académicas y gubernamentales de diferentes países. A través de una colaboración multidisciplinaria, se llevan a cabo investigaciones y análisis de diversas áreas relacionadas con el carbono y los océanos.

Uno de los principales enfoques del Proyecto TOSCA es estudiar los procesos de absorción y almacenamiento de CO₂ en los océanos. Se investiga cómo el CO₂ se disuelve en el agua de mar y cómo es transportado y almacenado en diferentes regiones oceánicas. Esto incluye el estudio de las propiedades químicas del carbono disuelto, la interacción con los organismos marinos y los factores que influyen en la capacidad del océano para absorber y retener el CO₂.

Además, el Proyecto TOSCA también se centra en evaluar los impactos del aumento de la concentración de CO₂ en los océanos. Se investiga cómo afecta la química del agua del mar, la acidificación de los océanos, los ecosistemas marinos y la biodiversidad. Se realizan estudios a largo plazo para comprender mejor los cambios en los ecosistemas marinos y los posibles efectos en la cadena alimentaria y las especies vulnerables.

Otro aspecto importante del Proyecto TOSCA es el desarrollo de estrategias y tecnologías de mitigación del CO₂ en el medio marino. Se investiga el potencial de técnicas como la fertilización oceánica, que implican la adición de nutrientes al agua de mar para promover el crecimiento de fitoplancton, que a su vez absorbe el CO₂. Se evalúan los beneficios, los posibles impactos ambientales y la viabilidad técnica de estas estrategias (Keep.eu).

8.2. ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS EN LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE CCS.

8.2.1. AVANCES EN TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO₂.

En las últimas décadas, ha habido avances significativos en el desarrollo de tecnologías de captura de CO₂, tanto en términos de eficiencia como de viabilidad económica. Estos avances han permitido abordar los desafíos asociados con la captura y reducción de las emisiones de CO₂ en diversos sectores industriales y de generación de energía. A continuación, se describen los principales avances en estas tecnologías:

- **Captura postcombustión:** La tecnología de captura postcombustión se ha mejorado mediante el desarrollo de solventes más eficientes y selectivos. Estos solventes permiten una captura más efectiva de CO₂ de los gases de escape de las plantas de energía y las instalaciones industriales. Se han realizado investigaciones para optimizar la composición y las propiedades

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

de los solventes, lo que ha llevado a una mayor eficiencia en la captura de CO₂.

- **Captura precombustión:** Los avances en la tecnología de gasificación y reformado han permitido una captura más eficiente de CO₂ en etapas anteriores al proceso de combustión. Esta tecnología se aplica principalmente en la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Se han desarrollado técnicas mejoradas de separación y purificación de gases, lo que ha facilitado la captura temprana del CO₂ antes de la combustión.
- **Captura de alta temperatura:** Se han desarrollado tecnologías de captura de CO₂ que pueden funcionar a altas temperaturas, lo que permite su integración directa en procesos industriales de alta temperatura, como la producción de acero y cemento. Estas tecnologías aprovechan los flujos de gas de alta temperatura para capturar el CO₂ de manera eficiente, minimizando los costos energéticos asociados.
- **Captura directa del aire:** Se han realizado avances en la tecnología de captura directa del aire, que permite extraer CO₂ directamente de la atmósfera. Esta tecnología utiliza materiales absorbentes o reactivos para capturar y concentrar el CO₂ presente en el aire. Aunque aún se encuentra en etapas de desarrollo, muestra un gran potencial para abordar las emisiones históricas de CO₂ y contribuir a la reducción de las concentraciones atmosféricas.
- **Mejora de la eficiencia energética:** Se han realizado esfuerzos para mejorar la eficiencia energética de los procesos de captura de CO₂. Esto incluye la optimización de los sistemas de captura, el desarrollo de tecnologías de regeneración de solventes más eficientes y la reducción de las pérdidas de energía durante el proceso de captura. Estos avances contribuyen a la reducción de los costos operativos y la huella de carbono asociada con las tecnologías de captura.

Es importante destacar que, si bien ha habido avances significativos en las tecnologías de captura de CO₂, aún existen desafíos por superar. Estos incluyen la reducción de los costos de implementación de estas tecnologías a gran escala, así como la necesidad de desarrollar métodos sostenibles de almacenamiento a largo plazo para el CO₂ capturado. A pesar de estos desafíos, el progreso continuo en la investigación y el desarrollo de estas tecnologías brinda esperanzas para lograr una reducción efectiva de las emisiones de CO₂ y mitigar los efectos del cambio climático.

8.2.2. DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO.

Se están realizando investigaciones para mejorar las técnicas de almacenamiento de CO₂. Esto incluye el estudio de la inyección de CO₂ en acuíferos, la utilización de formaciones geológicas como reservorios de

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

almacenamiento y la evaluación de la seguridad y la integridad de los sitios de almacenamiento a largo plazo (apartado 6.1.2).

Estos esfuerzos se centran en diversos aspectos clave:

- **Inyección de CO₂ en Acuíferos:** Se están llevando a cabo investigaciones para comprender mejor la capacidad de los acuíferos para almacenar CO₂ de manera segura y estable. Esto implica estudiar la porosidad y permeabilidad de los acuíferos, así como las características geoquímicas que pueden afectar la retención del CO₂. Además, se están desarrollando modelos avanzados para simular y predecir el comportamiento del CO₂ inyectado en los acuíferos.
- **Utilización de Formaciones Geológicas:** Las formaciones geológicas, como yacimientos de petróleo y gas agotados, capas de carbón y acuíferos salinos, están siendo evaluadas como posibles reservorios de almacenamiento de CO₂. Se están realizando estudios detallados para comprender la capacidad de estas formaciones para retener de manera segura grandes volúmenes de CO₂ a largo plazo. Esto implica investigar las características geológicas de las formaciones, la capacidad de sellado de las capas superiores y la estabilidad mecánica de los sitios de almacenamiento.
- **Exploración de Opciones de Offshore:** El almacenamiento de CO₂ en el lecho marino también está siendo investigado como una opción viable. Se están realizando estudios para evaluar la idoneidad de las formaciones geológicas submarinas para el almacenamiento seguro de CO₂. Esto incluye el análisis de la estabilidad del lecho marino, las características de permeabilidad y la interacción entre el CO₂ almacenado y los ecosistemas marinos.
- **Evaluación de la Seguridad y la Integridad a Largo Plazo:** Se están llevando a cabo investigaciones para evaluar y garantizar la seguridad y la integridad de los sitios de almacenamiento de CO₂ a lo largo del tiempo. Esto implica el monitoreo continuo de los sitios de almacenamiento para detectar posibles fugas de CO₂ y evaluar el impacto ambiental. También se están desarrollando técnicas de monitoreo avanzadas, como la monitorización sísmica y la monitorización de gases, para garantizar la detección temprana de cualquier anomalía.

