Sede UJI
Campus Universitario Riu Sec
Av. Vicent Sos Baynat s/n
12006 Castelló (Spain)

Sede Almassora
Pol. Ind SUPOI 8
C/Cedrillas, 20
12550 Almassora-Castelló (Spain)

www.itc.uji.es
info@itc.uji.es
T. +34 964 34 24 24
F. +34 964 34 24 25

Análisis de materiales para la captura de CO2 en el sector de baldosas cerámicas

Informe nº C253143
Nº de páginas 66
ASCER - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE AZULEJOS Y PAVIMENTOS CERÁMICOS
Castellón, 09 de diciembre de 2025

GENERALITAT VALENCIANA
Conselleria de Hacienda y Economía

ASCER
Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos

El Instituto de Tecnología Cerámica está integrado por el Instituto Universitario de Tecnología Cerámica "Agustín Escardino" de la Universitat Jaume I de Castellón y la Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas, AICE, entidad privada de carácter no lucrativo creada por iniciativa de la Generalitat Valenciana, a través del IVACE, en colaboración con las industrias del sector cerámico

TABLA DE CONTENIDO

1. ANTECEDENTES. ... 3

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO. ... 6

3. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO_2. ... 6

3.1. Tecnología basada en absorción. ... 8

3.2. Tecnología basada en adsorción. ... 10

3.3. Tecnología basada en reacción química. ... 11

3.4. Otras tecnologías emergentes ... 12

3.5. Situación industrial actual de las tecnologías de captura. ... 14

3.6. Definición de un sistema de captura de CO_2 basado en tecnologías de adsorción. ... 16

4. ESTUDIO DE MATERIALES DE CAPTURA DE CO_2 POR ADSORCIÓN. ... 18

4.1. Tipologías de materiales adsorbentes para la captura de CO_2 ... 21

4.1.1. Materiales basados en carbono. ... 21

4.1.2. Óxidos metálicos y minerales ... 23

4.1.3. Materiales mesoporosos. ... 24

4.1.4. Redes Metal-Orgánicas (Metal-Organic Frameworks, MOFs). ... 30

4.1.5. Redes orgánicas covalentes (Covalent Organic Frameworks, COFs). ... 33

4.1.6. Polímeros porosos (Porous Organic Polymers, POPs). ... 33

4.1.7. Membranas híbridas y compuestas. ... 34

4.1.8. Resinas amínicas. ... 34

4.1.9. Hidróxidos dobles laminares (Layered Double Hydroxides, LDHs). ... 34

4.1.10. Microorganismos. ... 35

4.1.11. Otros materiales. ... 35

4.2. Resumen del análisis de materiales para la captura de CO_2 ... 35

5. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS Y MATERIALES COMERCIALES PARA CAPTURA DE CO_2. ... 37

6. ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE MATERIALES PARA LA CAPTURA DE CO_2 EN EL SECTOR DE BALDOSAS CERÁMICAS. ... 46

6.1. Descripción de los equipos de proceso: ... 47

6.2. Análisis de los materiales de captura más adecuados para el proceso cerámico ... 51

7. VALIDACIÓN EN LABORATORIO DE MATERIALES DE CAPTURA SELECCIONADOS. ... 54

7.1. Estudio de validación de captura de CO_2 del material basado en óxidos metálicos. ... 54

7.2. Estudio de validación de captura de CO_2 de la zeolita comercial. ... 57

7.3. Análisis tecno-económico de captura de CO_2 en la industria cerámica. ... 59

© ITC-AICE 2025

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61

9. ANEXOS. 64

9.1. Información adicional de materiales de captura de CO_2..... 64

© ITC-AICE 2025

1. ANTECEDENTES.

La lucha contra el cambio climático se ha convertido en una prioridad estratégica a nivel global, especialmente tras la adopción del Acuerdo de París, que establece objetivos ambiciosos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En este contexto, los sectores industriales intensivos en energía y emisiones enfrentan el reto de adaptar sus procesos para contribuir al cumplimiento de los objetivos establecidos sin comprometer su competitividad.

La producción nacional de baldosas cerámicas, concentrada aproximadamente en un 97% en la provincia de Castellón, alcanzó los **416 millones de m²** en el año 2024, lo que representa un crecimiento en la producción del 5,6% respecto al año anterior.[1]

El sector cerámico es un gran consumidor de energía, especialmente de gas natural, el cual es el origen principal de las emisiones de CO_2 del sector. El incremento productivo del pasado año derivó en un aumento del consumo de gas natural, y, por ende, de las emisiones absolutas de dióxido de carbono verificadas, que se incrementaron en un 6% respecto a los 2,5 millones de toneladas emitidas en 2023.[1]

Alrededor del 9% de estas emisiones corresponden a emisiones de proceso, procedentes de la descarbonatación de las materias primas, que no pueden ser eliminadas mediante un cambio de combustible. En este caso, dada su naturaleza inherente al proceso de producción cerámico, una alternativa para su reducción sería la implementación de tecnologías de captura de carbono.

El sector fabricante de baldosas cerámicas es un sector incluido en el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones (EU ETS) y está considerado como uno de los sectores expuestos a riesgo de deslocalización o fuga de carbono, por lo que recibe asignaciones gratuitas de derechos de emisión. Sin embargo, los derechos gratuitos asignados no cubren el total de las emisiones generadas y hay previsión de que esta asignación se vaya reduciendo de manera significativa en los próximos años. Por ello, se prevé un incremento significativo de los costes asociados a las emisiones de CO_2, consecuencia de la creciente exigencia regulatoria y del encarecimiento de los derechos de emisión. Esta tendencia afectará de manera directa al sector cerámico, cuya actividad es intensiva en energía y emisiones, reduciendo su competitividad frente a otros productores.

La factura sectorial de CO_2 en 2024 fue aproximadamente de 37 millones de €, un 211% más elevada que en 2023, a pesar de que el precio medio de derecho de emisión había decrecido en 2024 hasta los 65,29 €/t (-22%). Como consecuencia, la factura sectorial de energía y de CO_2 en 2024 alcanzó los 829 M €, que supone el 17% de la facturación sectorial.[1]

El sector cerámico, por su carácter intensivo en consumo energético, lleva años invirtiendo en medidas de eficiencia como vía para mejorar su competitividad. A ello se suman los estrictos objetivos de reducción de emisiones establecidos por la Unión Europea, que obligan a las empresas a evaluar nuevas inversiones en tecnologías de descarbonización que les permitan garantizar el cumplimiento ambiental y avanzar hacia una producción más sostenible.

[1] Informe ASCER (2024). Disponible en: https://portal.ascer.es/wp-content/uploads/2025/06/Informe-ASCER-2024-1.pdf.

© ITC-AICE 2025

Una de las estrategias para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) es su captura directa en los focos de emisión. Esta técnica, conocida como captura de carbono, ha evolucionado significativamente en los últimos años, dando lugar a una amplia variedad de tecnologías y materiales con distintos grados de madurez, eficiencia y aplicabilidad. Las industrias que buscan implementar estas tecnologías se enfrentan al reto de identificar cuál se adapta mejor a sus necesidades específicas.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2023-2030)[2], en concreto la Medida 1.10, se centra en una serie de acciones diseñadas para cumplir con los objetivos de descarbonización, eficiencia energética y transición ecológica del sector industrial en España, e indica la inclusión de proyectos de captura, ya que se considera que forman parte de las soluciones claves que pueden contribuir de manera significativa a la descarbonización industrial.

A nivel europeo, se consideran las tecnologías de captura, almacenamiento y uso de CO_2 (CAUC) como tecnologías esenciales para alcanzar la neutralidad climática en 2050, especialmente en sectores industriales difíciles de descarbonizar como el sector cerámico. Tanto es así, que el II barómetro de la Plataforma Española de CO_2 (PTECO2) destaca que, aunque Europa avanza con marcos regulatorios y mecanismos de apoyo como el ETS, los Fondos de Innovación y los proyectos *Important Projects of Common European Interest* (IPCEI), España presenta un desarrollo incipiente debido a la falta de una hoja de ruta clara y de incentivos específicos.[3] Estas tecnologías no solo reducen emisiones, sino que representan una oportunidad estratégica para mantener la competitividad, atraer inversión y generar empleo. Por tanto, hay una necesidad urgente de acelerar la regulación, fomentar la colaboración público-privada y aprovechar los instrumentos europeos para impulsar proyectos piloto y demostrativos en la industria cerámica.

Se aprecia, pues, que el alcance de los objetivos globales establecidos para la reducción de dióxido de carbono requiere de la implementación de tecnologías para la captura y almacenamiento de carbono (CCS) o bien tecnologías de captura y usos de CO_2 (CCU). Estas tecnologías desempeñan un papel clave en la descarbonización de las industrias intensivas y su investigación actual está siendo abordada por diferentes grupos de investigación a nivel mundial y constituye un reto tecnológico actual.

A pesar de que las tecnologías de captura de CO_2 llevan asociadas costes de inversión relevantes (150 - 250 €/tonelada CO_2 capturado)[4], y de que actualmente no existen experiencias industriales de aplicación de técnicas de captura para condiciones de corrientes de gases industriales con bajas concentraciones de CO_2, es posible que, en un escenario futuro, cuando el precio de las tecnologías disminuya, y el desarrollo tecnológico avance, se puedan implementar estas tecnologías de captura de CO_2 en el sector.

En este contexto económico y técnico, es de gran interés el estudio de tecnologías que puedan minimizar las emisiones de CO_2 procedentes tanto de las materias primas, como de la combustión del gas natural. Entre las posibles tecnologías de descarbonización aplicables al sector cerámico, se encuentran las tecnologías de captura de CO_2, en las que

---

[2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2024). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030. Actualización*. Sección 3.1.3: Sectores difusos. Madrid: Gobierno de España. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/pniec-2023-2030/PNIEC_2024_240924.pdf

[3] https://pteco2.es/documentos/ii-barometro-de-las-tecnologias-cauc-2025/

[4] Cortes, V.; Navarrete, B.; Vega, F. *La captura y uso del CO2. Análisis estratégico, técnico y económico.* Disponible en: https://inercomunicacion.com/es/wp-content/uploads/cuadernos_energia_n62-INERCO-captura-CO2.pdf

© ITC-AICE 2025

la investigación y estudio de materiales de captura y su implementación a nivel comercial para instalaciones de captura industriales es una parte fundamental para el avance de las tecnologías y su eficiencia.[5,6]

Los gases de combustión de los equipos del proceso cerámico tienen una baja concentración de CO_2 (1 - 5 %), lo que dificulta y encarece la captura con las tecnologías comerciales actuales. La naturaleza distribuida, composición de los gases de combustión y el tamaño variable de las empresas cerámicas en España plantean desafíos adicionales para la implementación de infraestructura de captura a gran escala, a pesar de que el desarrollo de la captura de CO_2 del aire ya es una realidad técnica y permite capturas de CO_2 en concentraciones de 400 partes por millón de dióxido de carbono, estando implementado a escala comercial en distintos países por diversas empresas.[7, 8, 9]

Desde una perspectiva técnica y económica, para la implementación industrial de las tecnologías de captura de CO_2, es necesario el desarrollo de nuevos materiales para la captura que sean eficientes, económicos y basados en materias primas abundantes que permitan su disponibilidad para una industria pionera y creciente como es la relativa al sector de la descarbonización.

Por tanto, para la implementación de las tecnologías de descarbonización basadas en la captura de CO_2 se considera estratégico y necesario poder evaluar y testear los materiales en desarrollo y disponibles para las tecnologías de captura de CO_2 aplicables al sector cerámico.

En base a estos antecedentes y necesidades, se ha planteado este trabajo de asesoramiento tecnológico y experimental, centrado en el análisis de materiales para la captura de CO_2 en el sector de baldosas cerámicas.

Este proyecto representa una excelente oportunidad para que el sector cerámico inicie el desarrollo de soluciones orientadas a la captura de CO_2, en el marco de sus esfuerzos de descarbonización. La identificación de materiales eficaces, sostenibles y económicamente viables para la captura de carbono, así como su validación en laboratorio, constituye una necesidad apremiante para el sector, que requiere comenzar la adaptación de soluciones tecnológicas ya implementadas en industrias donde la concentración de CO_2 en la corriente de gases es mayor.

El análisis de materiales existentes y los ensayos de laboratorio realizados en este trabajo sobre materiales para captura de CO_2, establece las bases iniciales para la investigación e implementación de técnicas de captura de CO_2 adaptadas específicamente a las características y requerimientos del sector cerámico.

---

[5] Raganati, Federica and Paola Ammendola. *CO2 Post-combustion Capture: A Critical Review of Current Technologies and Future Directions*. Energy & Fuels, 2024, 13858. DOI:10.1021/acs.energyfuels.4c02513

[6] Raganati, F.; Miccio, F.; Ammendola, P.; *Adsorption of Carbon Dioxide for Post-combustion Capture: A Review*. Energy Fuels, 2021, 35, 16, 12845–12868. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c01618

[7] https://carbonherald.com/top-20-direct-air-capture-companies/

[8] https://climeworks.com/direct-air-capture

[9] https://www.heirloomcarbon.com/

© ITC-AICE 2025

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

El objetivo principal del proyecto “Análisis de materiales para la captura de CO_2 en el sector de baldosas cerámicas” es realizar un estudio tecnológico de materiales destinados a la captura de CO_2, con aplicación específica al sector cerámico. Este estudio prospectivo se centra en el análisis de los distintos materiales disponibles, tanto en fase de investigación como comerciales, así como en la evaluación de sus características, con el fin de establecer una base sólida para una posible validación experimental en futuros proyectos.

El trabajo aborda la selección, análisis, y validación técnica de materiales en laboratorio, desde la perspectiva de su eficacia en la captura de CO_2 en bajas concentraciones, identificando aquellos que reúnan las propiedades más adecuadas para su implementación en el sector cerámico.

La información obtenida en el proyecto permitirá conocer los distintos materiales de captura de CO_2 disponibles y conocer los avances técnicos de los mismos, así como analizar los resultados de su aplicación en laboratorio bajo unas condiciones específicas de trabajo seleccionadas, representativas de la situación en este sector.

Los resultados de este estudio pretenden ser el punto de partida para la implementación de tecnologías de captura de CO_2 en el sector con una base técnica sólida e independiente, que permitirá la toma de decisiones en la elección de materiales óptimos y aplicables para la descarbonización del sector cerámico con todas sus particularidades.

Para alcanzar el objetivo propuesto, el proyecto se ha estructurado en tres actividades principales, que se describen a continuación, y que forman parte del presente informe.

ACTIVIDAD 1: Análisis de tecnologías y materiales para captura de CO_2.

ACTIVIDAD 2: Prospectiva de aplicación de los materiales a las necesidades del sector cerámico.

ACTIVIDAD 3: Validación de materiales de captura seleccionados en el entorno de laboratorio.

Los principales resultados esperados de estas actividades son:

- Evaluación de materiales de captura de CO_2 y de sus condiciones de trabajo.
- Análisis del potencial de aplicación de estos materiales en los equipos de proceso del sector cerámico.
- Ensayos en laboratorio para validación de la capacidad de captura de CO_2 de materiales seleccionados en condiciones diluidas (2% CO_2) aplicables a la industria cerámica.
- Análisis tecno-económico estimado del coste de la captura de CO_2 con los materiales seleccionados aplicada al sector cerámico.

3. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO_2.

Se han desarrollado múltiples enfoques para la captura de carbono debido a que las condiciones del proceso, como la concentración de CO_2, la temperatura, la presión y la presencia de otros contaminantes, varían significativamente según la fuente de emisión.

© ITC-AICE 2025

Por tanto, existen diversas tecnologías de captura de CO_2, bien sean para la captura de este gas a distintas concentraciones en corrientes industriales (fuentes puntuales o concentradas), o bien captura del aire (tecnologías de captura directa de aire (DAC)), en las que el CO_2 se captura en concentraciones alrededor de 400 ppm.

En el caso de captura de CO_2 de procesos de combustión industriales o corrientes concentradas, se conocen tres tipologías principales de captura que se diferencian en base a la etapa en la que se realiza la separación del CO_2 de otros gases presentes en la corriente de combustión. Las estrategias de captura de CO_2 pueden implementarse en tres etapas del proceso en instalaciones industriales: **precombustión**, **combustión** y **postcombustión**. De entre estas opciones, las tecnologías aplicadas en las etapas de precombustión y durante la combustión suelen ser menos favorables, debido a sus elevados costes y a la pérdida de eficiencia del proceso asociada a los tratamientos químicos y de separación requeridos.

La captura de carbono en fase de postcombustión es actualmente la estrategia más prometedora para instalaciones industriales de combustión ya existentes, aunque también la más desafiante.

En el caso del sector cerámico, el principal reto radica en la baja concentración de CO_2 presente en los gases de combustión (o gases de escape) de las distintas etapas del proceso de fabricación. Además de la baja concentración, la presencia de contaminantes en los gases como los compuestos ácidos (SO_2, HF, HCl) y los compuestos de nitrógeno (NO_x) representa otro factor crítico que afecta negativamente la eficiencia de los procesos de captura de carbono. En el sector cerámico, donde se utiliza gas natural como combustible, las emisiones de NO_x no son muy relevantes atendiendo al valor límite de emisión, aunque su presencia en los gases dificulta la captura del CO_2.

Las **tecnologías de postcombustión actuales** utilizadas para captura de carbono pueden clasificarse **según** el **tipo de proceso** en tres categorías principales: basadas en absorción, basadas en reacción química y basadas en adsorción. La Figura 1 muestra las tecnologías de captura de carbono clasificadas según el proceso y los materiales empleados.

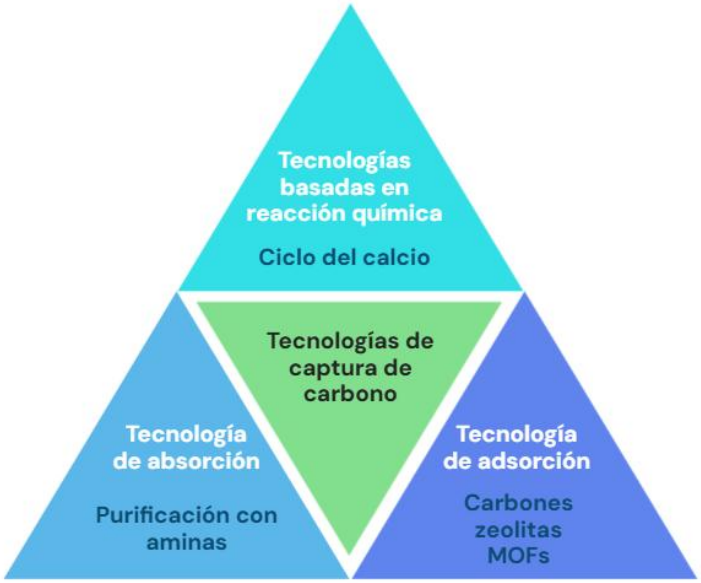


Figura 1: Tecnologías de postcombustión de captura de carbono según el tipo de proceso y materiales. Fuente: © ITC.

© ITC-AICE 2025

A continuación, se realiza una breve descripción de las principales tecnologías existentes de captura de CO_2 en postcombustión[10], así como de los materiales empleados en las mismas.

3.1. Tecnología basada en absorción.

La absorción se basa en la transferencia del CO_2 desde la fase gaseosa hacia una fase líquida que actúa como disolvente. En este proceso, el CO_2 es capturado mediante su disolución química o física en un portador líquido, el cual debe regenerarse posteriormente. La regeneración del líquido de absorción constituye la etapa de desorción o liberación de CO_2, y se lleva a cabo normalmente mediante un aumento de temperatura o una reducción de la presión, condiciones que permiten romper el enlace absorbente-CO_2.

En este proceso, para que el disolvente sea eficaz, éste debe presentar las siguientes características: una capacidad adecuada para la absorción de CO_2, una cinética de absorción rápida, una presión de vapor insignificante y una alta estabilidad química y térmica. La etapa de desorción o liberación del CO_2 del disolvente suele requerir energía en forma de calor o de vapor.

La Figura 2 muestra distintos materiales utilizados en absorción en función de su naturaleza y si su mecanismo de absorción es físico o químico.

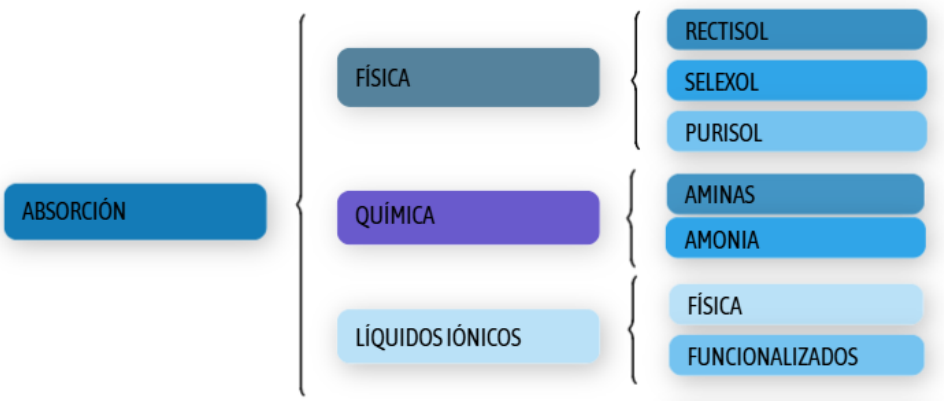


Figura 2: Materiales utilizados en metodologías de absorción de CO_2. Fuente: © ITC.

Las aminas son los absorbentes químicos por excelencia y ya existen instalaciones comerciales de captura de CO_2 disponibles en la industria basados en su tecnología.[11,12]

La técnica de **depuración o *scrubbing* con aminas** existe a escala industrial[12] y se basa en la absorción química, donde el CO_2 se solubiliza en soluciones líquidas de aminas como dietanolamina (DEA), metildietanolamina (MDEA), diisopropanolamina (DIPA) y aminoetoxietanol (diglicolamina, DGA).

Consiste en hacer pasar el gas por una solución líquida que contiene aminas, las cuales reaccionan químicamente con el CO_2 para retenerlo. Luego, el CO_2 se puede liberar mediante calentamiento y la solución se regenera.

---

[10] *Gestión del CO_2 atmosférico. Una introducción a las tecnologías*. Mariano Marzo, Fundación Naturgy. 2024.

[11] https://www.fluor.com/services-and-expertise/innovation-and-expertise/technologies-and-processes/fluor-econamine-fg-plus

[12] https://www.mhi.com/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/e461/e461020.pdf

© ITC-AICE 2025

El proceso consta de dos etapas, tal y como se representa en la Figura 3.

- Etapa 1: la solución absorbente entra en contacto con los gases de combustión para capturar el dióxido de carbono.
- Etapa 2: la solución rica en CO_2 se transfiere a un reactor de regeneración (*stripper*), donde se aplica una temperatura superior a 100 º C (100 - 130 º C) que requiere una energía de 3,4 - 4 GJ/t CO_2 para liberar el CO_2.

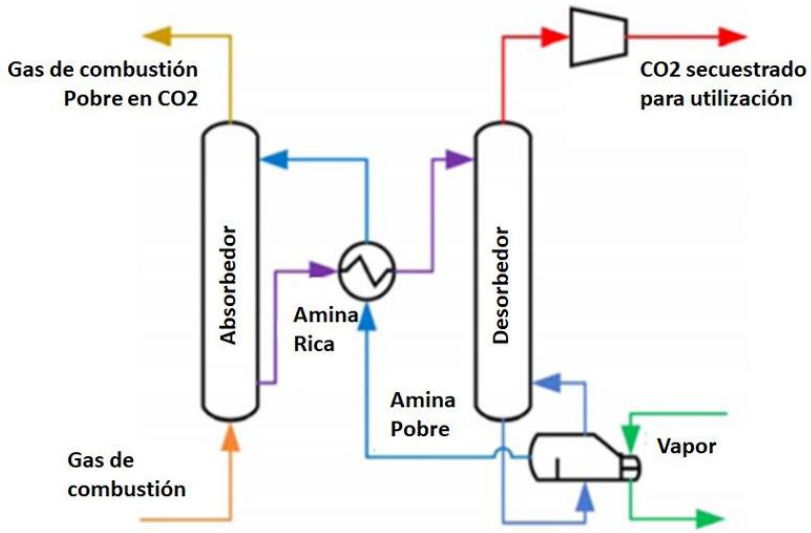


Figura 3: Diseño de un proceso convencional de captura de CO_2 con aminas. Fuente: Ref.13

A pesar de que la absorción con aminas ha llegado a mercado, éstas tienen desventajas conocidas que hacen necesaria la investigación constante. Debido principalmente a su toxicidad, corrosión, degradación oxidativa con los ciclos de captura y su alta demanda energética para su regeneración, se están desarrollando nuevos absorbentes que mejoren estos inconvenientes de las aminas.

De este modo, las nuevas investigaciones orientan su trabajo hacia el estudio de mezclas de aminas con disolventes de cambio de fase o nuevos absorbentes como los líquidos iónicos o las sales alcalinas obtenidas a partir de aminoácidos, todos ellos absorbentes en investigación que mejoran las desventajas iniciales de las aminas.

Tal y como veremos más adelante, los factores que afectan a la viabilidad de una tecnología de captura de carbono están relacionados principalmente con el **consumo energético**, la **capacidad de captura**, la **estabilidad del sistema** y los **costes operativos**.

La Figura 4 analiza las ventajas e inconvenientes de los materiales, según su categoría, en los procesos de absorción química en función de sus características de rendimiento.

[13] D. H. Tirado Ballesteros y L. M. Umaña Caballero. Trabajo de grado: “Estudio Conceptual de la Tecnología de Captura de CO_2 por medio de la absorción de aminas y su efecto en la corrosión de aceros al carbono”.

© ITC-AICE 2025

Figura 4: Análisis de los materiales de absorción para captura de CO_2 en función de sus características de rendimiento. Fuente: Ref.14 adaptado por © ITC.

3.2. Tecnología basada en adsorción.

En el caso de la captura de CO_2 en postcombustión, la tecnología de separación basada en adsorción sólida se presenta como una alternativa prometedora, ya que ofrece importantes ventajas como su menor consumo energético y una mayor flexibilidad para adaptarse a plantas ya existentes en comparación con la captura basada en absorción con aminas. La adsorción se refiere a la acumulación de CO_2 en la superficie de un adsorbente, a menudo muy poroso y con una gran superficie específica por unidad de masa.

En este método, el dióxido de carbono presente en los gases de combustión se adsorbe selectivamente sobre la superficie de un sólido poroso, mediante interacciones físicas o químicas. Posteriormente, el material poroso se somete a cambios de temperatura o presión para inducir la liberación del CO_2.

Los adsorbentes sólidos suelen tener energías de regeneración más bajas que las de los disolventes debido a una menor capacidad térmica.

La Figura 5 muestra un esquema general y materiales utilizados en adsorción de CO_2.

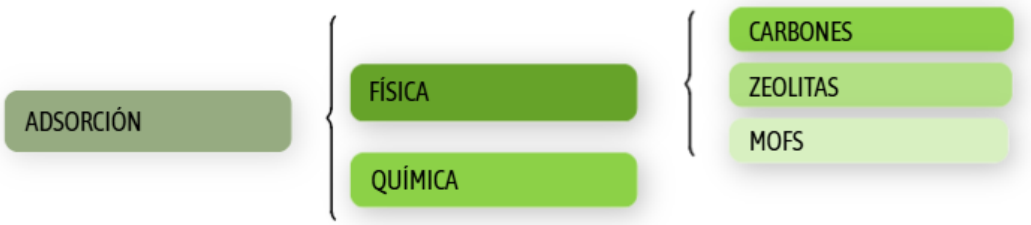


Figura 5: Materiales utilizados en metodologías de adsorción de CO_2. Fuente: © ITC.

[14] Tan, J.Z.Y., Uratani, J.M., Griffiths, S. *et al. Chemistry advances driving industrial carbon capture technologies*. Nat Rev Chem, 2025, 9, 656–671. DOI: https://doi.org/10.1038/s41570-025-00733-3.

© ITC-AICE 2025

Los adsorbentes más utilizados incluyen:

- Materiales basados en carbono (como carbón activado, grafeno, entre otros).
- Zeolitas, ampliamente utilizadas y materiales de referencia en captura de CO_2.
- Metal-Organic Frameworks (MOFs)[15], una clase novedosa de materiales cristalinos.
- Materiales funcionalizados, son soportes sólidos a los que se les ancla o impregnan moléculas de materiales sorbentes líquidos.
- Resinas poliméricas, se trata de sorbentes orgánicos poliméricos.

La Figura 6 analiza las ventajas e inconvenientes en cuanto a diferentes características en los procesos de adsorción empleando distintos materiales.

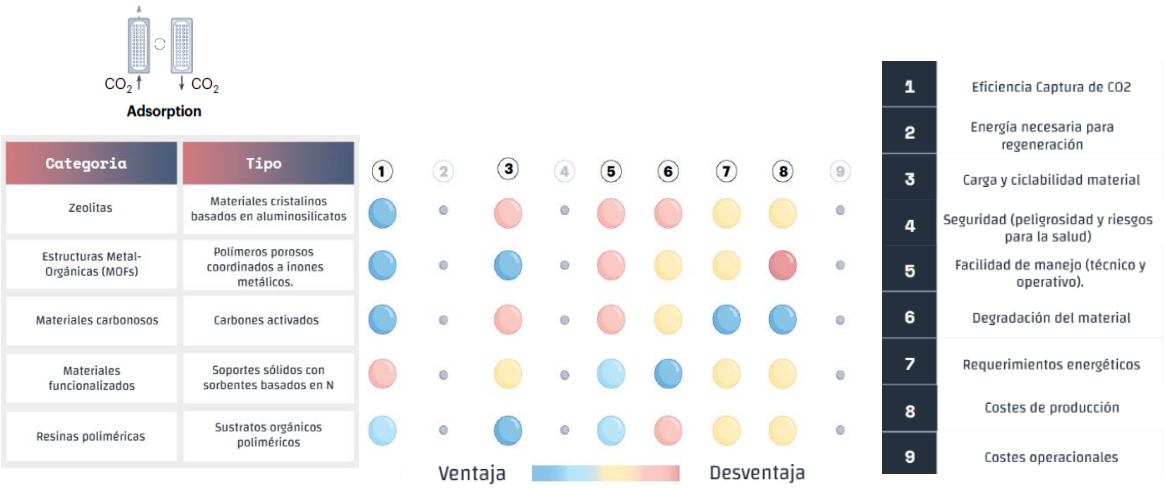


Figura 6: Análisis de los materiales de adsorción para captura de CO_2 en función de sus características de rendimiento. Fuente: Ref.14 adaptado por © ITC.

3.3. Tecnología basada en reacción química.

La tecnología de carbonatación-calcinación (***calcium looping***) se basa en una reacción química reversible, en la que compuestos de óxido de calcio reaccionan con los gases de combustión para capturar el CO_2 (Figura 7).

En la etapa de carbonatación, el CaO reacciona con el CO_2 formando carbonato de calcio ($CaCO_3$) a una temperatura óptima de 650 º C. Este compuesto se transfiere a otro reactor donde, mediante calcinación a alta temperatura (900 º C), se induce la reacción inversa, liberando una corriente de dióxido de carbono de alta pureza.

La tecnología de carbonatación-calcinación está en fase piloto avanzada en Europa, demostrando capturas superiores al 90–99% en sectores de difícil abatimiento como cemento y acero. Su ventaja es clave ya que utiliza CaO, un material barato y abundante,

[15] https://www.bbc.com/mundo/articles/cq5jnj269y0o

© ITC-AICE 2025

que incluso forma parte de la propia cadena cerámica. Además, esta tecnología permite reciclar el adsorbente y aprovechar el calor residual disponible en las empresas, integrándose sin comprometer la calidad del producto.

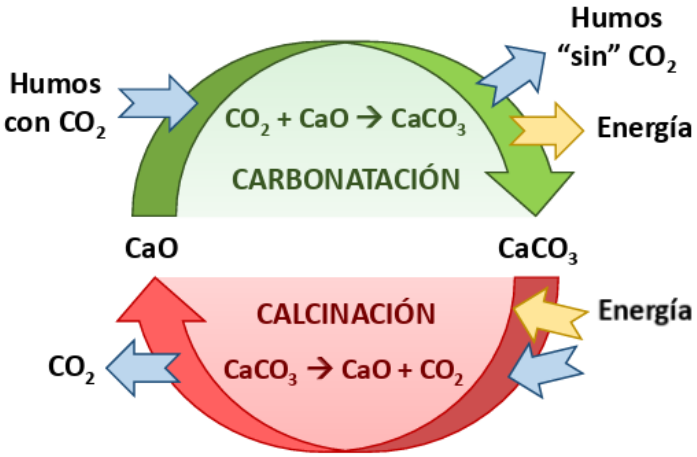


Figura 7: Esquema de un proceso carbonatación-calcinación para captura de CO_2. Fuente: Ref. 16.