8.2.3. INTEGRACIÓN CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE.

Se están investigando enfoques para integrar la captura y almacenamiento de CO₂ con fuentes de energía renovable, como la energía eólica y solar. Esto implica el desarrollo de sistemas de energía integrados que permiten la captura de CO₂ en los procesos de generación de energía y su almacenamiento seguro, lo que contribuye a la descarbonización de los sectores energéticos.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

El costo promedio de evitar la emisión de 1 tonelada de CO₂ mientras se produce una unidad de producto (por ejemplo, 1 MWh de electricidad en el caso de una planta de ciclo combinado de gas natural) se conoce como costo del CO₂ evitado, expresado en euros por tonelada de CO₂.

$$\frac{(\text{COE})_{\text{CCS}} - (\text{COE})_{\text{ref}}}{(\text{tCO}_2/\text{MWh})_{\text{ref}} - (\text{tCO}_2/\text{MWh})_{\text{CCS}}}$$

En la fórmula mencionada, COE representa el costo de la electricidad generada en euros por MWh, tCO₂/MWh es el factor de emisión de CO₂ del proceso, y los subíndices "CCS" y "REF" se refieren a plantas con y sin CCS, respectivamente. Es importante tener en cuenta que, para una comparación precisa con el costo de los derechos de emisión de CO₂ en un esquema como el Sistema de Comercio de Emisiones (ETS) de la Unión Europea, se deben agregar los costos de transporte y almacenamiento, como lo indica el subíndice "S".

Sin embargo, en el contexto de este apartado, nos enfocaremos en la captura de CO₂ para obtener una materia prima para procesos de conversión posteriores. Por lo tanto, es más relevante trabajar con el concepto de costo del CO₂ capturado, también expresado en euros por tonelada de CO₂ (€/t de CO₂).

$$\frac{(\text{COE})_{\text{CC}} - (\text{COE})_{\text{ref}}}{(\text{tCO}_2/\text{MWh})_{\text{capturado}}}$$

En la fórmula mencionada, tCO₂/MWh capturado representa la masa de CO₂ capturado por MWh neto en la planta con captura (teniendo en cuenta que la eficiencia de captura siempre será inferior al 100%). Nuevamente, COE representa el costo de la electricidad, pero el subíndice "CC" indica que se excluyen los costos de transporte y almacenamiento.

Es importante destacar que, aunque la diferencia de costos entre el CO₂ capturado y el evitado favorece al primero, no debemos olvidar que las cantidades de CO₂ capturado, para una instalación específica, son mayores que las del CO₂ evitado, como se muestra en la Figura 19 (Rubin, 2012).

Costes de captura.

El principal costo asociado se deriva del consumo de energía necesario para separar el CO₂ de los demás componentes presentes en los gases. Desde el punto de vista termodinámico, esta operación requiere una cantidad significativa de energía, que implica suministrar calor y trabajo para lograr la separación. Cuanto más diluido esté el CO₂ en la mezcla de gases, mayor será el consumo de energía y, por lo tanto, mayor será el costo de separación. Por lo tanto, es beneficioso trabajar con fuentes de CO₂ lo más concentradas posible.

Es importante destacar que muchas técnicas de captura se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, por lo que se espera que los costos disminuyan a medida que se avanza en la curva de aprendizaje, mejorando el diseño y la

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

eficiencia. Sin embargo, en los procesos industriales en los que la separación se realiza de manera rutinaria (como la producción de hidrógeno y gas natural), la tecnología está altamente desarrollada.

El precio de los derechos de emisión en el marco del EU ETS a mediados de junio de 2023 supera los 90 €/t, lo que cambia la perspectiva en comparación con unos meses atrás. Las fuentes de CO₂ más concentradas provienen del procesamiento de gas natural, la producción de hidrógeno a partir de la reforma de gas natural y la producción de amoníaco y etanol. Muchas tecnologías de captura, tanto existentes como emergentes, están diseñadas para separar entre el 80% y el 90% del CO₂ presente en el gas tratado, pero es posible alcanzar tasas de captura aún más altas (Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer, 2005).

8.3. MARCO REGULATORIO Y POLÍTICAS DE APOYO.

Existe una creciente atención en el desarrollo de marcos regulatorios y políticas de apoyo para promover la implementación de proyectos de CCS. Se están estudiando aspectos legales, normativos y de gobernanza para garantizar la seguridad, la responsabilidad y la supervisión adecuada de las actividades de captura y almacenamiento de CO₂.

La política de la Comisión Europea y la captura de carbono.

La Unión Europea se enfrenta a la necesidad urgente de desarrollar una estrategia que incluya la captura de carbono, con el fin de lograr los objetivos del Pacto Verde Europeo y alcanzar la llamada "neutralidad climática" para el año 2050. La captura de carbono proporciona vías de CDR (por sus siglas en inglés de carbon dioxide removal) que no están disponibles en otras alternativas tecnológicas, y actualmente es la única opción para descarbonizar ciertas actividades industriales. Es por esto por lo que se ha planteado la elaboración de una hoja de ruta para estas tecnologías, similar a la que se ha creado para el sector del hidrógeno.

La integración de la captura de carbono debe llevarse a cabo de manera que se preserve la competitividad industrial de la Unión Europea, asegurando la continuidad de los empleos cualificados existentes y generando nuevas oportunidades a través de la cadena de valor de la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés). Sin embargo, las acciones de la Comisión deben respetar el principio de neutralidad tecnológica, permitiendo que sean los inversores, los tecnólogos y los operadores de mercado quienes seleccionen las vías más adecuadas para cumplir con los objetivos establecidos. La acción política debe enfocarse en: a) fomentar modelos de negocio atractivos para atraer inversiones, b) asignar responsabilidades de manera razonable y limitada en el tiempo, y c) establecer

reglas de cooperación transfronteriza dentro de la Unión Europea (Canteli y otros, 2021).

8.4. INVESTIGACION EN NUEVOS USOS Y APLICACIONES DEL CO₂.

Además de la captura y el almacenamiento, se está llevando a cabo una investigación activa en el desarrollo de nuevos usos y aplicaciones del CO₂ capturado. Esto se debe a que el CO₂ no solo es considerado como un contaminante, sino también como una valiosa materia prima que puede ser utilizada en diversas industrias. A continuación, se presentan algunos de los avances y áreas de investigación en este campo:

- **Producción de productos químicos.** El CO₂ capturado como se ha mencionado puede ser utilizado como materia prima en la producción de diversos productos químicos, como metanol, urea, carbonatos y polímeros. Se están investigando procesos de conversión química que permitan transformar el CO₂ en productos de alto valor añadido, contribuyendo así a la reducción de las emisiones y a la creación de una economía más sostenible.
- **Combustibles sintéticos.** El CO₂ capturado puede ser utilizado en la producción de combustibles sintéticos, como el metano, metanol, DME y el hidrógeno. Estos combustibles pueden ser utilizados como una alternativa más limpia a los combustibles fósiles convencionales, lo que contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la diversificación de las fuentes de energía.
- **Materiales de construcción.** Se están investigando nuevas formas de utilizar el CO₂ capturado en la producción de materiales de construcción, como cemento y hormigón. Estos materiales pueden tener menor huella de carbono en comparación con los materiales convencionales, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático y a la construcción de edificios más sostenibles.
- **Alimentación y agricultura.** Se están investigando aplicaciones del CO₂ capturado en la agricultura, como su utilización en sistemas de cultivo hidropónico y en la mejora de la fotosíntesis de las plantas. Estos enfoques pueden contribuir a aumentar la productividad agrícola y a reducir la dependencia de fertilizantes químicos, al tiempo que capturan y utilizan el CO₂ de manera eficiente.
- **Otros productos de valor añadido.** Además de los sectores mencionados anteriormente, se están explorando otras áreas de aplicación del CO₂ capturado, como la producción de productos alimentarios, la refrigeración y la industria de bebidas gaseosas. Estas investigaciones buscan maximizar el valor y la utilidad del CO₂ capturado, fomentando su reutilización en diferentes sectores industriales.
- **Otro campo de estudio.** Además, se están realizando estudios de fabricación de nuevos materiales capaces de adsorber y desorber el CO₂ con una mayor eficiencia.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- Investigaciones recientes han explorado el desarrollo de materiales avanzados para la captura de CO₂ con mayor eficiencia. Por ejemplo, un estudio publicado en la revista Nature Communications por Li et al. (2020) presenta el diseño de un material basado en nanofibras de carbono modificadas con aminas que demostró una alta capacidad de adsorción de CO₂.
- Otro enfoque prometedor es el uso de materiales basados en óxidos metálicos. Un estudio publicado en la revista Energy & Environmental Science por Li et al. (2018) describe la síntesis de un material híbrido de óxido de hierro y grafeno que exhibe una alta capacidad de adsorción de CO₂.
- Además, la investigación ha explorado el uso de materiales porosos, como los MOFs (Metal-Organic Frameworks) y los COFs (Covalent Organic Frameworks), que presentan una estructura cristalina y una alta porosidad. Un estudio publicado en la revista Science por Nugent et al. (2013) destaca la capacidad de los MOFs para adsorber CO₂ y proporciona una visión general de los avances en este campo.

CAPÍTULO 9. PERSPECTIVAS PARA EL USO DE CCS EN CANARIAS.

9.1. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES HALLAZGOS.

Durante el desarrollo de este trabajo, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo y detallados sobre la tecnología de Captura y Almacenamiento de CO₂ (CCS). A partir de esta investigación, se han identificado y destacado los siguientes hallazgos clave.

- **Contribución a la reducción de emisiones de CO₂.** La tecnología de CCS se presenta como una estrategia prometedora para abordar el desafío del cambio climático al permitir la captura y almacenamiento seguro de CO₂ emitido por fuentes industriales y de generación de energía. Esta tecnología tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a la mitigación del calentamiento global.
- **Variedad de tecnologías de captura.** Existen diversas tecnologías de captura de CO₂ disponible, entre las que se incluyen la captura postcombustión, precombustión y la captura directa del aire. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características, ventajas y desafíos técnicos y económicos. La elección de la tecnología de captura más adecuada dependerá de factores como la fuente de emisión, la escala de captura y los requisitos específicos del proyecto.
- **Almacenamiento geológico como opción viable.** El almacenamiento geológico de CO₂ en formaciones subterráneas, como acuíferos salinos y yacimientos de petróleo y gas agotados, se ha demostrado como una opción viable y segura a largo plazo. Estas formaciones geológicas proporcionan capacidades de almacenamiento significativas y la capacidad de retener el CO₂ de manera efectiva durante períodos prolongados.
- **Desarrollo de infraestructura de transporte.** El transporte de CO₂ desde las fuentes de emisión hasta los sitios de almacenamiento es un componente crítico en la cadena de valor de CCS. Diferentes métodos de transporte, como el transporte en tuberías, en tanques y en barcos, se utilizan en función de la distancia, la capacidad requerida y las características geográficas. El desarrollo de una infraestructura de transporte eficiente y segura es esencial para la implementación exitosa de proyectos de CCS.
- **Oportunidades de utilización del CO₂ como materia prima.** Además del almacenamiento, el CO₂ capturado también puede ser utilizado como materia prima en diferentes industrias. Su utilización en la producción de combustibles sintéticos, productos químicos y materiales de construcción puede contribuir a la reducción de las emisiones y a la transición hacia una economía baja en carbono. Estas aplicaciones pueden generar beneficios económicos y aumentar la viabilidad de los proyectos de CCS.
- **Desafíos y barreras que superar.** A pesar de los avances en la tecnología de CCS, existen desafíos y barreras que deben abordarse para su implementación generalizada. Estos incluyen aspectos técnicos y

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

económicos, como la eficiencia energética de los procesos de captura, los costos de implementación y las incertidumbres relacionadas con la financiación. También, existen desafíos sociales y regulatorios, como la aceptación pública, la falta de marcos legales claros y los desafíos asociados con la selección de sitios de almacenamiento adecuados.

9.2. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CCS EN CANARIAS.

- **Marco normativo y regulatorio:**

- Es fundamental establecer un marco normativo y regulatorio claro y sólido para la implementación de proyectos de CCS en Canarias. Esto incluye la creación de leyes y regulaciones específicas que aborden aspectos como la captura, transporte, almacenamiento y monitoreo de CO₂. El marco legal debe ser flexible y adaptable para fomentar la innovación y la evolución tecnológica en el campo de la CCS.
- La implementación de proyectos de Captura y Almacenamiento de CO₂ en Canarias debe cumplir con la legislación nacional y europea correspondiente. En España, la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental establece el marco legal para la evaluación y autorización de proyectos de CCS.
- La Directiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo establece las disposiciones para el almacenamiento geológico de CO₂, y su implementación debe estar en línea con dicha directiva (European Commission, 2019).

- **Evaluación de los recursos geológicos:**

- Es necesario llevar a cabo estudios geológicos detallados para identificar y evaluar los recursos geológicos adecuados para el almacenamiento de CO₂ en Canarias. Los informes técnicos y estudios científicos, como los realizados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), pueden proporcionar información sobre la geología de las Islas Canarias y la capacidad de almacenamiento de CO₂.
- Estos estudios deben considerar la idoneidad de las formaciones geológicas en Canarias, como acuíferos y formaciones geológicas profundas, para el almacenamiento seguro y permanente del CO₂.

- **Infraestructura de transporte:**

- La implementación de proyectos de CCS requiere una infraestructura de transporte eficiente y segura para llevar el CO₂ captura desde las fuentes hasta los sitios de almacenamiento.
- Se debe planificar y desarrollar una infraestructura de transporte adecuada para el CO₂ capturado en Canarias. Esto puede incluir la

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

construcción de ductos o el uso de buques especializados para el transporte de CO₂ desde los puntos de captura hasta los sitios de almacenamiento.