3.4. Otras tecnologías emergentes

La captura de las moléculas de CO_2 contenidas en los gases de combustión en instalaciones industriales puede realizarse también mediante tecnologías de membranas, CO_2 supercrítico o criogenia y tecnologías basadas en reacciones redox en un material. Son tecnologías incipientes, en estados de desarrollo muy tempranos, lejos por tanto de su aplicación industrial.

Estas tecnologías están en fase experimental para la captura en postcombustión y son, por ejemplo, sistemas híbridos que combinan ventajas de diferentes tecnologías (adsorbentes sólidos y membranas), bucles químicos y bombas electroquímicas (Figura 8).

Figura 8: Tecnologías y materiales utilizados para captura de CO_2. Fuente: © ITC.

[16] Maria Elena Diego de Paz, Apuntes captura de CO_2.

© ITC-AICE 2025

Membranas

La separación de gases mediante membranas es un proceso impulsado por la presión. Las membranas permiten la separación selectiva de CO_2 de mezclas gaseosas mediante diferencias en la permeabilidad[17].

Los procesos de membrana ofrecen un mayor rendimiento de separación cuando la concentración de CO_2 aumenta en la mezcla de alimentación. Los diseños de membranas incluyen materiales metálicos, poliméricos o cerámicos capaces de funcionar a temperaturas elevadas y que utilizan una variedad de mecanismos químicos o físicos para la separación. Las membranas poliméricas, de transporte facilitado y de matriz mixta están en desarrollo para mejorar la selectividad y estabilidad térmica. Son especialmente atractivas por su bajo consumo energético y posibilidad de integración en sistemas modulares.

En general, la baja concentración de CO_2 y la poca presión de los gases industriales en la chimenea de salida, dificulta el empleo de membranas en sectores con estas características, como es el sector cerámico.

Criogenia

Este método de separación de CO_2 de una corriente de gases utiliza bajas temperaturas para la condensación, separación y purificación del CO_2 presente en los gases de combustión. Permite la producción directa de CO_2 líquido que se puede guardar o almacenar a alta presión.

Bucle químico

El bucle químico es un ciclo de reacciones químicas donde un material sólido (generalmente óxido metálico) se oxida y se reduce para capturar y liberar CO_2. Por tanto, se fundamentan en reacciones de oxidación-reducción reversibles (Figura 9). Es una tecnología térmica y suele operar a alta temperatura. Esta tecnología se utiliza en combustión con separación intrínseca de CO_2. Sus aplicaciones se llevan a cabo con reactores de lecho fluidizado interconectados o aplicaciones con reactores de lecho fijo.

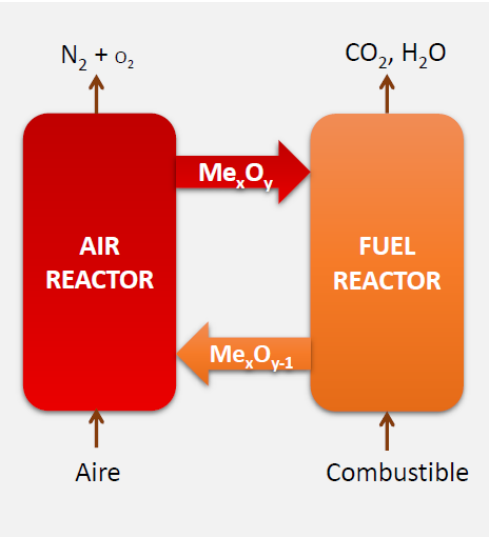


Figura 9: Tecnologías de bucle químico para captura de CO_2. Fuente: Ref. 16.

[17] Rana & Andino. *A Review of Materials for Carbon Dioxide Capture.* Catalysts 2025, 15(3), 273. Disponible en: https://www.mdpi.com/2073-4344/15/3/273

© ITC-AICE 2025

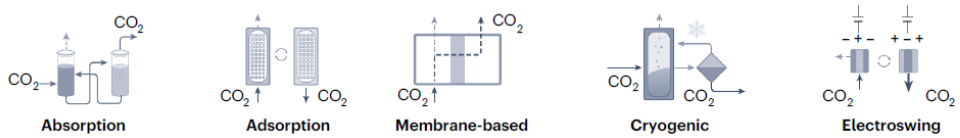
Bombas electroquímicas

Las bombas electroquímicas de CO_2 son dispositivos que emplean energía eléctrica para impulsar reacciones electroquímicas que separan o transportan CO_2. Normalmente implican membranas iónicas y electrodos para mover el CO_2 entre fases. Esta tecnología incluye conductores de carbonato y protones, que ya han sido estudiados en pilas de combustible alcalinas acuosas y de carbonato fundido para su uso en la separación de CO_2 en gases de combustión y del aire. Se captura y libera dióxido de carbono de forma reversible mediante la aplicación de potencial eléctrico, ofreciendo una alternativa eficiente y controlable para la captura en procesos industriales o ambientales. Es una tecnología electroquímica con potencial para integración en procesos donde hay electricidad renovable.

Además de todas las tecnologías mencionadas, se están investigando también procesos de fijación biológica (fotosíntesis natural) y la carbonatación mineral para transformar el CO_2 en materiales que almacenan carbono mediante procesos de mineralización de CO_2.

3.5. Situación industrial actual de las tecnologías de captura.

A modo de resumen, el siguiente esquema representado en la Figura 10 muestra las características principales de algunas de las tecnologías de captura de CO_2 comentadas anteriormente y que han sido resumidas en la literatura científica.



	Absorption	Adsorption	Membrane-based	Cryogenic	Electroswing
Driving force for seperation	Heat (solvent) regeneration	Heat and/or pressure change (to vary sorption capacity)	Selective permeability	Sublimation/ solidification	Electricity
Reactor design	Dual vessel	Tubular, fixed bed (heat exchanger)	Multistage Tubular, spiral wound	Multistage Multiwall (heat exchanger)	Single-vessel Multi-cell (electrochemical)
Energy consumption	2.1–3.3 kWh kg^{-1}	1.2–2.7 kWh kg^{-1}	2.5–4.6 kWh kg^{-1}	0.4–1.8 kWh kg^{-1}	1–2.5 kWh kg^{-1}
Operating temperature	85–140 °C	60–100 °C	<100 °C	–100 °C to –140 °C	25–40 °C
CO_2 recovery	80–95%	90–95%	69–86%	95–99.99%	NA
Moisture impact	May lower CO_2 solubility in solvent	May alter sorption material CO_2 affinity	May alter membrane selective permeability	May form solid CO_2 clathrates and ice	Minimal impact reported
Materials	• Amines • Ionic liquids • Phase-change solvents	• Zeolite • Metal-organic framework • Activated carbon • Polymeric resins	• Graphine • Organic • Inorganic • Mixed matrix	• Ceramic, glass, steel* • Aqueous solutions	• Quinones • Ferrocenes • Carbon nanotubes
Industrial challenges	• High energy consumption • Corrosion caused by the degradation of amines • Emissions of the corrosive solvent to the environment	• Lack of CO_2 selectivity • Sensitivity to impurities and water vapour in flue gas	• Moderate product purity • Mositure impacts CO_2 selectivity	• Costly pretreatment to remove moisture • Formation of solid CO_2 can lower heat exchanger efficiency	• Technology not yet proven at commercial scale

Figura 10: Visión general de las tecnologías para captura de CO_2 en fuentes puntuales. Fuente: Ref. 14.

Actualmente, las industrias que buscan capturar CO_2 a gran escala están utilizando disolventes, especialmente aminas, a pesar de sus inconvenientes. Se prevé que la introducción de nuevas composiciones químicas para las tecnologías de captura de CO_2 novedosas, como soluciones mezcladas de aminas, y disolventes con impedimentos

© ITC-AICE 2025

estéricos, vayan aumentando su grado de madurez y puedan escalarse para su implementación comercial a medio plazo.

Por otra parte, las tecnologías de adsorción ya muestran una eficiencia de recuperación de CO_2 del 90-95%, siendo estos valores superiores con respecto a las tecnologías de absorción (80-95%) y membranas (69-86%). Sin embargo, todavía hay mucho trabajo que avanzar con relación a la sensibilidad a las impurezas de los materiales y la selectividad al CO_2, evitando pérdidas de eficacia del proceso.

Asimismo, nuevas clasificaciones tecnológicas, como la captura de carbono mediante oscilación eléctrica (*electroswing*), se espera que tengan un papel cada vez más relevante en la captura de carbono industrial en los próximos años y que permitan reducir los costes energéticos del proceso de regeneración de los materiales de captura de CO_2.

A continuación, en la Tabla 1 se indica la madurez tecnológica e industrial de proyectos desarrollados en tecnologías de captura y usos de CO_2.

Tabla 1: Nivel de madurez de la tecnología y estado de los proyectos CCU a nivel industrial.[14]

	Type	Industrial technology developers	Industrial use, pilot and demonstration projects	Indicator Year Value	TRL [a] 2020	TRL [b] 2023
Absorption	Traditional amines (e.g., MEA ,DEA)	Various (e.g., Fluor, Shell, Dow, Kerr-McGee, Aker Carbon Capture)	Natural gas processing plants, ammonia/fertilizer, soda ash		9	
	Physical solvent (Selexol, Rectisol)	UOP, Linde and Air Liquide	Natural gas processing plants, coal gasification plants		9	
	Benfield process and variants	UOP	Ammonia/fertilizer plants		9	
	Sterically hindered amine	MHI, Toshiba, CSIRO, others	Coal-fired power plant (Petra Nova, WA)		6–9	
	Enzymatic solvents	Novozymes/Novonesis	Pilot			6–8
	Chilled ammonia process	GE, Alstom	Coal-fired power plant, refining off-gases		6–7	
	Water-Lean solvent	Ion Clean Energy, CHN Energy, RTI	Ion Clean Energy's Gerald Gentleman station carbon capture, CHN Energy's Jinjie pilot plant		4–7	
	Phase change solvents	IFPEN/Axens, CERI	DMX™ Demonstration		5–6	5–7
	Direct ocean capture (DOC)	Captura	Pilot			4–5
	Amino acid-based solvent/ Precipitating solvents	Siemens, GE, CarbonCapt, KC8 Capture Technologies	N/A		4–5	4–6
	Encapsulated solvents	N/A	N/A		2–3	
	Ionic liquids	N/A	N/A		2–3	
Adsorption	Pressure Swing Adsorption (PSA) / Vacuum Swing Adsorption (VSA)	Air Liquide, Air Products, UOP, CAPSOL	Air Products Port Arthur SMR CCS		9	9
	Temperature Swing Adsorption (TSA)	Svante	Large pilot tests		5–7	
	Enzyme Catalysed Adsorption	CO_2 Solutions	Pilot demonstrations		6	
	Sorbent-Enhanced Water Gas Shift (SEWGS)	ECN	Pilot tests		5	
	Metal-Organic Frameworks (MOFs)	Nuada, Svante, Promethean Particles	Pilot tests			4–6
	Electrochemically Mediated Adsorption	N/A	N/A		1	
Membrane-based	Polymeric Membranes	UOP, Air Liquide, MTR	Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS		9	
	Electrochemical membrane integrated with MCFCs	FuelCell Energy	Large pilot		7	
	Polymeric Membranes / Cryogenic separation Hybrid	Air Liquide, Linde Engineering, MTR	Pilot studies		6	7
	Polymeric Membranes / Solvent Hybrid	MTR, CO2Tech	N/A		4	
	Room Temperature Ionic Liquid (RTIL) Membranes	N/A	N/A		2	4–6
	Cryogenic post-PSA Hybrid (Cryocap)	Air Liquide	Pilot demonstrations			
Cryogenic	Cryogenic purification and compression (Cryocap XLL)	Air Liquide	Pilot demonstrations			6–7
	Cryogenic membrane system (Separex)	Honeywell	Pilot demonstrations			6–7
Electroswing	Electrochemical cell	N/A	N/A			4–5
Other	Calcium looping	Carbon Engineering, Sumitomo	Large pilot		6–7	
	Chemical Looping	B&W	Pilot tests			6–7
	Chemical Looping Combustion	Alstom	Pilot tests		5–6	5–6

Note: Sources:
[a] Global CCS Institute (2021). "Technology readiness and costs of CCS"
[b] Global CCS Institute (2023). "State of the Art: CCS Technologies 2023"

© ITC-AICE 2025

De los datos expuestos en la Tabla 1, podemos concluir que el estado de las tecnologías descritas en este informe y que describe la situación industrial actual con ejemplos industriales conocidos es el siguiente:

- Tecnologías de absorción con aminas → TRL 9 con implementación comercial en varias plantas operativas.
- Tecnologías carbonatación-descarbonatación → TRL 6 – 7 con pilotos avanzados, cerca de comercialización.
- Tecnologías de adsorción con sorbentes sólidos → TRL 9 utilizando tecnologías PSA / VSA.
- Tecnologías de adsorción con MOFs → TRL 4 – 6, por tanto, en fase de demostración y estadío no comercial.
- Tecnologías de captura directa del aire (DAC) → TRL 7 – 8 con plantas comerciales operativas, pero con un coste elevado todavía.

A pesar de que las tecnologías basadas en absorción con aminas son las tecnologías más maduras y que ya están implementadas a nivel industrial (TRL 9), su uso conlleva problemas técnicos ya comentados relacionados con su toxicidad, corrosión y además requieren de reactores con grandes volúmenes de amina para que la captura sea efectiva, lo cual la hace una tecnología poco atractiva para la industria cerámica.

Por otra parte, las tecnologías basadas en adsorción en sólidos y carbonatación-calcinación son las más adecuadas y prometedoras para el sector cerámico al ser tecnologías compatibles con corrientes de gases de combustión que incluyen otros contaminantes como partículas y gases ácidos, además de estar basadas en materiales económicos y abundantes, como es el óxido de calcio.

Además, el uso de tecnologías basadas en sorbentes sólidos evita la penalización energética que presentan sistemas líquidos como las aminas y pueden integrar el propio calor residual del proceso, reduciendo costes operativos.

Invertir en tecnologías de captura de CO_2 como la adsorción, no es solo una decisión tecnológica, sino una estrategia empresarial para asegurar la competitividad y sostenibilidad del sector cerámico. Son soluciones adaptadas a las condiciones propias del proceso, con materiales y procesos que ya han demostrado su viabilidad en entornos industriales similares. Apostar por ellas hoy significa liderar la transición hacia una cerámica descarbonizada.

3.6. Definición de un sistema de captura de CO_2 basado en tecnologías de adsorción.

El estudio y análisis de la tecnología de captura de CO_2 mediante adsorción aplicada a postcombustión requiere del análisis de las siguientes disciplinas, tal y como se resume en la Figura 11:

- Selección del material en función del análisis del rendimiento de adsorción de CO_2 de diferentes clases de sorbentes sólidos, según los parámetros de evaluación más relevantes (capacidad de adsorción en equilibrio, estabilidad en múltiples ciclos, etc.).
- Estudio de la configuración del reactor de los dos principales sistemas de contacto gas-sólido: lechos fijos y lechos fluidizados, destacando sus ventajas y limitaciones.

© ITC-AICE 2025

- Estudio de las posibilidades de regeneración de los materiales empleados (variaciones de temperatura, presión o combinaciones híbridas), con especial atención a las estrategias disponibles para reducir el consumo energético asociado.

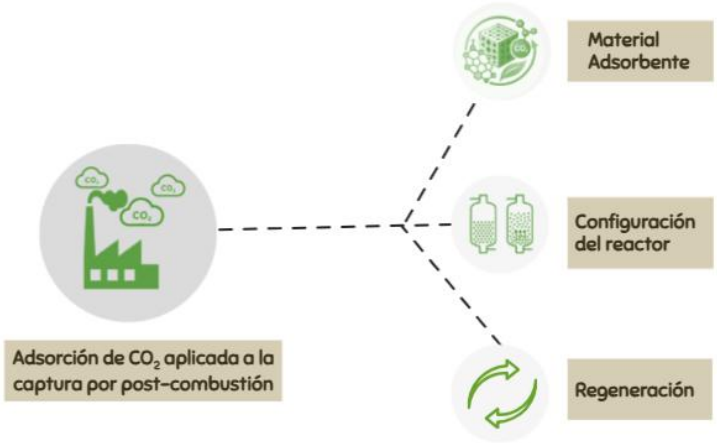


Figura 11: Configuración para captura de CO_2 en procesos de postcombustión. Fuente: © ITC.

Estos puntos son prioritarios a la hora de poner en marcha un proyecto de captura de CO_2, puesto que hay que integrar adecuadamente el tipo de adsorbente con el diseño del reactor y la estrategia de regeneración. Un estudio pormenorizado de la cinética del material, sus rangos de trabajo y necesidades para la regeneración es crucial para la viabilidad del proyecto de captura.

La eficacia de la tecnología de captura de dióxido de carbono (CO_2) depende en gran medida de las propiedades de los **materiales adsorbentes** empleados para cada una de las tecnologías conocidas. En el apartado 4 de este informe se desarrollarán las distintas familias de materiales basadas en mecanismos de adsorción utilizados para captura de CO_2.

Existen diferentes configuraciones posibles para el **reactor** en el que se ponen en contacto los gases y el material adsorbente. Podemos distinguir:

- Lechos fijos: sencillos y con buen rendimiento termodinámico, pero limitados por altas pérdidas de presión y baja transferencia de calor.

- Lechos móviles: permiten operación continua y mejor regeneración térmica, aunque son más complejos de operar.

- Lechos fluidizados: destacan por su excelente transferencia de calor y posibilidad de operación continua, pero sufren de baja capacidad de trabajo por mezcla interna. Se propone el uso de lechos fluidizados multietapa para mejorar la eficiencia.

Respecto a la **regeneración del material** y desorción del CO_2, se puede realizar mediante tres estrategias diferentes, en función de la variable que se modifique:

- Variación por ciclos de cambio de temperatura (Temperature Swing Adsorption, TSA): regeneración por calentamiento. Es eficaz, pero puede implicar altos costes energéticos. El material se calienta para romper los enlaces químicos y liberar el CO_2. Una vez que el CO_2 se ha desorbido, el material se enfría de nuevo a la temperatura de trabajo.

© ITC-AICE 2025

- Variación por ciclos de cambio de presión (Pressure Swing Adsorption, PSA): Se utiliza para la fisisorción. El CO_2 es adsorbido a alta presión y liberado al reducir la presión. La temperatura se mantiene constante.

- Variación por ciclos de vacío (Vacuum Swing Adsorption, VSA): regeneración por reducción de presión. Requiere vacío profundo o presurización, lo que puede ser costoso.

- Combinaciones de ciclos de variación:

    - Variación de presión y temperatura (PTSA): Combina presión y temperatura. Se utiliza cuando el mecanismo de adsorción es una combinación de fisisorción y quimisorción débil.

    - Variación de vacío y temperatura (Vacuum-Temperature Swing Adsorption, VTSA): combinación de temperatura y vacío, que permite reducir el consumo energético y mejorar la pureza y recuperación de CO_2.

4. ESTUDIO DE MATERIALES DE CAPTURA DE CO_2 POR ADSORCIÓN.

Los materiales utilizados en la captura de CO_2 por adsorción, se pueden clasificar en varias categorías. La Figura 12 muestra los tipos de materiales adsorbentes más utilizados.

Figura 12: Materiales adsorbentes para captura de CO_2. Fuente: © ITC y Ref. 18.

Un proceso de adsorción de una corriente gaseosa implica que las moléculas en fase gas sean capturadas en la superficie de los sólidos empleados para dicho proceso.

[18] Himangi Neve, Deven Kadam, Chinmay Sadadekar, Vinayak Wadgaonkar, Siraj Bhatkar and Prasad Wadekar. *Carbon Capturing Materials: A Review of Their Recent Modification Approaches and Implementation for Industrial Applications. Sorption- New Perspectives and Applications.* IntechOpen, 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1005188

© ITC-AICE 2025

La **adsorción** es un proceso en el que las moléculas de CO_2 se fijan en la superficie de un sólido por interacciones físicas o químicas. Por tanto, la adsorción de CO_2 en materiales sólidos puede ocurrir a través de dos mecanismos principales:

- **Adsorción física (fisisorción)**: este proceso se basa en las interacciones de Van der Waals y dipolo-dipolo entre el CO_2 y la superficie del material. El proceso es exotérmico, débil y reversible. La fisisorción es predominante a bajas temperaturas y altas presiones. Materiales como son las zeolitas, carbones activados y ciertos MOFs siguen este mecanismo. Estos materiales son fácilmente regenerables y tienen buena estabilidad térmica, pero su capacidad de adsorción se ve afectada por la humedad y los contaminantes.

  La **regeneración** se realiza fácilmente mediante una reducción de presión (Pressure Swing Adsorption, PSA) o un aumento de temperatura moderado (Temperature Swing Adsorption, TSA). Estos materiales tienen cinéticas rápidas de adsorción, pero su desempeño cae con humedad por competencia de H_2O, particularmente en zeolitas tipo X/13X. Por otra parte, los calores de adsorción típicos para las zeolitas 13X son en torno al ~25–45 kJ mol^{-1}.

  La fisisorción se caracterizada por la baja temperatura para la adsorción (alrededor de 10 KJ/mol), permitiendo una adsorción reversible.

- **Adsorción química (quimisorción)**: implica formación de enlaces químicos entre el CO_2 y posiciones específicas en la superficie del sólido donde ocurre la reacción química para formar carbonatos o bicarbonatos. Es un proceso más fuerte y selectivo que la fisisorción. Para la captura de CO_2, se suelen utilizar materiales con grupos funcionales básicos, como sólidos funcionalizados con aminas o resinas amínicas, hidróxidos u óxidos, entre otros. Para el caso de las aminas funcionalizadas, éstas mantienen buena capacidad de captura a temperaturas en el rango 25 - 60º C y a bajas presiones parciales de CO_2 típicas de postcombustión (~0,05 bar). En el caso de la combustión cerámica, nos encontramos con presiones de 0,01 – 0,03 bar.

  La quimisorción es un proceso más específico, sin embargo, puede requerir más energía para la regeneración. La quimisorción forma enlaces fuertes, similares a reacciones químicas, con energías del orden de 100 kJ/mol, lo que influye en una reversibilidad menos sencilla para la desorción, aunque posible.

La Figura 13 muestra la zona ampliada de la estructura porosa de un material adsorbente general.

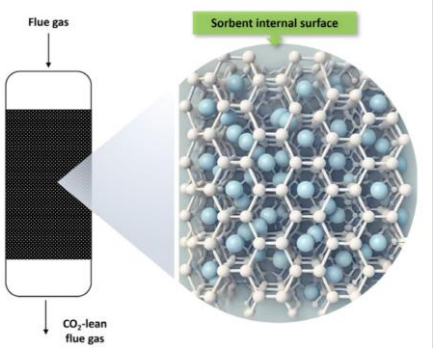


Figura 13: Esquema de un lecho de material de adsorción con detalle de la superficie interna adsorbente. Fuente: Ref.5

© ITC-AICE 2025

La selección de los adsorbentes adecuados, tanto en procesos de fisisorción como quimisorción, es complejo y crucial, especialmente en procesos a presiones bajas de los gases, tal como es el caso de procesos de postcombustión.

A continuación, se muestran las propiedades de estudio para sorbentes sólidos (Figura 14).

Figura 14: Propiedades de los materiales adsorbentes.
Fuente: © ITC *y Ref. 6.*

Las <u>características para la selección</u> de materiales apropiados en estos casos se resumen en la Figura 14 y se detallan a continuación:

- **Capacidad de adsorción de CO_2:** define la capacidad del adsorbente para adsorber CO_2 en el equilibrio termodinámico. Esta es la base para reducción de costes minimizando el volumen requerido de adsorbente, así como el tamaño necesario del equipamiento. Los materiales competitivos que trabajan a bajas presiones deben tener valores de adsorción entre 3-4 mmol/g de adsorbente.

- **Selectividad de CO_2:** mide la preferencia del adsorbente hacia el CO_2 frente a otros gases que lo acompañan en la corriente de combustión, afectando a la pureza del CO_2 obtenido y a todo el proceso de captura y transporte requerido, puesto que esto determina si es necesario un pretratamiento de los gases previo a la captura.

- **Tolerancia a las impurezas y/o humedad:** los adsorbentes deben tener resistencia a contaminantes como ácidos, NO_x o SO_x, así como la humedad durante la operación, evitando procesos de degradación que encarecerían el proceso de captura.

- **Cinética de adsorción:** el estudio de la cinética de los materiales es un punto importante. La velocidad a la que el CO_2 es adsorbido afecta directamente tanto al rendimiento como al coste del sistema. Las cinéticas rápidas permiten procesos eficientes de captura de CO_2.

© ITC-AICE 2025

- **Regeneración del adsorbedor:** la regeneración es un paso crítico en la captura de CO_2 y consume la mayor parte de la energía del proceso. Para los materiales sólidos, se utilizan tres métodos principales ya comentados: basados en cambios de temperatura (TSA), en cambios de presión (PSA), o en una combinación de ambos (PTSA).
  Para que el consumo de energía sea mínimo, los adsorbentes deben regenerarse en procesos suaves que permitirán costes de captura bajos, trabajando en procesos energéticamente eficientes que requieran capacidades caloríficas entre 20-50 kJ/mol (fisisorción) y 60-100 KJ/mol (quimisorción).

- **Estabilidad y ciclos:** la estabilidad y posibilidad de reutilización de los materiales adsorbentes es un punto crítico en la evaluación de costes, favoreciendo materiales con actividad de captura en múltiples ciclos.

- **Coste del adsorbente, así como su síntesis:** la viabilidad económica, así como el impacto medioambiental del proceso de fabricación del adsorbente son esenciales para que el material pueda ser utilizado a escala industrial.

- **Estabilidad térmica y mecánica:** los materiales deben tener integridad estructural en las condiciones de operación para mantener la eficiencia de captura de CO_2 a lo largo de los ciclos de adsorción-desorción.

Hasta la fecha, la mayoría de los esfuerzos de investigación se han centrado en el desarrollo de nuevos materiales adsorbentes avanzados, con el objetivo principal de mejorar la capacidad de adsorción y la vida útil, al tiempo que se busca reducir el calor de adsorción, para disminuir el requerimiento energético necesario para la regeneración del adsorbente.

Sin embargo, desde el punto de vista industrial, existen otros puntos críticos, además de los adsorbentes, que influyen significativamente en la competitividad de la captura de CO_2 por adsorción. Son el sistema de contacto gas-sólido, que afecta a la eficiencia de utilización del adsorbente, y las estrategias de regeneración, que determinan gran parte de los costes globales de captura de CO_2. Ambos aspectos son puntos clave a analizar a la hora de tomar decisiones en la implantación de sistemas de captura en la industria.

4.1. Tipologías de materiales adsorbentes para la captura de CO_2

A continuación, se lleva a cabo una descripción de las distintas familias de materiales para captura de CO_2 basados en mecanismos de adsorción.

4.1.1. Materiales basados en carbono.

Estos materiales incluyen carbón activado, nanotubos de carbono y grafeno funcionalizado.[17] Su capacidad de adsorción de CO_2 se basa principalmente en la fisisorción en sus microporos. Poseen elevada área superficial y porosidad, lo que favorece su capacidad de adsorción física de CO_2.

Estos materiales son muy económicos, estables térmicamente y con calores de adsorción bajos, facilitando su regeneración. Se utilizan como filtros industriales y en sistemas portátiles. Ejemplos prácticos de su aplicación es el uso de carbón activado en columnas de adsorción en plantas de biogás.

© ITC-AICE 2025

La Tabla 2 muestra un resumen de ejemplos de materiales carbonosos de distinta procedencia activados mediante métodos físicos o químicos, para mejorar su capacidad de adsorción intrínseca.

Tabla 2: Materiales basados en carbono más representativos utilizados en captura de CO_2.

	Adsorbentes carbonosos	Area superficial (m^2/g)	T (°K)	P_{CO2} (atm)	Capacidad adsorción (mmol/g)	Referencia bibliográfica
Carbones activados por métodos físicos	**Cáscara coco**	371	298	0,20	1,80	19
	Cáscara de almendra	862	298	1,00	2,70	20
	Huesos aceituna	1.215	298	1,00	3,10	20
	Residuos de café	593	298	1,00	2,4	21
	Celulosa	832 / 1.241	298	1,00	4,97 / 5,52	22
Carbones activados químicamente	**Celulosa- KOH**	2.370	273	1,00	5,80	23
	Almidón-KOH	2.190	273	1,00	5,60	23
	Algas-KOH	1.940	273	1,00	7,40	24
	Levaduras-KOH	1.348	298	1,00	4,80	25
	Lodos-NaOH	1.348	298	1,00	4,80	21
	Madera-H_3PO4	1.889	303	1,00	2,90	26
	Cáscara almendra-NaNH3	2.318	273	1,00	5,91	27
	Cáscara coco-K_2CO_3	1.082	273	1,00	5,12	28

[19] Rashidi, N. A.; Yusup, S.; Borhan, A.; Loong, L. H. *Experimental and modelling studies of carbon dioxide adsorption by porous biomass derived activated carbon.* Clean Technol. Environ. Policy, 2014, 16, 1353−1361.

[20] González, A. S.; Plaza, M. G.; Rubiera, F.; Pevida, C. *Sustainable biomass-based carbon adsorbents for post-combustion CO_2 capture*. Chem. Eng. J. 2013, 230, 456−465.

[21] Plaza, M. G.; González, A. S.; Pevida, C.; Pis, J. J.; Rubiera, F. *Valorisation of spent coffee grounds as CO_2 adsorbents for postcombustion capture applications.* Appl. Energy 2012, 99, 272−279.

[22] Xu, C.; Ruan, C.-Q.; Li, Y.; Lindh, J.; Strømme, M. *High- Performance Activated Carbons Synthesized from Nanocellulose for CO_2 Capture and Extremely Selective Removal of Volatile Organic Compounds.* Adv. Sustain. Syst., 2018, 2, 1700147.

[23] Sevilla, M.; Fuertes, A. B. *Sustainable porous carbons with a superior performance for CO2 capture*. Energy Environ. Sci., 2011, 4, 1765−1771.

[24] Sevilla, M.; Falco, C.; Titirici, M. M.; Fuertes, A. B. *Highperformance CO2 sorbents from algae.* RSC Adv. 2012, 2, 12792−12797.

[25] Shen, W.; He, Y.; Zhang, S.; Li, J.; Fan, W. *Yeast-Based Microporous Carbon Materials for Carbon Dioxide Capture*. ChemSusChem., 2012, 5, 1274−1279.

[26] de Andrés, J. M.; Orjales, L.; Narros, A.; de la Fuente, M. M.; Rodríguez, M. E. *Carbon dioxide adsorption in chemically activated carbon from sewage sludge*. J. Air Waste Manage. Assoc., 2013, 63, 557−564.

[27] Liu, S.; Ma, R.; Hu, X.; Wang, L.; Wang, X.; Radosz, M.; Fan, M. *CO2 Adsorption on Hazelnut Shell-Derived Nitrogen-Doped Porous Carbons Synthesized by Single-Step Sodium Amide Activation.* Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59, 7046−7053.

[28] Yue, L.; Xia, Q.; Wang, L.; Wang, L.; DaCosta, H.; Yang, J.; Hu,X. *CO2 adsorption at nitrogen-doped carbons prepared by K2CO3activation of urea-modified coconut shell.* J. Colloid Interface Sci., 2018, 511, 259−267.

© ITC-AICE 2025

	Adsorbentes carbonosos	Area superficial (m^2/g)	T (°K)	P_{CO2} (atm)	Capacidad adsorción (mmol/g)	Referencia bibliográfica
	Betún-K_2CO_3	1773	273	1,00	4,36	29
Nanotubos de carbono (CNT)	**CNT**	394	298	0,10	0,52	30
	MWCNTs	407	293 / 333	0,20 / 0,10	0,84 / 0,34	31, 32
	SWCNTs	1587	308	0,10	0,50	33
Grafenos	**Grafeno**	477	273	0,15	0,70	34
	Grafeno (nanoplatos)	480	298	0,20	0,35	35

Existe una gran oferta global en el ámbito comercial de estos materiales con distintas características y para distintas necesidades industriales. La capacidad de adsorción de estos materiales va ligada a su área superficial y a la activación.

En este grupo de adsorbentes también encontramos los nanomateriales funcionalizados, que incluyen nanotubos de carbono, grafeno y otros materiales bidimensionales modificados para mejorar la adsorción de CO_2. Aunque aún en fase de investigación, ofrecen propiedades únicas de superficie y reactividad.

Entre sus limitaciones en las condiciones de trabajo en la industria cerámica (1 - 5 % CO_2) tenemos la selectividad CO_2/N_2 más baja que en el caso de zeolitas/aminas y un fuerte impacto de vapor de agua en los procesos de captura.