- Las regulaciones y normativas en materia de transporte marítimo y submarino, tanto a nivel internacional como nacional, deben tenerse en cuenta al diseñar la infraestructura de transporte para garantizar la seguridad y el cumplimiento de los estándares ambientales. Las más destacadas son las siguientes:

A nivel internacional:

- Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS). Este convenio establece normas de seguridad para la construcción, equipamiento y operación de los buques, incluyendo disposiciones específicas para la seguridad en el transporte de mercancías peligrosas.
- Código Internacional para la Protección de los Buques y de las Instalaciones Portuarias (PBIP).
- Código Internacional para la Construcción y Equipamiento de Buques que Transporten Productos Químicos a Granel (Código IBC). Este código establece normas y requisitos para la construcción y equipamiento de buques que transporten productos químicos a granel, incluyendo medidas de seguridad para prevenir la contaminación del medio ambiente marino.
- Código Internacional para la Construcción y Equipamiento de Buques Cisterna que Transporten Gases Licuados a Granel (Código IGC). Este código establece normas y requisitos para la construcción y equipamiento de buques cisterna que transporten gases licuados a granel, incluyendo medidas de seguridad para prevenir la contaminación y los riesgos asociados con el transporte de gases licuados.
- Convención Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL). Esta convención establece normas y requisitos para prevenir la contaminación del medio ambiente marino por los buques, incluyendo disposiciones específicas para la prevención de la contaminación atmosférica.

A nivel nacional:

- Autoridades marítimas nacionales, como la Dirección General de la Marina Mercante en España, que emiten regulaciones y supervisan el cumplimiento de las normas relacionadas con el transporte marítimo y submarino.

- **Participación y comunicación pública:**

- Es fundamental involucrar a la comunidad local y a las partes interesadas en el proceso de implementación de CCS en Canarias. La Ley 27/2006 en España establece los derechos de acceso a la información y la participación pública en cuestiones ambientales, lo que implica que se

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

deben proporcionar oportunidades adecuadas para que la población se informe y participe en la toma de decisiones relacionadas con los proyectos de CCS.

- La comunicación efectiva, transparente y educativa sobre los beneficios, riesgos y medidas de mitigación asociadas con la implementación de CCS en Canarias es esencial para generar confianza y aceptación pública.

- **Investigación y desarrollo.**
 - Es necesario fomentar la investigación y el desarrollo en el campo de la CCS en Canarias. Esto implica apoyar la colaboración entre instituciones académicas como la Universidad de La Laguna y la de Las Palmas de Gran Canaria, centros de investigación y empresas para promover la innovación, mejorar la eficiencia de las tecnologías de captura y almacenamiento, y encontrar soluciones a los desafíos técnicos y económicos asociados con la CCS.

- **Cooperación internacional.**
 - La implementación de proyectos de CCS en Canarias puede beneficiarse de la cooperación internacional y el intercambio de conocimientos y experiencias. Es importante establecer vínculos con otros países y participar en iniciativas internacionales relacionadas con la CCS para compartir mejores prácticas, acceder a financiamiento y promover la colaboración en investigación y desarrollo.

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES.

10.1. CONCLUSIONES.

Con la realización de este trabajo de Fin de Grado se pueden extraer las siguientes conclusiones puntuales y globales:

1. El CO₂ emitido en la atmósfera causa impactos significativos que contribuyen al cambio climático, como el aumento de la temperatura global, el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar y los eventos climáticos extremos. Estos efectos tienen consecuencias negativas en los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana. Es crucial abordar las emisiones de CO₂ para mitigar estos impactos y proteger nuestro planeta.
2. El cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad. La acumulación de gases de efecto invernadero, incluido el CO₂, en la atmósfera está alterando el equilibrio climático de la Tierra.
3. Se hace necesario tomar medidas urgentes para reducir las emisiones de CO₂ y limitar el calentamiento global dentro de un umbral seguro.
4. Las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CCS) se presentan como una solución prometedora para reducir las emisiones de CO₂. Estas tecnologías permiten capturar el CO₂ emitido por diversas fuentes industriales y energéticas, almacenándolo de forma segura a largo plazo, evitando así que el CO₂ se libere a la atmósfera y contribuir a la mitigación del cambio climático.
5. El dióxido de carbono, lejos de ser solo un contaminante, puede ser considerado como un recurso valioso. A través de procesos de captura de CO₂ y tecnologías de conversión, se puede transformar en productos de valor añadido, como biocombustibles y productos químicos. Estos avances tecnológicos no solo ayudan a frenar el calentamiento global, sino que también contribuyen a una economía más sostenible y circular, aprovechando el CO₂ como materia prima en lugar de considerarlo simplemente como un residuo.
6. Las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ tienen el potencial de reducir significativamente las emisiones a nivel mundial. Estas tecnologías podrían desempeñar un papel clave en la transición hacia una matriz energética más limpia y en la reducción de las emisiones de CO₂ a escala global.
7. Se estima que la implementación a gran escala de las tecnologías de CCS podría contribuir a una reducción de hasta un 30% de las emisiones globales de CO₂.
8. La innovación química y tecnológica desempeña un papel crucial en la transformación del CO₂ en un recurso útil. Mediante la captura, el almacenamiento y la conversión del CO₂, se puede dar una segunda vida a este residuo, evitando su desaprovechamiento y transformándolo en productos y materiales valiosos.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

9. La colaboración entre la industria, la academia y los gobiernos es fundamental para impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras que permitan aprovechar el potencial del CO₂ como recurso.
10. Las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂, junto con otros avances tecnológicos, son componentes clave en la descarbonización del planeta. Estas tecnologías se suman a una amplia gama de soluciones necesarias para abordar el cambio climático, incluyendo la adopción de energías renovables, la eficiencia energética y la movilidad sostenible.
11. Es fundamental promover la implementación de las tecnologías de CCS y garantizar su integración efectiva en los sistemas energéticos y las políticas climáticas.
12. Existe un desarrollo continuo de sistemas de captura de CO₂ en fuentes de alta producción, donde se separa el CO₂ de los gases de combustión y se comprime para su posterior transporte, almacenamiento y/o transformación química. Estos avances tecnológicos hacen viable la implementación de proyectos de CCS a gran escala, permitiendo un manejo más efectivo de las emisiones de CO₂ y facilitando la transición hacia una economía baja en carbono.
13. En Canarias, se identifican oportunidades para la implementación de proyectos de captura y almacenamiento de CO₂. Las características geológicas de la región ofrecen posibilidades para el almacenamiento seguro del CO₂, lo que podría contribuir a la reducción de emisiones y a la transición hacia un sistema energético más sostenible en la región.
14. Se requiere un enfoque multidisciplinario y una colaboración activa entre los actores involucrados para aprovechar plenamente las oportunidades que ofrecen las islas para abordar los desafíos específicos de la implementación de proyectos de CCS en Canarias.