4.1.2. Óxidos metálicos y minerales

Se utilizan en procesos de captura por reacción química, como la carbonatación-calcinación y/o el bucle químico. Son comunes en aplicaciones industriales y han sido implementados en plantas de cemento y acero. Estos materiales capturan CO_2 mediante

[29] Wang, L.; Sun, F.; Hao, F.; Qu, Z.; Gao, J.; Liu, M.; Wang, K.; Zhao, G.; Qin, Y. *A green trace K2CO3 induced catalytic activation strategy for developing coal-converted activated carbon as advanced candidate for CO2 adsorption and supercapacitors.* Chem. Eng. J., 2020, 383, 123205.

[30] Lu, C.; Bai, H.; Wu, B.; Su, F.; Hwang, J. F. *Comparative Study of CO2 Capture by Carbon Nanotubes, Activated Carbons, and Zeolites.* Energy Fuels, 2008, 22, 3050−3056.

[31] Hsu, S.-C.; Lu, C.; Su, F.; Zeng, W.; Chen, W. *Thermodynamics and regeneration studies of CO2 adsorption on multiwalled carbon nanotubes.* Chem. Eng. Sci., 2010, 65, 1354−1361.

[32] Su, F.; Lu, C.; Cnen, W.; Bai, H.; Hwang, J. F. *Capture of CO2 from flue gas via multiwalled carbon nanotubes.* Sci. Total Environ., 2009, 407, 3017−3023.

[33] Cinke, M.; Li, J.; Bauschlicher, C. W.; Ricca, A.; Meyyappan, M. *CO2 adsorption in single-walled carbon nanotubes*. Chem. Phys. Lett,. 2003, 376, 761−766.

[34] Wang, Y.; Guan, C.; Wang, K.; Guo, C. X.; Li, C. M. *Nitrogen, Hydrogen, Carbon Dioxide, and Water Vapor Sorption Properties of Three-Dimensional Graphene*. J. Chem. Eng. Data, 2011, 56, 642−645.

[35] Meng, L.-Y.; Park, S.-J. *Effect of exfoliation temperature on carbon dioxide capture of graphene nanoplates.* J. Colloid Interface Sci., 2012, 386, 285−290.

© ITC-AICE 2025

adsorción química por quimisorción: el CO_2 reacciona con la superficie formando carbonatos interfaz sólido-gas, mediante reacción superficial. Un ejemplo industrial de carbonatación de CaO son los hornos rotatorios industriales, utilizados en industrias como cemento y cal. En ellos, el CaO se produce por calcinación de carbonatos a alta temperatura liberando CO_2 de elevada pureza.

Los materiales adsorbentes basados en óxido de calcio representan una solución prometedora a la reducción de emisiones de CO_2 en entornos industriales. Estos materiales tienen una gran tolerancia a impurezas químicas y son muy económicos, lo que los hace atractivos para su aplicación en industria.

Son múltiples los estudios que se han llevado a cabo para aplicación de estos materiales, y sus versiones en optimización, teniendo en cuenta su cinética rápida y sus condiciones de operación.[36, 37, 38]

4.1.3. Materiales mesoporosos.

Son materiales como la sílice mesoporosa o zeolitas. Estos materiales tienen estructuras porosas con tamaño intermedio, permiten una buena difusión de gases y se emplean en procesos de adsorción física y química.

Zeolitas

Las zeolitas son materiales cristalinos compuestos por Si, Al y O, formando redes tetraédricas (TO_4) donde la T puede ser Si o Al. Estas estructuras forman redes con canales y cavidades, permitiendo una alta área superficial y porosidad definida.

Las zeolitas se consideran como uno de los sorbentes más efectivos para captura de CO_2 en procesos de post-combustión, gracias a la elevada capacidad de adsorción y su cinética rápida en procesos de adsorción en corrientes gaseosas de post-combustión para distintos procesos. Además, las zeolitas han demostrado una elevada capacidad de regeneración, que se mantiene a través de diferentes ciclos. [39, 40, 41]

Las zeolitas funcionan en un amplio rango de condiciones de trabajo, incluyendo diferentes temperaturas y concentraciones en función de los requerimientos de cada caso particular de captura de CO_2. El desempeño de estos materiales es óptimo a 20-40 °C, pudiendo trabajar con concentraciones de CO_2 del 5 % e incluso inferiores.

---

[36] Zhang C, Fang J, Han Z, Chen P, Xu X, Wang K, Shi Y, Liao J. *Optimizing CaO-based CO_2 adsorption: Impact of operating parameters.* iScience, 2025, 28(8),113127. DOI: 10.1016/j.isci.2025.113127

[37] Jose M. Valverde, Pedro E. Sanchez-Jimenez, Antonio Perejon, Luis A. Perez-Maqueda, *Constant rate thermal analysis for enhancing the long-term CO2 capture of CaO at Ca-looping conditions*. Applied Energy, 2013, 108, 108-120. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.013

[38] Chen, Jian; Duan, Lunbo; Donat, Felix; Müller, Christoph R. *Assessment of the Effect of Process Conditions and Material Characteristics of Alkali Metal Salt Promoted MgO-Based Sorbents on Their CO2 Capture Performance. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* 2021, 9, Issue 19, 6659-6672. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c00262

[39] Dina G. Boer; Jort Langerak; Paolo P. Pescarmona; *Zeolites as Selective Adsorbents for CO_2 Separation.* ACS Appl. Energy Mater,2023*, 6, 5, 2634–2656.* DOI: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsaem.2c03605

[40] https://micromeritics.com/resources/co%E2%82%82-adsorption-in-zeolite-13x/

[41] 48th International Conference on Environmental Systems, (ICES-2018-3, 8-12) Albuquerque, New Mexico. July 2018. Disponible en: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180006333/downloads/20180006333.pdf

© ITC-AICE 2025

El caso particular de la zeolita 13X presenta alta capacidad de captura en distintos rangos de concentración y su cinética favorable depende de la presión parcial del CO_2. Numerosos estudios reportan fuerte co-adsorción de H_2O con inhibición de CO_2, requiriendo un secado previo de los gases.

Esta zeolita tiene alta capacidad de absorción incluso a baja presión parcial de CO_2 ya que su estructura microporosa tiene poros de 1 nm que es ideal para la molécula de CO_2. Además, la composición de la zeolita tiene cationes sodio que permite la interacción electrostática con el CO_2, mejorando su selectividad.

Un estudio para su aplicación industrial mediante curvas de adsorción a 30 °C para esta zeolita muestra adsorciones de 2,9 mmol/g en seco, con decaimiento marcado a un 60 % de humedad relativa, lo que disminuye la selectividad del material para la captura de CO_2 debido a su competencia con el agua. Por tanto, la eliminación de la humedad es crucial en su desempeño y debe tenerse en cuenta a la hora de aplicarse en entornos industriales como el cerámico, que tiene presencia de vapor de agua en sus humos de combustión.

La zeolita tiene elevada estabilidad térmica, lo que permite su regeneración mediante TSA, PSA, o métodos avanzados de microondas. Su regeneración se lleva a cabo por TSA (120–250 °C) o VSA/PSA si el lecho está seco; la energía de regeneración necesaria aumenta con la carga de H_2O presente en el entorno de captura. Los estudios muestran que la zeolita mantiene una eficacia por encima del 90% tras varios ciclos (3-10 ciclos para presiones parciales de CO_2 al 0,04%) con pérdidas mínimas cuando se regenera a 250 º C. La temperatura de regeneración habitual oscila entre 200 – 450 º C.[42]

Sin embargo, para bajas concentraciones de CO_2 se necesita optimizar la regeneración y minimizar las pérdidas energéticas. Incluso hay estudios experimentales que exploran la regeneración por microondas para reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia en ciclos de captura de CO_2 para concentraciones de 400 ppm.[42]

La Tabla 3 muestra un resumen de distintos tipos de zeolita, naturales y sintéticas, que se encuentran en bibliografía y han sido aplicadas a la captura de CO_2.

[42] Amornsin, P., Nokpho, P., Wang, X., Piumsomboon, P., & Chalermsinsuwan, B. *Investigation of microwave-assisted regeneration of zeolite 13X for efficient direct air CO_2 capture: a comparison with conventional heating method*. Scientific Reports, 2025, 15, 18376. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-02074-z

© ITC-AICE 2025

Tabla 3: Tabla de tipos de zeolitas para la captura de CO_2.

	Adsorbente Zeolita	Area superficial (m^2/g)	T (°K)	P_{CO2} (atm)	Capacidad adsorción (mmol/g)	Referencia bibliográfica
Naturales	**13 X**	710 / 960	393 / 298	0,15 / 0,10	0,70 / 0,38	43
	NaY	542	295 / 323	1,00 / 0,20	4,06 / 0,05	44-45
	NaX	534	323	0,20	0,60	46
	CaA	397	323	0,20	0,75	45
	CsY	842	333	0,10	0,86	47
	APG-II	710	393	0,15	0,38	43
	Naβ	570	273	0,15	2,30	48
	GeopolG13	50	308	0,20	0,38	49
	Na-$G_{1,2}$-Z	211	308	0,20	1,5	50
Sintéticas	**ZAPS**	426	290	1	2,80	51
	ZNT	266	290	1	1,80	51
	Tobas amarillas	141	298	0,15	0,62	52

Las zeolitas permiten su funcionalización. Estos minerales microporosos con estructura cristalina se pueden funcionalizar para mejorar su afinidad por el CO_2. Son materiales ampliamente utilizados en procesos industriales, aunque su selectividad puede verse afectada por la presencia de otros gases.[53]

---

[43] Siriwardane, R. V.; Shen, M.-S.; Fisher, E. P.; Losch, J. *Adsorption of CO2 on Zeolites at Moderate Temperatures*. Energy Fuels, 2005, 19, 1153−1159.

[44] Harlick, P. J. E.; Tezel, F. H. *An experimental adsorbent screening study for CO2 removal from N2.* Microporous Mesoporous Mater., 2004, 76, 71−79.

[45] Yi, H.; Deng, H.; Tang, X.; Yu, Q.; Zhou, X.; Liu, H. *Adsorption equilibrium and kinetics for SO2, NO, CO2 on zeolites FAU and LTA*. J. Hazard. Mater., 2012, 203−204, 111−117.

[46] Raganati, F.; Ammendola, P.; Chirone, R. *CO2 capture performances of fine solid sorbents in a sound-assisted fluidized bed.* Powder Technol., 2014, 268, 347−356.

[47] Pirngruber, G. D.; Raybaud, P.; Belmabkhout, Y.; Čejka, J.; Zukal, A. *The role of the extra-framework cations in the adsorption of CO2 on faujasite Y*. Phys. Chem. Chem. Phys., 2010, 12, 13534.

[48] Xu, X.; Zhao, X.; Sun, L.; Liu, X. *Adsorption separation of carbon dioxide, methane, and nitrogen on Hβ and Na-exchanged β- zeolite.* J. Nat. Gas Chem., 2008, 17, 391−396.

[49] Minelli, M.; Medri, V.; Papa, E.; Miccio, F.; Landi, E.; Doghieri, F. *Geopolymers as solid adsorbent for CO2 capture.* Chem. Eng. Sci., 2016, 148, 267−274.

[50] Minelli, M.; Papa, E.; Medri, V.; Miccio, F.; Benito, P.; Doghieri, F.; Landi, E. *Characterization of novel geopolymer-Zeolite composites as solid adsorbents for CO2 capture.* Chem. Eng. J., 2018, 341, 505−515.

[51] Hernández-Huesca, R.; Díaz, L.; Aguilar-Armenta, G. *Adsorption equilibria and kinetics of CO2, CH4 and N2 in natural zeolites.* Sep. Purif. Technol., 1999, 15, 163−173.

[52] Ammendola, P.; Raganati, F.; Chirone, R.; Miccio, F. *Fixed bed adsorption as affected by thermodynamics and kinetics: Yellow tuff for CO2 capture.* Powder Technol. 2020, 373, 446−458.

[53] Morales-Ospino, R., Santiago, R.G., Siqueira, R.M. *et al. Assessment of CO_2 desorption from 13X zeolite for a prospective TSA process.* Adsorption, 2020, 26, 813–824. DOI: 10.1007/s10450-019-00192-5

© ITC-AICE 2025

Materiales mesoporosos funcionalizados

Los materiales mesoporosos basados en sílice son estructuras con poros en el rango mesoscópico (2–50 nm) que pueden ser modificados químicamente para incorporar grupos amina u otras funcionalidades que mejoran la adsorción de CO_2.[54] Son especialmente útiles en condiciones de baja concentración de CO_2.

La funcionalización de estos materiales puede llevarse a cabo con distintos sorbentes líquidos, como son las aminas u otros materiales avanzados como los líquidos iónicos.

En revisiones de artículos recientes (2024–2025), encontramos materiales con desempeño a temperatura ambiente.[55,56] Un ejemplo concreto de estos materiales es la MCM-41 funcionalizada con aminas para captura de CO_2 en gases de combustión.[57]

Aminas Soportadas

Estos materiales consisten en grupos amina inmovilizados en un soporte sólido, generalmente de alta área superficial. Son los más prometedores para la captura de CO_2 a baja temperatura. La amina actúa como el sitio activo de adsorción, mientras que el soporte proporciona la estabilidad mecánica y la estructura porosa necesaria.

Los soportes más comunes son sílices porosas (SiO_2), alúminas (Al_2O_3) y óxidos de titanio (TiO_2), aunque también se pueden utilizar zeolitas y polímeros porosos. La amina puede estar unida al soporte de manera covalente (aminosilanos) o simplemente impregnada en los poros. Así, múltiples revisiones recientes detallan la estabilidad y escalabilidad de las silíces mesoporosas (SBA-15/MCM-48) funcionalizadas mediante anclaje covalente ("grafting") o impregnadas con distintas aminas (PEI/TEPA/APTES).

Estos materiales son activos en el intervalo de 25 – 60 °C, mostrando alta capacidad y tolerancia al H_2O. Además, los estudios a 40 – 50 °C muestran capacidades de hasta 2 – 4 mmol g^{-1} (según la carga de amina y la porosidad del soporte utilizado) y un proceso cíclico estable con regeneración a temperatura 80 – 120 °C (TSA) o vacío (VSA).

Las aminas soportadas sobre sílice (PEI/TEPA/anclado) han sido estudiadas en otros campos, y podrían ser aptas para su uso en captura de CO_2 en emisiones industriales como las del sector cerámico, aunque resisten pocos ciclos de captura y su uso a nivel industrial no está extendido.

Como caso particular, a modo de ejemplo, se puede citar el soporte de sílice SBA-15 funcionalizada con la amina denominada APTES, que tiene una capacidad de adsorción de 3,58 mmol g^{-1} a 50 °C.[71]

---

[54] Popa, A., Borcanescu, S., Holclajtner-Antunović, I. *et al. Preparation and characterisation of amino-functionalized pore-expanded mesoporous silica for carbon dioxide capture.* J Porous Mater., 2021, 28, 143–156. DOI: 10.1007/s10934-020-00974-1

[55] Navik, R., Wang, E., Ding, X. *et al. Atmospheric carbon dioxide capture by adsorption on amine-functionalized silica composites: a review.* Environ Chem Lett., 2024, 22, 1791–1830. DOI: 10.1007/s10311-024-01737-z

[56] Bae, J.Y.; Jang, S.G.; Cho, J.; Kang, M. *Amine-Functionalized Mesoporous Silica for Efficient CO_2 Capture: Stability, Performance, and Industrial Feasibility.* Int. J. Mol. Sci., 2025, *26*, 4313. DOI: 10.3390/ijms26094313

[57] Girimonte, R.; Testa, F.; Turano, M.; Leone, G.; Gallo, M.; Golemme, G. *Amine-Functionalized Mesoporous Silica Adsorbent for CO_2 Capture in Confined-Fluidized Bed: Study of the Breakthrough Adsorption Curves as a Function of Several Operating Variables.* Processes, 2022, *10*, 422. DOI: 10.3390/pr10020422

© ITC-AICE 2025

Tabla 4: Tabla aminas soportadas para la captura de CO_2.

	Soporte mesoporoso	Amina (wt %)	T (°K)	P_{CO2} (atm)	Capacidad adsorción (mmol/g)	Referencia
Impregnadas	**MCM-41**	PEI (50)	348	0,10 / 0,13	2,10 / 2,84	58, 59
	SBA-15	PEI (50)	348	0,15	1,95	60
	β-zeolita	TEPA (38)	303	0,10	2,08	61
	Zeolita 13X	MEA (25)	348	0,15	0,45	62
	Carbón activo	PEI (40)	298	1,00	1,98	63
	PE-MCM-41	DEA (76)	298	0,05	3,00	64
	Al_2O_3	DETA (40)	330	1,00	1,50	65
	PMMA	DBU (30)	338	0,10	2,34	66
	SBA-15	TEPA (30) + DEA (20)	348	0,05	3,77	67
Ancladas	**Sílica gel**	Primaria (1.26)	323	1,00	0,89	68
	PE-MCM-41	TRI (7.90)	323	0,10	1,59	69
	SBA-16	AEAPS (3.06)	333	0,15	073	70

[58] Xu, X.; Song, C.; Andresen, J. M.; Miller, B. G.; Scaroni, A. W. *Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-Capacity Adsorbent for CO2 Capture.* Energy Fuels, 2002, 16, 1463−1469.

[59] Xu, X.; Song, C.; Miller, B. G.; Scaroni, A. W. *Influence of Moisture on CO2 Separation from Gas Mixture by a Nanoporous Adsorbent Based on Polyethylenimine-Modified Molecular Sieve MCM-41.* Ind. Eng. Chem. Res., 2005, 44, 8113−8119.

[60] Ma, X.; Wang, X.; Song, C. Molecular Basket. *Sorbents for Separation of CO2 and H2S from Various Gas Streams.* J. Am. Chem. Soc., 2009, 131, 5777−5783.

[61] Fisher, J. C.; Tanthana, J.; Chuang, S. S. C. *Oxide-supported tetraethylenepentamine for CO2 capture.* Environ. Prog. Sustainable Energy, 2009, 28, 589−598.

[62] Jadhav, P. D.; Chatti, R. V.; Biniwale, R. B.; Labhsetwar, N. K.; Devotta, S.; Rayalu, S. S. *Monoethanol Amine Modified Zeolite 13X for CO2 Adsorption at Different Temperatures.* Energy Fuels, 2007, 21, 3555−3559.

[63] Plaza, M. G.; Pevida, C.; Arias, B.; Fermoso, J.; Casal, M. D.; Martín, C. F.; Rubiera, F.; Pis, J. J. *Development of low-cost biomassbased adsorbents for postcombustion CO2 capture.* Fuel, 2009, 88, 2442−2447.

[64] Franchi, R. S.; Harlick, P. J. E.; Sayari, A. *Applications of Pore-Expanded Mesoporous Silica. Development of a High-Capacity, Water-Tolerant Adsorbent for CO2.* Ind. Eng. Chem. Res., 2005, 44, 8007−8013.

[65] Plaza, M. G.; Pevida, C.; Arias, B.; Fermoso, J.; Arenillas, A.; Rubiera, F.; Pis, J. J. *Application of thermogravimetric analysis to the evaluation of aminated solid sorbents for CO2 capture.* J. Therm. Anal. Calorim., 2008, 92, 601−606.

[66] Gray, M. L.; Champagne, K. J.; Fauth, D.; Baltrus, J. P.; Pennline, H. *Performance of immobilized tertiary amine solid sorbents for the capture of carbon dioxide.* Int. J. Greenhouse Gas Control, 2008, 2, 3−8.

[67] Yue, M. B.; Sun, L. B.; Cao, Y.; Wang, Z. J.; Wang, Y.; Yu, Q.; Zhu, J. H. *Promoting the CO2 adsorption in the amine-containing SBA-15 by hydroxyl group.* Microporous Mesoporous Mater., 2008, 114, 74−81.

[68] Leal, O.; Bolívar, C.; Ovalles, C.; García, J. J.; Espidel, Y. *Reversible adsorption of carbon dioxide on amine surface-bonded silica gel.* Inorg. Chim. Acta, 1995, 240, 183−189.

[69] Serna-Guerrero, R.; Da'na, E.; Sayari, A. *New Insights into the Interactions of CO2 with Amine-Functionalized Silica.* Ind. Eng. Chem. Res., 2008, 47, 9406−9412.

[70] Wei, J.; Shi, J.; Pan, H.; Zhao, W.; Ye, Q.; Shi, Y. *Adsorption of carbon dioxide on organically functionalized SBA-16.* Microporous Mesoporous Mater., 2008, 116, 394−399.

© ITC-AICE 2025

	Soporte mesoporoso	Amina (wt %)	T (°K)	P_{CO2} (atm)	Capacidad adsorción (mmol/g)	Referencia
	SBA-15	APTES (2.56)	323	1	3 - 4	71
	Esferas de sílica	EDA (0.99)	333	0,10	0,73	72
	Zeolita ITQ-6	Primaria (1.26)	293	0,12	0,67	73
	SBA-15	Aziridina (9.78)	348	0,10	4,00	74

Sorbentes líquidos avanzados soportados

Se trata de soluciones líquidas que contienen aminas, aminoácidos o líquidos iónicos diseñados para capturar CO_2 mediante reacciones químicas reversibles.

Se están desarrollando formulaciones con menor energía de regeneración y mayor estabilidad frente a contaminantes. Estos materiales suelen soportarse en materiales mesoporosos.

En particular, los líquidos iónicos (ILs) son compuestos líquidos con baja volatilidad y alta afinidad por el CO_2. Su estructura puede modificarse para ajustar propiedades como la viscosidad y capacidad de adsorción. Se investigan por su potencial en procesos de absorción química.

Los líquidos iónicos poliméricos (PILs) ofrecen una mayor estabilidad y un menor coste energético. Entre sus aplicaciones industriales destaca su investigación para procesos de absorción química. Actualmente, se están empleando líquidos iónicos basados en imidazolio en reactores de absorción de CO_2.[75, 76]

[71] Wang, L.; Ma, L.; Wang, A.; Liu, Q.; Zhang, T. *CO2 Adsorption on SBA-15 Modified by Aminosilane,* Chinese. J. Catal., 2007, 28, 805−810.

[72] Lu, C.; Su, F.; Hsu, S.-C.; Chen, W.; Bai, H.; Hwang, J. F.; Lee, H.-H. *Thermodynamics and regeneration of CO2 adsorption on mesoporous spherical-silica particles.* Fuel Process. Technol., 2009, 90, 1543−1549.

[73] Zukal, A.; Dominguez, I.; Mayerová, J.; Čejka, J. *Functionalization of delaminated zeolite ITQ-6 for the adsorption of carbon dioxide.* Langmuir, 2009, 25, 10314−10321.

[74] Drese, J. H.; Choi, S.; Lively, R. P.; Koros, W. J.; Fauth, D. J.; Gray, M. L.; Jones, C. W. *Synthesis−Structure−Property Relationships for Hyperbranched Aminosilica CO2 Adsorbents*. Adv. Funct. Mater., 2009, 19, 3821−3832.

[75] Alguacil, F.J.; Robla, J.I. *Using Ionic Liquids to Improve CO_2 Capture*. Molecules, 2024, *29*, 5388. DOI:10.3390/molecules29225388

[76] Chaouiki, A.; Chafiq, M.; Ko, Y.G. *Unveiling the mechanisms behind high CO_2 adsorption by the selection of suitable ionic liquids incorporated into a ZIF-8 metal organic framework: A computational approach.* Environ. Res., 2024, *246*, 118112. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118112

© ITC-AICE 2025

4.1.4. Redes Metal-Orgánicas (Metal-Organic Frameworks, MOFs).

Los Metal-Organic Frameworks (MOFs) son materiales híbridos cristalinos compuestos por centros metálicos enlazados mediante moléculas orgánicas, formando estructuras altamente ordenadas.[17, 77.]

Son materiales porosos cristalinos que tienen un área superficial extremadamente alta y una estructura porosa bien definida y que permite una capacidad de ajuste que mejoran la capacidad de adsorción del CO_2 para lograr una captura más selectiva y eficiente de CO_2.

Destacan por su elevada porosidad, superficie específica y capacidad de adsorción muy selectiva. Algunos de ellos permiten la captura de CO_2 incluso en presencia de vapor de agua y ácidos y pueden regenerarse con facilidad mediante estímulos como temperatura o presión. [78, 79, 80]

Los componentes de los MOFs pueden seleccionarse de forma estratégica para lograr una funcionalización química específica en su superficie y, al mismo tiempo, controlar el tamaño de sus poros. La combinación adecuada de estas propiedades les confiere la mayor capacidad de captura y una selectividad mejorada entre los materiales adsorbentes.

Los MOFs constituyen actualmente la clase de materiales de más rápido crecimiento en el ámbito de la química, con reconocimiento reciente por los premios Nobel, con más de 100.000 estructuras identificadas en los últimos 20 años.[81]

Estos materiales avanzados pueden compararse con esponjas debido a su estructura porosa, que les confiere propiedades únicas: pueden captar, retener y liberar moléculas desde sus poros mediante la aplicación de distintos estímulos, como calor, presión, luz o campos magnéticos. Estas estructuras porosas altamente ordenadas permiten una gran capacidad de captura y selectividad. Son uno de los materiales más prometedores en investigación. Industrialmente se utilizan para separación de gases y almacenamiento.

El interés por los MOFs se debe en parte a su capacidad para adsorber CO_2 con alta selectividad, una propiedad que puede aplicarse tanto a la captura en fuentes puntuales como a la captura directa del aire. Los MOFs basados en zinc y magnesio de la familia estructural MOF-74, han demostrado una buena combinación de capacidades para la captura de CO_2 en condiciones de alta presión.

La elevada capacidad de captura de los materiales MOF está relacionada con su diseño estructural directo y su capacidad de ajuste. Estos materiales ofrecen una gran variedad

---

[77] Jian-Bin Lin, Tai T. T. Nguyen, Ramanathan Vaidhyanathan, Jake Burner, Jared M. Taylor,Hana Durekova, Farid Akhtar, Roger K. Mah, Omid Ghaffari-Nik, Stefan Marx, Nicholas Fylstra, Simon S. Iremonger, Karl W. Dawson, Partha Sarkar, Pierre Hovington, Arvind Rajendran,Tom K. Woo, George K. H. Shimizu. *A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture*. Science, 2021, 374, 1464-1469. DOI: 10.1126/science.abi7281?download=true

[78]https://www.chemengonline.com/basf-begins-commercial-scale-mof-production-to-support-svante-carbon-capture-technology/

[79] https://www.svanteinc.com/press-releases/svante-secures-commercial-supply-of-mof-advanced-sorbent-materials-with-basf-for-carbon-capture-market/

[80]https://emis.vito.be/sites/emis/files/2025-06/Infosheet%20-%20Temp%20Swing%20Adsorption_v2.pdf

[81]https://www.industriaquimica.es/noticias/20251009/investigadores-iciq-exploran-como-mof-pueden-ayudar-capturar-carbono-promover-quimica-circular

© ITC-AICE 2025

de configuraciones posibles, lo que permite su diseño personalizado para distintas aplicaciones.

Desde el punto de vista químico, la selección de la estructura del MOF es la base para su posible escalabilidad. Si la estructura propuesta no puede alinearse con una vía hacia la eficiencia de costes industriales, como el uso de materiales de bajo coste, su comercialización será poco probable.

Los sistemas MOF requieren temperaturas de desorción de CO_2 bajas y, por tanto, menores necesidades energéticas de regeneración en comparación con las soluciones de captura existentes. Sin embargo, aunque los MOFs son compuestos muy selectivos, presentan todavía costes muy elevados para aplicaciones industriales. Además, estos materiales presentan una estabilidad mecánica que es insuficiente para la industria.

El coste económico de fabricación de los MOFs será esencial para su aplicación en la captura de carbono industrial a gran escala. Para que su rendimiento sea comercialmente viable, deberán cumplir métricas como el consumo energético, la eficiencia, las temperaturas de adsorción/desorción y la recuperación de CO_2.

En aplicaciones postcombustión, por ejemplo, los MOFs deben alcanzar una recuperación mínima de CO_2 del 90% con una pureza del 95% y un consumo energético de 3 GJ por tonelada para competir con las tecnologías de adsorción, membranas y absorción disponibles comercialmente.

La Tabla 5 muestra los MOFs más relevantes descritos en literatura utilizados en la captura de CO_2.

Tabla 5: MOFs más representativos utilizados en captura de CO_2 descritos en bibliografía.

Adsorbente MOF	Area superficial (m^2/g)	T (°K)	P_{CO2} (atm)	Capacidad adsorción (mmol/g)	Referencia bibliográfica
HKUST-1	680	295 / 298	0,10 / 0,15	0,62 / 1,14	82, 83
MOF-808	1922-2050	298	1	1,16	84
MOF-808 funcionalizado	1665	298	1	2,3 – 2,5	84
CALF-20	528	293	1,2	4,07	85
TAMOF-1	980	298	1,2	3,8	86
IRMOF-1	1892	298	0,10	0,08	83

[82] Raganati, F.; Gargiulo, V.; Ammendola, P.; Alfe, M.; Chirone, R. *CO2 capture performance of HKUST-1 in a sound assisted fluidized bed.* Chem. Eng. J., 2014, 239, 75-86.

[83] Yazaydin, a O.; Snurr, R. Q.; Park, T.-H.; Koh, K.; Liu, J.; Levan, M. D.; Benin, A. I.; Jakubczak, P.; Lanuza, M.; Galloway, D. B.; Low, J. J.; Willis, R. R. *Screening of metal−organic frameworks for carbon dioxide capture from flue gas using a combined experimental and modeling approach.* J. Am. Chem. Soc., 2009, 131, 18198−9.

[84] Muldoon, P.F., Budhathoki, S., Sekizkardes, A.K. *et al. Post synthetic amine functionalization of MOF-808 for CO_2 sorption via ligand exchange and Michael addition.* Adsorption, 2025, 31, 107. DOI:https://doi.org/10.1007/s10450-025-00660-1

[85] Jian-Bin Lin *et al.*, *A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture.* Science, 2021, 374,1464-1469. DOI:10.1126/science.abi7281

[86] Capelo-Avilés, S., de Fez-Febré, M., Balestra, S.R.G. *et al. Selective adsorption of CO_2 in TAMOF-1 for the separation of CO_2/CH_4 gas mixtures.* Nat Commun, 2025, 16, 3243. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-025-58426-w

© ITC-AICE 2025

Adsorbente MOF	Area superficial (m^2/g)	T (°K)	P_{CO2} (atm)	Capacidad adsorción (mmol/g)	Referencia bibliográfica
Ni/DOBDC	936	298	0,10	4,07	83
Co/DOBDC	957	298	0,10	2,81	83
ZIF-8	1135	298	0,10	0,12	83
MIL-47	600	298	0,10	0,18	83
UMCM-1	4034	298	0,10	0,09	83
MOF-74 monolito	659	298	1	4,31	87, 88
MOF-508	323	323	0,10	0,10	89

Como casos particulares, se muestra a continuación dos ejemplos, con los materiales el CALF-20 y MOF-808.

- **CALF-20 (Al-fumarato hidrofóbico, comercial).**

Se trata de un MOF comercial de aluminio empleado por la empresa Svante[90] en filtros para contactores rotativos aplicados a adsorción por cambio de temperatura (RC-TSA) con baja presión de vapor para regeneración. La empresa BASF inició su producción a escala de toneladas al año en el año 2023 con suministro comercial.

Este material está diseñado para flujos de gases con una concentración entre el 10–20 % de CO_2, pero su aplicación RC-TSA permite hacerlo extrapolable a concentraciones de CO_2 entorno al 5 %.

Se ha demostrado su resistencia en presencia de vapor y en ambientes oxidantes y su gran estabilidad tras miles de ciclos de captura y desorción (estable tras más de 450.000 ciclos). El material tiene un bajo coste entálpico de regeneración y preferencia por CO_2 incluso en presencia de H_2O.[91, 92] Su regeneración se lleva a cabo mediante purga de vapor a baja presión con ciclos <1,5 min en sistema VeloxoTherm™ (RC-TSA).

---

[87] Choe, J. H., Kim, H., Hong, C. S.; *MOF-74 type varians for CO2 capture.* Mater. Chem. Front, 2021, 5, 14, 5172-5185. DOI: https://doi.org/10.1039/D1QM00205H

[88] Jialin Yang, Dong Zhang, Lei Yang, Qi Zhang, He Zhu, Shiping Zhu. *Hierarchically porous Mg-MOF-74 monolith with high MOF loading for carbon dioxide capture and separation,* Separation and Purification Technology, 2025, 358, Part B, 130386. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130386

[89] Bastin, L.; Bárcia, P.S.; Hurtado, E. J.; Silva, J.A.C.; Rodrigues, A. E.; Chen, B. *A microporous Metal-Organic Framework for separation of CO2/N2 and CO2/CH4 by fixed-bed work adsorption.* J Phys. Chem. C, 2008, 112, 1575-1581.