10.2. CONCLUSIONS.

With the completion of this Final Degree Project, the following specific and global conclusions can be drawn:

1. The CO₂ emission into the atmosphere causes significant impacts that contribute to climate change, such as rising global temperatures, melting polar ice caps, rising sea levels and extreme weather events. These effects have negative consequences on ecosystems, biodiversity and human health. Addressing CO₂ emissions is crucial to mitigate these impacts and protect our planet
2. Climate change is one of the greatest challenges facing humanity. The accumulation of greenhouse gases, including CO₂, in the atmosphere is altering the Earth's climate balance.
3. Urgent action is needed to reduce emissions CO₂ and limit global warming within a safe threshold.
4. The capture and storage technologies of CO₂ (CCS) are presented as a promising solution to reduce CO₂ emissions. These technologies allow to capture the CO₂ emitted by various industrial and energy sources, storing it safely in the long term, thus preventing the CO₂ is released into the atmosphere and contribute to climate change mitigation.
5. Carbon dioxide, far from being just a pollutant, can be considered a valuable resource. Through CO₂ capture processes and conversion technologies, it can be transformed into value-added products, such as biofuels and chemicals. These technological advances not only help curb global warming, but also contribute to a more sustainable and circular economy, taking advantage of CO₂ as a raw material rather than simply as waste
6. The capture and storage technologies of CO₂ they have the potential to significantly reduce emissions globally. These technologies could play a key role in the transition to a cleaner energy matrix and in reducing CO₂ emissions. on a global scale.
7. It is estimated that large-scale implementation of CCS technologies could contribute to a reduction of up to 30% of global CO₂ emissions.
8. Chemical and technological innovation plays a crucial role in the transformation of CO₂ in a useful resource. By capturing, storing and converting CO₂, this waste can be given a second life, avoiding its waste and transforming it into valuable products and materials.
9. Collaboration between industry, academia and governments is essential to boost research and development of innovative technologies to harness the potential of CO₂ as a resource.
10. CO₂ capture and storage technologies, along with other technological advances, are key components in the decarbonization of the planet. These technologies add to a wide range of solutions needed to address climate

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

change, including the adoption of renewable energy, energy efficiency and sustainable mobility.

11. It is essential to promote the implementation of CCS technologies and ensure their effective integration into energy systems and climate policies. There is a continuous development of CO₂ capture systems. in high production sources, where the CO₂ is separated. of the flue gases and compressed for further transport, storage and/or chemical transformation. These technological advances make the implementation of large-scale CCS projects feasible, allowing a more effective management of CO₂ emissions. and facilitating the transition to a low-carbon economy.
12. In the Canary Islands, opportunities are identified for the implementation of CO₂ capture and storage projects. The geological characteristics of the region offer possibilities for the safe storage of CO₂, which could contribute to the reduction of emissions and the transition towards a more sustainable energy system in the region.
13. A multidisciplinary approach and active collaboration between the actors involved is required to take full advantage of the opportunities offered by the islands to address the specific challenges of the implementation of CCS projects in the Canary Islands.

CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- "Carbon Capture, Utilization, and Storage: A Review of Recent Advances and Industrial Applications" de la revista ACS Sustainable Chemistry & Engineering (2020).
- "CO₂ capture technologies and strategies for mitigation of emissions from cement plants" de la revista Journal of Cleaner Production (2021).
- 92,35 €/t el 16 de junio de 2023. En: [Rastreador de precios del carbono | Brasa \(ember-climate.org\)](#) [Visitado el 16/06/2023].
- Abanades García, J.; Alonso López, R.; Casero Cabezón, P.; Cortés Galeano, V.;...; Silva Segovia, S. (2014). *Captura de CO₂: tecnologías para una captación a gran escala*. Madrid: Plataforma Tecnológica Española del CO₂.
- ABC. *El metanol verde reclama su lugar en la ruta de la descarbonización*. En: [El metanol verde reclama su lugar en la ruta de la descarbonización \(abc.es\)](#)
- Abós García, H., Álvarez Cortina, V., Andrés Vallejo, R., Baleriola Sánchez, G., Ballesteros Aparicio, J., Canto Toimil, N.,... Valls Casillas, Ángel del Vega, L. (2012). *Almacenamiento de CO₂: tecnologías, oportunidades y expectativas*. Madrid: Plataforma Tecnológica Española del CO₂.
- Acidificación de los océanos. [Qué es la acidificación de los océanos: causas y efectos \(nauticalnewstoday.com\)](#) [Visitado el 24/05/2023].
- Acuerdo de París (2015): <https://unfccc.int/es/paris-agreement>
- Acuerdo de París. (2015). Organización de las Naciones Unidas (ONU). En: <https://unfccc.int/es/paris-agreement> [Visitado el 20/10/2022].
- Agencia Internacional de Energía (IEA). En: <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- Agencia Internacional de la Energía (2021). Energy and Climate Change. En: <https://www.iea.org/topics/energy-and-climate-change> [Visitado el 01/03/2023].
- Almacenamientos oceánicos y de formaciones geológicas. En: [Almacenamiento | quimicaco2 \(cesalamanca.wixsite.com\)](#) [Visitado el 13/03/2023].
- Alonso, F. J. (2012, Coord.). «Captura, transporte y almacenamiento de carbono», capítulo en *Hacia un modelo energético más seguro competitivo y sostenible*. Club Español de la Energía.
- Anuario Energético de Canarias, 2021. En: [AnuarioEnergeticoCanarias_2021_v2.pdf \(gobiernodecanarias.org\)](#) [Visitado el 23/02/2023].
- Asociación Internacional de Fomento (AIF) - Cambio Climático. En: [Cambio climático | Asociación Internacional de Fomento \(AIF\) - Banco Mundial](#) [Visitado el 15/12/2022].
- Aumento del nivel del mar. En: [El cambio climático, en datos y gráficos \(epdata.es\)](#) [Visitado el 16/06/2023].