[90] https://www.svanteinc.com/carbon-capture-technology/

[91] Oktavian, R., Goeminne, R., Glasby, L.T. *et al. Gas adsorption and framework flexibility of CALF-20 explored via experiments and simulations.* Nat. Commun., 2024, 15, 3898. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-024-48136-0.

[92] Jian-Bin Lin *et al.*, *A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture.* Science, 2021, 374,1464-1469. DOI: 10.1126/science.abi7281.

© ITC-AICE 2025

El material está disponible vía BASF/Svante para proyectos[93, 94, 95], en los que es habitual la necesidad de firmar acuerdos de confidencialidad. El coste y disponibilidad de este material se negocia mediante acuerdo comercial (no hay PVP público). También existen otras empresas fuera de la unión europea que comercializan dicho material a precios alrededor de 2.000 €/kg, un precio todavía elevado para el sector industrial.

- **MOF-808 funcionalizado**.

Este MOF se encuentra en fase de investigación con TRL más bajo que el CALF-20.

El MOF-808 puede ser funcionalizado con aminoácidos o bien con aminas poliméricas (PEI) en muestras mejoradas con H_2O. Su regeneración se lleva a cabo con adsorción por cambios de presión con vacío (VSA) sin calor, y es capaz de mantener sus propiedades tras un mínimo de 80 ciclos de captura y desorción.[96, 97] El coste y disponibilidad por el momento está limitado a colaboración académica/empresarial.

4.1.5. Redes orgánicas covalentes (Covalent Organic Frameworks, COFs).

Son estructuras covalentes orgánicas porosas similares a los MOFs, pero compuestas exclusivamente por enlaces covalentes. Presentan alta estabilidad térmica y química, y una arquitectura modular que permite ajustar sus propiedades para aplicaciones específicas de captura de gases. Su estructura ordenada y porosa es adecuada para aplicaciones avanzadas. La funcionalización de COFs con aminas ha sido también estudiada para captura selectiva de CO_2.

Aunque los COFs son relativamente nuevos y menos estudiados en comparación con los MOFs, también ofrecen oportunidades para explorar innovaciones químicas en aplicaciones de captura de CO_2. Al igual que con los MOFs, es importante tener en cuenta la aplicación industrial mientras se investiga el potencial de esta clase de materiales. Industrialmente se están utilizando para separación de gases de mezclas gaseosas complejas ya que sus propiedades permiten un diseño específico óptimo para cada aplicación en particular, en función de la composición de los gases a tratar.

4.1.6. Polímeros porosos (Porous Organic Polymers, POPs).

Son redes orgánicas con alta área superficial y estabilidad química. Su diseño permite incorporar sitios activos para la captura de CO_2, y pueden procesarse en formas útiles como membranas o esferas.

---

[93] https://www.alcircle.com/news/svante-and-basf-enter-agreement-to-bolster-sorbent-materials-for-co2-capture-101650?srsltid=AfmBOood9wejFU-mIarke8jiJdPoXMjPLBAyW312bEZs5D8GPigsHZQP

[94] https://www.svanteinc.com/press-releases/svante-secures-commercial-supply-of-mof-advanced-sorbent-materials-with-basf-for-carbon-capture-market/

[95] https://www.thechemicalengineer.com/news/basf-commercially-produces-metal-organic-frameworks-for-co2-capture-in-world-first/

[96] Hao Lyu, Oscar Iu-Fan Chen, Nikita Hanikel, Mohammad I. Hossain, Robinson W. Flaig, Xiaokun Pei, Ameer Amin, Mark D. Doherty, Rebekah K. Impastato, T. Grant Glover, David R. Moore, and Omar M. Yaghi. *Carbon Dioxide Capture Chemistry of Amino Acid Functionalized Metal–Organic Frameworks in Humid Flue Gas*. Journal of the American Chemical Society, 2022, 144 (5), 2387-2396. DOI: 10.1021/jacs.1c13368.

[97] Keng Xuan, Yanfeng Pu, Feng Li, Jing Luo, Ning Zhao, Fukui Xiao. *Metal-organic frameworks MOF-808-X as highly efficient catalysts for direct synthesis of dimethyl carbonate from CO2 and methanol*,Chinese Journal of Catalysis, 2019, 40, 4, 553-566, DOI: https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63291-2.

© ITC-AICE 2025

4.1.7. Membranas híbridas y compuestas.

Se trata de tecnologías basadas en la separación selectiva de gases mediante membranas que incorporan materiales como MOFs, COFs o polímeros funcionalizados. Permiten procesos continuos y modulares, con bajo consumo energético.

En este grupo encontramos los materiales poliméricos funcionalizados, que son polímeros con grupos amina o carboxilato que pueden capturar CO_2 mediante interacciones químicas o físicas. Son atractivos por su versatilidad y bajo coste. Aplicaciones industriales de estos materiales es su aplicación en membranas o sistemas híbridos. Existen membranas de polietilenimina para captura de CO_2 en sistemas portátiles, aunque son sistemas muy sensibles a las impurezas y requieren de corrientes limpias para su aplicación y desempeño adecuado.

4.1.8. Resinas amínicas.

Están resinas son materiales de intercambio iónico macroporoso. Estos materiales presentan alta selectividad a baja presión parcial de CO_2, tolerancia a agua y regeneración moderada.

Existen productos comerciales que permiten un intercambio aniónico y que son activos a las temperaturas de trabajo en el intervalo 25 – 60 °C.[98] En concreto, las resinas comerciales operan por captura químico-física con H_2O co-adsorbida y su regeneración es moderada y se realiza por cambios de temperatura y presión con vacío (TVSA).

Así, por ejemplo, una regeneración típica sería a 85–100 °C aplicando un vacío de 50–100 mbar. Esta regeneración es habitual en captura directa de CO_2 del aire; los estudios de regeneración muestran balances de energía para TVSA con calor a menos de 100 °C y la necesidad de un trabajo de vacío moderado.

Algunos ejemplos de resinas amínicas disponibles a nivel comercial son:

- **Lewatit® VP OC 1065** (LANXESS): resina amínica macroporosa con grupos benzilamina; empleada históricamente en DAC/poscombustión a temperaturas similares a las comprendidas en el intervalo ~20 – 80 °C.[99]

- **Purolite™ A830** (Ecolab): resina acrílica macroporosa (complejo amínico) en lecho fijo o monolito. Se suministra en sacos de 25 L hasta supersacks.[100]

4.1.9. Hidróxidos dobles laminares (Layered Double Hydroxides, LDHs).

Son materiales laminares con capacidad de intercambio iónico, útiles en la captura y almacenamiento de CO_2. El dopaje de estos materiales con metales mejora su capacidad de captura y estabilidad. Se caracterizan por su alta capacidad de adsorción, estabilidad térmica, resistencia a impurezas del gas de combustión y facilidad de regeneración, lo que los hace adecuados para columnas de adsorción en sistemas tipo TSA (Temperature Swing Adsorption).

---

[98] ClimeWorks ETH: https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Climeworks-concurrent-Separation-of-CO2-and-H2O-from-Air-by-a-Temperature-Vacuum-Swing-AdsorptionDesorption-Cycle.pdf

[99] https://lanxess.com/en-us/products-and-brands/products/l/lewatit--vp-oc-1065

[100] Purolite™ A830: https://www.purolite.com/product/a830

© ITC-AICE 2025

Se utilizan industrialmente en sistemas híbridos y de membranas compuestas. Existen ejemplos estudiados de LDHs dopados con Mg/Al para columnas de adsorción de CO_2.[101]

4.1.10. Microorganismos.

El secuestro biológico de carbono incluye microorganismos, algas y bacterias fotosintéticas que permiten procesos naturales que fijan CO_2. Es un proceso sostenible, aunque de baja eficiencia. Las aplicaciones industriales más habituales de esta tecnología de captura son el tratamiento de aguas y la biofijación. En particular, hay instalaciones dedicadas al cultivo de microalgas en fotobiorreactores para captura de CO_2.

4.1.11. Otros materiales.

En los últimos años, se ha intensificado el desarrollo de materiales avanzados para la captura de dióxido de carbono, con el objetivo de mejorar la eficiencia, selectividad y viabilidad económica de los procesos de separación en condiciones industriales complejas.

Algunos de los materiales disruptivos o innovadores ya están difuminando los límites conceptuales de las cinco categorías tecnológicas de captura de CO_2 discutidas en este informe, aprovechando múltiples principios físico-químicos para facilitar la captura y/o separación reversible del CO_2 de procesos y gases de combustión en distintas concentraciones.

Entre estos materiales, se incluyen materiales híbridos, materiales disruptivos y tecnologías emergentes que aún están en fase de desarrollo. Un ejemplo son los geles para captura de CO_2. Son materiales porosos con estructura tridimensional, generalmente basados en polímeros o compuestos híbridos, que permiten la adsorción selectiva de dióxido de carbono gracias a su alta superficie específica, capacidad de funcionalización química y propiedades de retención controladas.

Estos geles pueden ser de diferentes clases (aerogeles, criogeles o hidrogeles), y se está investigando por su potencial en aplicaciones sostenibles, especialmente cuando se diseñan con materiales procedentes de recursos naturales renovables o con materiales reciclados.

4.2. Resumen del análisis de materiales para la captura de CO_2

Tal y como hemos visto en apartados anteriores, los materiales adsorbentes más utilizados en postcombustión incluyen:

- **Materiales basados en carbono** (como carbón activado, grafeno, entre otros), debido a su alta disponibilidad y bajo coste.
- **Zeolitas**, ampliamente conocidas por su buen rendimiento en procesos de separación de gases y su uso consolidado a escala industrial.

[101] Neve, H. et al. *Carbon Capturing Materials: A Review of Their Recent Modification Approaches and Implementation for Industrial Applications*. Sorption - New Perspectives and Applications, IntechOpen, 2025. Disponible en: https://www.intechopen.com/chapters/1186563.

© ITC-AICE 2025

- **Metal-Organic Frameworks (MOFs)**[102], una clase novedosa de materiales cristalinos microestructurados que destacan por su porosidad extremadamente alta, la mayor conocida entre los adsorbentes (hasta 7200 m² por gramo de material).

- **Materiales funcionalizados**, son soportes sólidos a los que se les ancla o impregnan moléculas de materiales sorbentes líquidos.

- **Resinas poliméricas**, se trata de sorbentes orgánicos poliméricos.

Los materiales avanzados como los MOFs, zeolitas y carbones activados, ofrecen buena selectividad al CO_2, estabilidad térmica y regeneración rápida. Sin embargo, los MOFs son todavía materiales caros con precios lejanos a mercado. Por otra parte, a pesar de que los carbones activados son muy económicos, su capacidad de adsorción y actividad no es de las mejores que encontramos en bibliografía.

Por su parte, los materiales funcionalizados, como por ejemplo los soportes basados en alúminas funcionalizados con aminas, son prometedoras para captura a baja temperatura, aunque presentan problemas de pérdida de actividad debidas a la funcionalización con interacciones débiles, sufren problemas de degradación por oxígeno y sus síntesis hacen difícil su escalado y la aplicación en industria.

Las resinas poliméricas incluyen materiales disruptivos (POPs, COFs) y materiales comerciales que tienen como requerimiento el uso de presiones elevadas para una efectividad mayor (membranas), ya que su mecanismo de actuación es mediante adsorción física. Las resinas de intercambio iónico son comerciales, pero tienen costes elevados para su aplicación a la industria. Necesitan regeneración y tienen un coste elevado.

Por esta razón, las zeolitas corresponden a materiales disponibles, económicos y efectivos con interés para aplicación en la industria, habiendo sido ampliamente estudiadas en varios campos de aplicación, así como condiciones de trabajo, siendo el material de referencia en muchos estudios de captura de CO_2 utilizando adsorbentes aplicados al proceso de postcombustión.

A continuación, a modo de resumen, la Tabla 6 muestra los principales materiales y sus características más relevantes relacionadas con captura de CO_2:

Tabla 6: Tabla comparativa de materiales emergentes para la captura de CO_2, con sus propiedades clave.

Material	Capacidad de adsorción (mmol/g)	Regenerabilidad	Resistencia a contaminantes	Coste estimado
Basados en carbono	Baja-Moderada (1-4)	Variable	Variable	Bajo
Zeolitas	Moderada (2–4)	Buena (requiere calor)	Alta (robustos en ambientes industriales)	Bajo
Sílice mesoporosa funcionalizada	Moderada (2–4)	Buena (requiere calor)	Moderada (pueden degradarse)	Medio
Sorbentes líquidos avanzados	Alta (dependiente de formulación)	Buena (reacciones reversibles)	Moderada (pueden absorber impurezas)	Alto

[102] https://www.bbc.com/mundo/articles/cq5jnj269y0o

© ITC-AICE 2025

Material	Capacidad de adsorción (mmol/g)	Regenerabilidad	Resistencia a contaminantes	Coste estimado
Basados en carbono	Baja-Moderada (1-4)	Variable	Variable	Bajo
MOFs	Alta (3–8)	Buena (bajo estímulo térmico o presión)	Alta (algunos MOFs toleran H_2O y SOx)	Medio-alto
COFs	Moderada (2–5)	Buena (alta estabilidad térmica)	Moderada (sensibles a humedad)	Medio-alto
POPs	Alta (3–6)	Buena (modificable químicamente)	Moderada (dependiente del diseño)	Medio-alto
Membranas híbridas	Variable (dependiente del diseño)	Alta (procesos continuos)	Alta (según composición)	Variable
Nanomateriales funcionalizados	Alta (hasta 10)	Variable (en investigación)	Variable (requiere funcionalización)	Alto

En los próximos años, se espera que la innovación en adsorbentes sólidos, especialmente en materiales tipo MOF y COF novedosos, sea un tema dominante.

En la Tabla 18 del anexo de este informe se muestra más información de los materiales específicos de adsorción y se evalúan según las características de captura, su activación y regeneración, citando sus principales ventajas y desventajas.

5. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS Y MATERIALES COMERCIALES PARA CAPTURA DE CO_2.

Las tecnologías de captura de carbono utilizadas a gran escala tienen un alto consumo energético, lo cual representa un componente importante de sus costes operativos. Esto se debe a la necesidad de absorción y desorción el CO_2 capturado en los materiales (es decir, la regeneración del reactivo). Por ello, aquellas tecnologías emergentes que evitan la necesidad de regeneración térmica de los materiales, como es la tecnología de bombas electroquímicas, pueden reducir los costes operativos de la captura de CO_2 y son un tema de investigación para operaciones a escala comercial.

Entre las tecnologías comerciales, encontramos la técnica de **depuración o *scrubbing* con aminas,** que es la más utilizada a escala industrial debido a su buena capacidad de captura. Esta tecnología basada en absorción de aminas es ampliamente utilizada en la industria para capturar CO_2 de corrientes de gases, especialmente en procesos de combustión.

Sin embargo, el proceso de regeneración de los absorbentes amínicos requiere temperaturas en el rango de 80-150 ºC**,** lo que incrementa el consumo energético. Por ejemplo, algunos sistemas de *scrubbing* con aminas pueden consumir hasta un 30% de la energía total utilizada en una planta de generación eléctrica.

Esta demanda energética es uno de los principales motivos por los que se sigue investigando en **métodos alternativos** de captura de carbono, ya que, además, las aminas

© ITC-AICE 2025

tienen problemas de toxicidad e impacto ambiental, son corrosivas en disoluciones concentradas en amina y sufren degradación oxidativa, encareciendo los costes de operación debido al uso de aditivos.

Una situación similar se presenta en el proceso de ***calcium looping***, en el que las etapas de carbonatación y calcinación requieren temperaturas de aproximadamente 650 °C y 900 °C, respectivamente, siendo un proceso con alta demanda térmica y energética. De hecho, los procesos de captura con requerimientos energéticos tan elevados para la regeneración son adecuados en contextos donde se dispone de calor residual a alta temperatura. Por otra parte, los óxidos metálicos empleados en el proceso son materias primas muy económicas y robustas, así como comercialmente disponibles para la industria.

Por el contrario, las tecnologías de adsorción con determinados materiales como las **zeolitas** presentan un mejor rendimiento en rangos de baja temperatura en comparación con los sistemas de lavado con aminas y las tecnologías de *calcium looping*. También los materiales carbonosos y los **MOFs** son adsorbentes que requieren temperaturas significativamente menores para su regeneración.