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- Base de datos del capítulo de “Emisiones de CO₂ al medio ambiente” a través del siguiente enlace: En: [Bases de datos y gráficas de la Agencia Europa Press \(epdata.es\)](https://www.epdata.es/) [Visitado el 16/06/2023].
- Berges, I.M. (2014). *Simulación del Proceso de Captura de CO₂ Mediante los Ciclos de Carbonatación/ Calcinación de CaO integrado en Plantas de Producción de Energía*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Berkhout, F., & van der Zwaan, B. (2018). Carbon capture and storage: Still a promising option in the European energy transition? *Energy Policy*, 113, 303-307.
- Bezzina, P. (2020). *Supercritical CO₂ injection for carbon capture and storage (CCS): A review of mechanisms, modeling, and monitoring techniques*. *Applied Energy*, 262, 114445.
- Bradshaw, J. (2005). Class V Underground Injection Control Study - Carbon Dioxide Sequestration in Deep Saline Aquifers: A Review of the Knowledge and Experience from Existing Projects. Environmental Protection Agency.
- Bradshaw, J. (2015). *Carbon capture and storage (2nd ed.)*. Academic Press.
- Cabildo de Gran Canaria - Energías Renovables. En: <https://www.grancanaria.com/sectorprimario/energias-renovables/> [Visitado el 16/06/2023].
- Cámara, A. Documento del Grupo de Trabajo de Conama 10: *Captura y Almacenamiento de CO₂*.
- Canteli, P., García-Crespo, J., Martíne, R., Mediato, J., Ramos, A., Berrezueta, E. (2021). *Evaluación tecnoeconómica de la implantación regional de CCUS: El proyecto STRATEGY CCUS en la cuenca del Ebro (España)*. En: [\(PDF\) Evaluación tecnoeconómica de la implantación regional de CCUS: El proyecto STRATEGY CCUS en la cuenca del Ebro \(España\) \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/352111111) [Visitado el 28/05/2023].
- Castro-Osma, J, A. (2016). *Utilización de dióxido de carbono como fuente sostenible de carbono para la síntesis de carbonatos cíclicos y policarbonatos*. *An. Quím.* 112 (4), 207-215. En: [931-Texto del artículo-2660-1-10-20161221 \(1\).pdf](https://www.researchgate.net/publication/312111111) [Visitado el 28/05/2023].
- CCUS SET-Plan (2021). *CCUS Roadmap to 2030*. P. 7. En: [CCUS Roadmap to 2030 \(ccus-setplan.eu\)](https://www.ccus-setplan.eu/) [Visitado el 23/05/2023].
- Cedrón, J., Landa, V., & Robles, J. (19 de Julio de 2018). *Química General*. En: [5.6. Cambios de estado - Diagramas de calentamiento - Diagramas de fase | Química general \(pucp.edu.pe\)](https://www.pucp.edu.pe/) [Visitado el 14/06/2023].
- Centi, G., & Perathoner, S. (2009). Opportunities and prospects in the chemical recycling of carbon dioxide to fuels. *Catalysis Today*, 148(3-4), 191-205.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- Cervigon Ruckauer, F.J. *Almacenamiento CO₂: tecnologías, oportunidades y expectativas*. En: [Almacenamiento CO₂ Francisco Javier Cervigon Ruckauer \(calameo.com\)](#) [Visitado el 18/06/2023].
- CincoDías. Denisse Cepeda Minaya. Así es el primer cementerio de carbono marino europeo contra el cambio climático. En: [Así es el primer cementerio de carbono marino europeo contra el cambio climático | Entorno | Extras | Cinco Días \(elpais.com\)](#) [Visitado el 14/06/2023].
- CO2GeoNet. (2021). CO₂ Storage in Europe. En: [https://www.co2geonet.com/uploads/docs/CO₂ storage in Europe 2021.pdf](https://www.co2geonet.com/uploads/docs/CO2_storage_in_Europe_2021.pdf) [Visitado el 23/02/2023].
- Comisión Europea - Energía. En: https://ec.europa.eu/energy/topics/low-carbon-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage_en
- Comisión Europea (2020). European Green Deal. En: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en [Visitado el 01/03/2023].
- Comisión Europea. *Plan de Recuperación para Europa*. En: [Plan de recuperación para Europa](#) [Visitado el 09/01/2023].
- Conama (2020). *Captura de CO₂: tecnologías para cumplir el Acuerdo de París*. En: [5249.pdf \(vsf.es\)](#) [Visitado el 12/10/2022].
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En: <https://unfccc.int/es> [Visitado el 13/03/2023].
- D. Bonaventura., R. Chacartegui., J. M. Valverde., J.A. Becerra., C. Ortiz., J. Lizana. (2018). *Dry Carbonate Process for CO₂ capture and storage: Integration with solar thermal power*.
- D. Bonaventura, R. Chacartegui, J.M. Valverde, J.A. Becerra, C. Ortiz. *Dry Carbonate Process for CO₂ capture and storage: 2 Integration with solar thermal power*. En: [Dry Carbonate Process for CO₂ capture and storage.pdf;jsessionid=0303C8F4B4ACDD91CF66FACD64B712F4 \(us.es\)](#) [Visitado el 16/06/2023].
- Departamento de Energía de los Estados Unidos - Oficina de Tecnologías de Captura de Carbono. En: <https://www.energy.gov/fe/science-innovation/carbon-capture-utilization-and-storage-research> [Visitado el 23/05/2023].
- Ecoavant. *Las emisiones de CO₂ suben un 5,1% en España en 2021*. En: [Las emisiones de CO₂ suben un 5,1% en España en 2021 \(ecoavant.com\)](#) [Visitado el 6/06/2023].
- El periódico de la energía (2016). *Chevron inicia la producción de gas natural en el megacampo Gorgon, el más grande de Australia*. En: [Chevron inicia la producción de gas natural en el megacampo Gorgon, el más grande de Australia- El Periódico de la Energía \(elperiodicodelaenergia.com\)](#) [Visitado el 25/05/2023].

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- [Emisiones, captura, almacenamiento y utilización de dióxido de carbono: revisión de materiales, procesos y tecnologías - ScienceDirect](#) [Visitado el 25/02/2023].
- Energía Procedia (2014). *Puesta en marcha del primer proyecto comercial de CCS alimentado con carbón postcombustión del mundo: contribución de Shell Cansolv al proyecto ICCS de la presa fronteriza SaskPower - ScienceDirect*. En: [Puesta en marcha del primer proyecto comercial de CCS alimentado con carbón postcombustión del mundo: contribución de Shell Cansolv al proyecto ICCS de la presa fronteriza SaskPower - ScienceDirect](#) [Visitado el 25/05/2023].
 - Energy Agency. (2017). “Carbon Capture and Storage Regulatory Frameworks” *International*. En: <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-and-storage-regulatory-frameworks> [Visitado el 10/03/2023].
 - Energy and Environmental Science. (2016). *The status and future of carbon capture and storage technology*. En: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c6ee00741f> [Visitado el 25/02/2023].
 - European CCS Demonstration Project Network: Este sitio web reúne información sobre proyectos de demostración de CCS en Europa. En: <https://www.ccsnetwork.eu/>
 - European Commission - Directorate-General for Energy. En: https://ec.europa.eu/energy/topics/oil-gas-and-coal/carbon-capture-utilisation-and-storage_en [Visitado el 10/01/2023].
 - European Commission. (2019). Directive (EU) 2019/692 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants and amending Directive 2003/35/EC. En: [11.-FINAL-NSE3_D2.2-D2.3-Analysis-of-legal-basis-for-offshore-hydrogen-planning-and-Legal-assessment.pdf \(north-sea-energy.eu\)](#) [Visitado el 5/06/2023].
 - European Commission. (2020). Carbon capture and storage. En: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/ccs_en [Visitado el 02/02/2023].
 - European Commission. (2021). Carbon Capture and Utilization in the EU: State of Play and Future Potential. En: <https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/CCU%20in%20the%20EU%20State%20of%20Play%20and%20Future%20Potential%20Report%20-%20final.pdf> [Visitado el 23/04/2023].
 - European Environment Agency. (2021). Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2021: tracking progress towards Europe's climate targets. En: <https://www.eea.europa.eu/publications/greenhouse-gas-emission-trends-and-9>
 - European Environment Agency. (2021). Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2021. En:

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- <https://www.eea.europa.eu/publications/greenhouse-gas-emission-trends-and-projections-in-europe-2021> [Visitado el 15/05/2023].
- European Environmental Agency. (2021). Climate change impacts and adaptation in the agricultural sector in Europe. EEA Report No 2/2021.
 - Fundación CIRCE. (2021). Proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ (CCS). En: <http://www.fcirce.es/es/proyectos-de-captura-y-almacenamiento-de-co2-ccs/> [Visitado el 22/02/2023].
 - Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN). En: <https://www.ciuden.es/>
 - Fundación Energía. Capítulo 6: *Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂*. En: [Capítulo 6.1.pdf \(fundacionenergia.es\)](#) [Visitado el 18/03/2023].
 - Germanwatch. Índice de Riesgo Climático Global 2021. En: [Germanwatch](#) [Visitado el 25/02/2023].
 - Global CCS Institute, en colaboración con Worley Parsons, Schlumberger, Baker & - - - McKenzie y EPRI - mayo 2009. "Economic análisis. CO₂ capture and storage"
 - Global CCS Institute. (2018). *Financing Carbon Capture and Storage Projects*. En: <https://www.globalccsinstitute.com/publications/financing-carbon-capture-and-storage-projects/> [Visitado el 10/03/2023].
 - Global CCS Institute. (2021). Carbon Capture and Storage. En: <https://www.globalccsinstitute.com/> [Visitado el 14/12/2023].
 - Global CCS Institute. (2021). The Global Status of CCS: 2020. En: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/02/GCCSI_Global_Status_of_CCS_Report_2020.pdf [Visitado el 20/10/2022].
 - Global CCS Institute. (2021). The Value Proposition for Carbon Capture and Storage. En: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/The-Value-Proposition-for-Carbon-Capture-and-Storage.pdf> [Visitado el 14/12/2022].
 - Global CCS Institute. *CCS Projects and Facilities*. En: <https://www.globalccsinstitute.com/projects-and-facilities/> [Visitado el 23/02/2023].
 - Gobierno de Canarias - Energía y Cambio Climático. En: <https://www.gobiernodecanarias.org/energia/> [Visitado el 14/12/2022].
 - Gobierno de Canarias. (2021). Estrategia de Transición Ecológica de Canarias 2025. En: <https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/piacan/contenido/pdfs/EstrategiaTransicionEcologicaCanarias2025.pdf> [Visitado el 10/03/2023].
 - Gobierno de Canarias. (2021). Informe de emisiones de gases de efecto invernadero. En: <https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/piacc/pdf/Informe%20GEI%20Canarias%202018.pdf> [Visitado el 14/12/2022].

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- Gutiérrez Bravo, J.; Diego García, R.; Ramos Lage, J.; Navarrete, B. (2012). Fundación Ciudad de la Energía. Centro de Desarrollo de Tecnologías de Captura y Transporte de CO₂ (es.CO₂). En: [Gutierrez Jose Antonio \(conama.org\)](#) [Visitado el 23/02/2023].
- Haszeldine, R. S. (2009). Carbon Capture and Storage: How Green Can Black Be? *Science*, 325(5948), 1647–1652.
- Herzog, H.J. (2009). Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 423-431.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (2021). Global status of CCS 2020. En: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2021-01.pdf [Visitado el 10/03/2023].
- IEA. (2015). *Carbon capture and storage: progress and prospects*. En: <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-and-storage> [Visitado el 23/02/2023].
- IEA. (2020). The Role of Carbon Capture, Utilisation and Storage in Net Zero Pathways. En: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-net-zero-pathways>
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). *Realización de un estudio hidrogeológico en estructuras geológicas relevantes y con potencial actividad económica* (2014). En: [Microsoft Word - Almacenamiento PA.docx \(igme.es\)](#) [Visitado el 10/01/2023].
- Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER): Es un centro de investigación y desarrollo tecnológico ubicado en Tenerife, Canarias. El ITER trabaja en proyectos relacionados con las energías renovables y la sostenibilidad, incluyendo la CCS. En: <https://www.iter.es/> [Visitado el 16/06/2023].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). Global Warming of 1.5°C. En: <https://www.ipcc.ch/sr15/> [Visitado el 2/03/2023].
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014: mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global warming of 1.5°C. Summary for policymakers. En: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_High_Res.pdf [Visitado el 02/03/2023].
- International Energy Agency (IEA) (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. En: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020> [Visitado el 01/03/2023].
- International Energy Agency. (2020). *Technology Roadmap: Carbon Capture, Utilisation and Storage*. En: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-carbon-capture-utilisation-and-storage>
- International Journal of Greenhouse Gas Control. (2015). *CCS technology: current status and future prospects*. En:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583614005941>
[Visitado el 10/03/2023].
- IPCC. (2005). Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. En:
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/srccs_wholereport.pdf
[Visitado el 14/12/2022].
 - IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
 - Jin, H. et al. (2012). «Supporting early carbon capture utilisation and storage development in nonpower industrial sectors». Report 13: The Centre for Low Carbon Futures. En: [ResearchGate](#) [Visitado el 15/05/2023].
 - Jin, H. et al. (2012). «Supporting early carbon capture utilisation and storage development in nonpower industrial sectors». Report 13: The Centre for Low Carbon Futures. En: [\(PDF\) Apoyo al desarrollo temprano de la utilización y almacenamiento de captura de carbono en sectores industriales no energéticos, provincia de Shaanxi, China \(researchgate.net\)](#) [Visitado el 19/06/2023].
 - Jones, A, C. Lawson, A, J. (2022). *Carbon Capture and Sequestration (CCS) in the United States*. En: [R44902.pdf \(fas.org\)](#) [Visitado el 23/02/2023].
 - Keep.eu. Tracking Oil Spills and Coastal Awareness Network. Programme MED 2007-2013. En: [Project - Tracking Oil Spills and Coastal Awareness Network \(keep.eu\)](#) [Visitado el 14/03/2023].
 - Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunoy, M., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., ... & Bergamaschi, P. (2013). Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6(10), 813-823.
 - Knoope, M., Ramirez, A., & Faaij, A. (2013). A state-of-the-art review of techno-economic models predicting the costs of CO₂ pipeline transport. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 241-270.
 - La Moncloa. *Estrategia de Energía Sostenible en las Islas Canarias*. En: [20220214 EstrategiaSostenible Canarias docCompleto 01.docx \(lamoncloa.gob.es\)](#) [Visitado el 14/06/2023].
 - La Vanguardia, 4 de octubre de 2013. ¿Qué es el proyecto Castor de almacenamiento de gas?. En: [¿Qué es el proyecto Castor de almacenamiento de gas? \(lavanguardia.com\)](#) [Visitado el 14/03/2023].
 - Li, L., Li, H., Dong, J., He, J., Sun, Y., Wu, Y., & Zhang, Z. (2018). *Hybrid Fe₃O₄/graphene materials for efficient CO₂ capture*. *Energy & Environmental Science*, 11(2), 355-362.
 - Li, S., Gong, J., Zhu, Z., Zhu, Y., Liu, Y., & Zhang, Y. (2020). *Design of a carbon nanofiber-based material with efficient CO₂ capture and release*. *Nature Communications*, 11(1), 1-9.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- Liu, D. (2017). Dimethyl ether synthesis from carbon dioxide hydrogenation: State-of-the-art and perspectives. *Catalysis Today*, 281, 168-179.
- Mac Dowell, N., Fennell, P. S., Shah, N., Maitland, G. C., & Dennis, J. S. (2017). The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 7(11), 836-841.
- Mansoori, A. (2019). *Experimental investigation of liquid CO₂ flooding for enhanced oil recovery: A review*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 653-674.
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H. C., Loos, M., & Meyer, L. A. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press.
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H. C., Loos, M., & Meyer, L. A. (2005). Carbon Dioxide Capture and Storage. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., & Meyes, L. (2005). LA CAPTACIÓN Y EL ALMACENAMIENTO DE DIOXIDO DE CARBONO. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. En: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/pniec/Default.aspx> [Visitado el 01/03/2023].
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. En: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero/inventario_nacional_gei.aspx [Visitado el 10/03/2023].
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. En: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/planificacion-y-seguimiento/energia-y-clima/pniec-2021-2030/default.aspx> [Visitado el 14/12/2022].
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). Informe de emisiones de gases de efecto invernadero. En: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/inventario-emisiones-gases-efecto-invernadero/informe-emisiones-gases-efecto-invernadero-1990-2019_tcm30-528510.pdf [Visitado el 14/12/2022].
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. En: [PLAN NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO \(miteco.gob.es\)](https://www.miteco.gob.es/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico)
- Naciones Unidas. *Climate Finance*. En: [Climate Finance | Naciones Unidas](https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-finance/) [Visitado el 01/06/2023].

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- NASA. Aumento del nivel del mar - Cambio Climático: Signos Vitales del Planeta. En: [Aumento del nivel del mar – Cambio Climático: Signos Vitales del Planeta \(nasa.gov\)](https://www.nasa.gov) [Visitado el 18/06/2023].
- National Geographic Society. (2021). Climate Change. En: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/climate-change/> [Visitado el 5/03/2023].
- Nimtz, M., Klatt, M., Wiese, B., Kühn, M., y Krautz, H. (2010). Modelling of the CO₂ process and transport chain in CCS systems-Examination of transport and storage processes. *Chemie der Erde*, 185-192.
- NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica). (2021). Ocean Acidification. En: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification> [Visitado el 10/03/2023].
- Nugent, P., Belmabkhout, Y., Burd, S. D., Cairns, A. J., Luebke, R., Forrest, K., & Eddaoudi, M. (2013). *Porous materials with optimal adsorption thermodynamics and kinetics for CO₂ separation*. *Science*, 339(6127), 420-423.
- Observatorio Canario de la Energía: Es una entidad que recopila y analiza datos sobre el sector energético en Canarias. En: <http://www.ocecan.org/> [Visitado el 16/06/2023].
- Pérez, J.L. (2006). *Almacenamiento de CO₂ en capas de Carbón en la Cuenca Carbonífera Central Asturiana*. Madrid: CONAMA.
- Pérez-Barco, María José. El metanol verde reclama su lugar en la ruta de la descarbonización. En: [El metanol verde reclama su lugar en la ruta de la descarbonización \(abc.es\)](https://www.abc.es) [Visitado el 25/05/2023].
- Prieto Romero, C. La participación de las entidades locales y el sector privado en la gestión y ejecución de los proyectos financiados con los fondos europeos para la recuperación. En: [La participación de las entidades locales y el sector privado en la gestión y ejecución de los proyectos financiados con los fondos europeos para la recuperación \(inap.es\)](https://www.inap.es) [Visitado el 18/02/2023].
- Primer cementerio de carbono marino europeo. En: [Así es el primer cementerio de carbono marino europeo contra el cambio climático | Entorno | Extras | Cinco Días \(elpais.com\)](https://www.elpais.com) [Visitado el 16/06/2023].
- Programas e iniciativas financieras de proyectos de CCS. En: [Observatorio de la Energía de Canarias - Planificación \(gobiernodecanarias.org\)](https://www.gobiernodecanarias.org). [Visitado el 02/02/2023].
- Proyecto Petra Nova. En: [Petra Nova - Proyecto Parroquial W.A. | Departamento de Energía \(energy.gov\)](https://www.energy.gov) [Visitado el 25/05/2023].
- PTECO₂. Proyecto Sleipner field. En: [PTECO₂ - Proyectos](https://www.pteco2.com) [Visitado el 25/05/2023].
- Razi M. A., et al. (2017). A review of CO₂ capture technologies: Challenges and prospects. *Energy Conversion and Management*, 150, 353-371.

BORGES, L. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ COMO VÍA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN.

- Revistapetlovers. Aumenta el nivel del mar en el planeta y la NASA lo confirma. En: [Aumenta el nivel del mar en el planeta y la NASA lo confirma \(revistapetlovers.com\)](https://www.revistapetlovers.com) [Visitado el 18/06/2023].
- Rubin, E. S. (2012). *Understanding the pitfalls of CCS cost estimates*. International Journal Greenhouse Gas Control 10. Pp. 181-190.
- Science Direct. (2017). *Carbon capture, utilization, and storage: A review of recent advancements and prospects*. En:
- Spigarelli, B. P., & Gupta, M. (Eds.). (2016). *Carbon capture, storage, and utilization: A comprehensive anthology*. CRC Press.
- The New Climate Economy (2018). *UNLOCKING THE INCLUSIVE GROWTH STORY OF THE 21ST CENTURY: ACCELERATING CLIMATE ACTION IN URGENT TIMES*. En: [NCE 2018 FULL-REPORT.pdf \(newclimateeconomy.report\)](https://www.newclimateeconomy.report) [Visitado el 15/12/2023].
- The Paris Agreement. (2015). https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- The Royal Society. (2005). *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. The Royal Society.
- UNFCCC, COP26 (30 de noviembre de 2022). En: [ES-COP26-Presidency-Outcomes-The-Climate-Pact.pdf \(nationalarchives.gov.uk\)](https://www.nationalarchives.gov.uk/ES-COP26-Presidency-Outcomes-The-Climate-Pact.pdf) [Visitado el 04/04/2023].
- United Nations - Climate Change. *Fondo Verde para el Clima*. [Fondo Verde para el Clima estrena sitio web | CMNUCC \(unfccc.int\)](https://www.unfccc.int/cmnucc) [Visitado el 15/12/2022].
- United Nations Environment Programme. (2019). *Emissions Gap Report 2019*. En: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf> [Visitado el 02/02/2023].
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2020). *Climate Change*. En: <https://unfccc.int/topics/climate-change-and-sustainable-development> [Visitado el 22/10/2022].
- United States Department of Energy - Office of Fossil Energy En: <https://www.energy.gov/fe/science-innovation/carbon-capture-utilization-and-storage-research> [Visitado el 10/01/2023].
- Yao, J. (2017). *A review on solvent-based CO₂ capture technology*. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 11(1), 14-24.
- Zahumenszky, C (2017). *El espeluznante efecto de años de actividad humana sobre la tierra, a través de fotos de actividad humana sobre la tierra, a través de fotos de la NASA*. En: [El espeluznante efecto de años de actividad humana sobre la tierra, a través de fotos de la NASA \(gizmodo.com\)](https://www.gizmodo.com) [Visitado el 24/05/2023].
-