Por otra parte, se están realizando grandes esfuerzos en el estudio y aplicación de nuevas composiciones de materiales basados en óxidos metálicos que reduzcan la energía de captura y regeneración, así como tecnologías de regeneración de baja energía. [38, 103, 104]

La Tabla 7 recoge la comparativa entre tecnologías para procesos de captura de CO_2 de materiales comerciales y aplicables a la industria en la actualidad.

Tabla 7: Comparativa tecnologías para procesos de captura de CO_2.

Tecnología	Capacidad de captura	Eficiencia de captura (%)	Estabilidad del sistema	Consumo energético	Costes operativos	Usos en industria actuales	Concentración CO_2 (%)
Absorción (Aminas)	Alta	80-95	Media (sensible a contaminantes)	Alto (hasta 30% de la energía total)	Medio-Alto (alta demanda energética regeneración solvente)	Cementeras (Brevik, Noruega)	10-15
						Refinerías (reformado de metano)	25
						Plantas de biogás	30-45
						Carbon Engineering (planta DAC, Canadá)	0,04

[103] Rao, G. V., Pachamuthu, S., Dhairiyasamy, R., & Rajendran, S. *Comparative Assessment of Amine-Based Absorption and Calcium Looping Techniques for Optimizing Energy Efficiency in Post-Combustion Carbon Capture*. Global NEST Journal, 2024, *26*(5), 1-13. DOI: https://doi.org/10.30955/gnj.006064

[104] Ren, L.; Cheng, S.; Xie, T.; Zhang, Q.; Li, R.; Yue, T.; Cai, C. *Low-Energy Regeneration Technologies for Industrial CO_2 Capture: Advances, Challenges, and Engineering Applications*. Sustainability, 2025, 17, 9796. DOI: https://doi.org/10.3390/su17219796

© ITC-AICE 2025

Tecnología	Capacidad de captura	Eficiencia de captura (%)	Estabilidad del sistema	Consumo energético	Costes operativos	Usos en industria actuales	Concentración CO_2 (%)
Carbonatación-calcinación	Alta	90-95	Alta (materiales regenerables)	Alto (procesos de calcinación)	Alto (consumo energético significativo por alta temperatura)	Energía y cemento (piloto semiindustrial proyecto SCARLET) (TRL6-7) Acero y cemento (Sumitomo SHI FW) Lecho fluidizado CSIC	15-35
Adsorción (MOFs, Zeolitas, Carbono)	Variable (depende del material)	90-95	Media-Alta (algunos materiales toleran contaminantes)	Medio-Bajo	Medio (operación en condiciones suaves temperatura y presión)	MOF4AIR (Francia, Turquía, Noruega) Moeve Edibon (industrias térmicas)	0,04 (DAC) 5-15 (gases industriales)

Rendimiento y capacidad de captura

El lavado con aminas es el método más utilizado por la industria debido a su elevada capacidad de captura y al grado de madurez tecnológica. No obstante, deben considerarse otros factores relacionados con los costes operativos a largo plazo. Por ejemplo, la presencia de compuestos de azufre tiene un efecto especialmente perjudicial sobre las aminas, ya que degrada los materiales absorbentes y reduce su capacidad de captura con el tiempo. Es necesario, por tanto, realizar un pretratamiento de desulfuración, lo que incrementa los costes operativos. Además, las aminas líquidas son altamente corrosivas, lo que provoca un deterioro acelerado de los equipos.

Por otra parte, el proceso de *calcium looping* presenta ventajas en cuanto al coste de los materiales y no requiere de la etapa de desulfuración, aunque sería recomendable. Sin embargo, los sistemas de *calcium looping* enfrentan otro desafío operativo: la sinterización del material como consecuencia de las altas temperaturas de operación, lo que también conlleva una pérdida de capacidad.

En el caso de las tecnologías de adsorción, los materiales carbonosos presentan la menor capacidad de captura, aunque ofrecen ventajas como el bajo coste del material y la baja temperatura de operación (inferior a 100 °C). La limitada capacidad de captura de los materiales carbonosos puede compensarse mediante el aumento de la cantidad de adsorbente utilizado, lo que implica un incremento en el volumen requerido. Por tanto, la implementación de materiales carbonosos resulta adecuada únicamente en aplicaciones donde se necesite capturar pequeñas cantidades de CO_2 o se disponga de un espacio físico amplio.

© ITC-AICE 2025

La Tabla 8 muestra una comparativa de materiales para captura de CO_2 teniendo en cuenta ventajas, desventajas y aplicaciones típicas.

Tabla 8: Tabla comparativa de materiales comerciales para la captura de CO_2 por adsorción: ventajas, desventajas y aplicaciones.

Material	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Referencias
Carbón activado	Alta superficie específica, económico	Baja capacidad de adsorción. Puede requerir modificación para mejorar el rendimiento	Emisiones industriales, plantas de energía	105, 106, 107, 108, 109, 110
Zeolitas	Alta selectividad, buena estabilidad térmica	Alto coste, sensibilidad a la humedad	Aplicaciones industriales y comerciales, procesamiento de gas natural	105, 111, 112, 113, 114, 115

[105] Lu, C.; Bai, H.; Wu, B.; Su, F.; Hwang, J.F. *Comparative Study of CO_2 Capture by Carbon Nanotubes, Activated Carbons, and Zeolites.* Energy Fuels, 2008, *22*, 3050–3056.

[106] Maniarasu, R.; Rathore, S.K.; Murugan, S. *Potential of using biomass based activated carbon for carbon dioxide capture.* IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2021, *1130*, 012022.

[107] Khalili, S.; Khoshandam, B.; Jahanshahi, M. *Synthesis of activated carbon/polyaniline nanocomposites for enhanced CO_2 adsorption.* RSC Adv., 2016, *6*, 35692–35704.

[108] García, S.; Gil, M.V.; Martín, C.F.; Pis, J.J.; Rubiera, F.; Pevida, C. *Breakthrough adsorption study of a commercial activated carbon for pre-combustion CO_2 capture.* Chem. Eng. J., 2011, *171*, 549–556.

[109] Lahuri, A.H.; Ling, M.N.K.; Rahim, A.A.; Nordin, N. *Adsorption Kinetics for CO_2 Capture using Cerium Oxide Impregnated on Activated carbon.* Acta Chim. Slov., 2020, 67, 570–580.

[110] Zhang, C.; Sun, S.; He, S.; Wu, C. *Direct air capture of CO_2 by KOH-activated bamboo biochar.* J. Energy Inst., 2022, *105*, 399–405.

[111] Kumar, S.; Srivastava, R.; Koh, J. *Utilization of zeolites as CO_2 capturing agents: Advances and future perspectives.* Journal of CO2 Utilization, 2020, *41*, 101251.

[112] Cecilia, J.A.; Vilarrasa-García, E.; Morales-Ospino, R.; Finocchio, E.; Busca, G.; Sapag, K.; Villarroel-Rocha, J.; Bastos-Neto, M.; Azevedo, D.C.S.; Rodríguez-Castellón, E. *Kaolinite-based zeolites synthesis and their application in CO_2 capture processes.* Fuel, 2022, *320*, 123953.

[113] Kulkarni, A.R.; Zhao, Z.-J.; Siahrostami, S.; Nørskov, J.K.; Studt, F. *Cation-exchanged zeolites for the selective oxidation of methane to methanol.* Catal. Sci. Technol., 2018, *8*, 114–123.

[114] Narsimhan, K.; Iyoki, K.; Dinh, K.; Román-Leshkov, Y. *Catalytic Oxidation of Methane into Methanol over Copper-Exchanged Zeolites with Oxygen at Low Temperature.* ACS Cent. Sci., 2016, *2*, 424–429.

[115] Stuckert, A.N.; Yang, R.T. *CO_2 Capture from the Atmosphere and Simultaneous Concentration Using Zeolites and Amine-Grafted SBA-15.* Environ. Sci. Technol., 2011, 45, 10257–10264.

© ITC-AICE 2025

Material	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Referencias
MOFs (estructuras metal-orgánicas)	Superficies extremadamente altas, poros y funcionalidades ajustables	Alto coste, pueden ser frágiles y sensibles a la humedad	Gases de combustión industrial, captura directa del aire	116, 117, 118, 119, 120
Nanotubos de carbono (CNTs)	Alta resistencia mecánica, gran superficie; pueden funcionalizarse	Alto coste de producción; proceso de síntesis complejo	Gases de combustión; captura directa del aire	105, 121, 122, 123
Hidróxidos dobles laminares (LDHs)	Naturaleza química permite intercambio iónico; química interlaminar ajustable	Menor estabilidad comparado con otros adsorbentes; cinética más lenta	Tratamiento de gases de combustión; plantas post-combustión	124, 125, 126, 127, 128
Líquidos iónicos	Adaptables para separaciones específicas;	Alta viscosidad; pueden requerir condiciones	Aplicaciones industriales específicas;	129, 130

[116] Chung, Y.G.; Gómez-Gualdrón, D.A.; Li, P.; Leperi, K.T.; Deria, P.; Zhang, H.; Vermeulen, N.A.; Stoddart, J.F.; You, F.; Hupp, J.T.; et al. *In silico discovery of metal-organic frameworks for precombustion CO_2 capture using a genetic algorithm.* Sci. Adv., 2016, *2*, e1600909.

[117] Beavis, R. The EU FP6 CACHET project—Final results. *Energy Procedia*, 2011, *4*, 1074–1081.

[118] Jurado, N.; Darabkhani, H.G.; Anthony, E.J.; Oakey, J.E. *Oxy-fuel Combustion for Carbon Capture and Sequestration (CCS) from a Coal/Biomass Power Plant: Experimental and Simulation Studies*. Progress in Clean Energy, Volume 2: Novel Systems and Applications; Dincer, I., Colpan, C.O., Kizilkan, O., Ezan, M.A., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015; pp. 177–192. ISBN 978-3-319-17031-2.

[119]National Energy Technology Laboratory. Oxy-Combustion. Disponible online: https://www.netl.doe.gov/node/7477

[120] Yadav, S.; Mondal, S.S. *A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (CCS) technology*. Fuel, 2022, *308*, 122057.

[121] Keller, L.; Ohs, B.; Lenhart, J.; Abduly, L.; Blanke, P.; Wessling, M. *High capacity polyethylenimine impregnated microtubes made of carbon nanotubes for CO_2 capture.* Carbon, 2018, *126*, 338–345.

[122] Irani, M.; Jacobson, A.T.; Gasem, K.A.M.; Fan, M. *Modified carbon nanotubes/tetraethylenepentamine for CO_2 capture.* Fuel, 2017, *206*, 10–18.

[123] Ngoy, J.M.; Wagner, N.; Riboldi, L.; Bolland, O. A CO_2 Capture Technology Using Multi-walled Carbon Nanotubes with Polyaspartamide Surfactant. Energy Procedia, 2014, *63*, 2230–2248.

[124] Dewangan, N.; Hui, W.M.; Jayaprakash, S.; Bawah, A.-R.; Poerjoto, A.J.; Jie, T.; Jangam, A.; Hidajat, K.; Kawi, S. *Recent progress on layered double hydroxide (LDH) derived metal-based catalysts for CO_2 conversion to valuable chemicals.* Catal. Today, 2020, *356*, 490–513.

[125] Li, C.; Wei, M.; Evans, D.G.; Duan, X. *Layered Double Hydroxide-based Nanomaterials as Highly Efficient Catalysts and Adsorbents.* Small, 2014, *10*, 4469–4486.

[126] Ram Reddy, M.K.; Xu, Z.P.; Lu, G.Q.; Diniz Da Costa, J.C. *Layered Double Hydroxides for CO_2 Capture: Structure Evolution and Regeneration.* Ind. Eng. Chem. Res., 2006, *45*, 7504–7509.

[127] Veerabhadrappa, M.G.; Maroto-Valer, M.M.; Chen, Y.; Garcia, S. *Layered Double Hydroxides-Based Mixed Metal Oxides: Development of Novel Structured Sorbents for CO_2 Capture Applications.* ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, *13*, 11805–11813.

[128] Santamaría, L.; Korili, S.A.; Gil, A. *Layered double hydroxides for CO_2 adsorption at moderate temperatures: Synthesis and amelioration strategies.* Chem. Eng. J., 2023, *455*, 140551.

[129] Zulfiqar, S.; Sarwar, M.I.; Mecerreyes, D. *Polymeric ionic liquids for CO_2 capture and separation: Potential, progress and challenges.* Polym. Chem., 2015, *6*, 6435–6451.

[130] Sadeghpour, M.; Yusoff, R.; Aroua, M.K. *Polymeric ionic liquids (PILs) for CO_2 capture.* Rev. Chem. Eng., 2017, *33*, 183–200.

© ITC-AICE 2025

Material	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Referencias
poliméricos (PILs)	regenerables; alta estabilidad térmica	específicas para un rendimiento óptimo	tratamiento de gases de combustión	

La Figura 15 muestra la cantidad de energía requerida utilizando distintas tecnologías, siendo el proceso de menor energía requerida aquel que funciona con cambios eléctricos, seguidos del bucle químico y la adsorción con materiales utilizando tecnologías de cambios de presión y temperatura para la desorción.

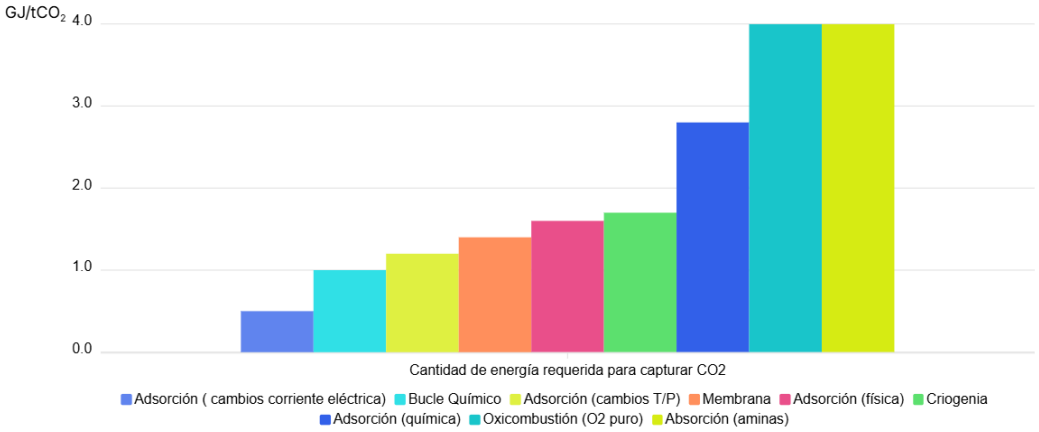


Figura 15: Cantidad de energía requerida para capturar CO_2 utilizando distintas tecnologías. Fuente: © ITC y ref. 10 y 131.

Si nos centramos en los materiales adsorbentes, los avances recientes en MOFs han demostrado que pueden regenerarse a temperaturas tan bajas como 90 °C, lo que les confiere una ventaja en términos de bajo consumo energético, tal como se muestra en la Figura 16.

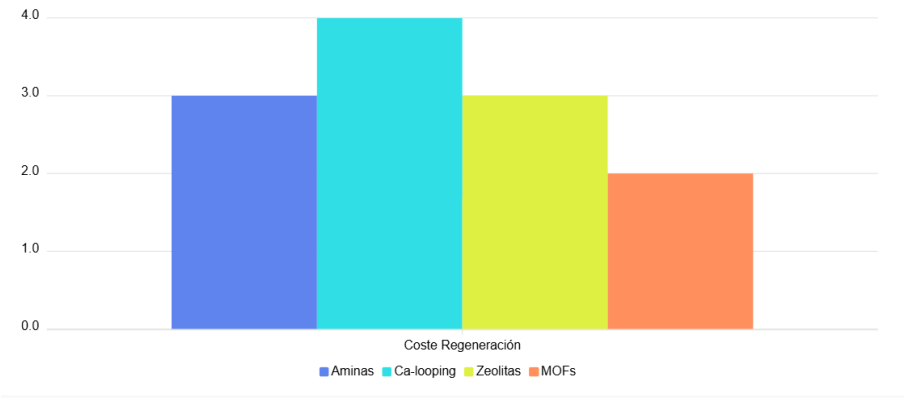


Figura 16: Comparativa requerimiento energético materiales para captura de CO_2. Fuente: ITC © y Ref. 132.

1= Bajo; 2= Medio; 3= Alto; 4= Muy alto.

[131] ETC (2022): "*CCUS in the Energy Transition. Vital but Limited*" Energy Transitions Commission, version 1.0. July 2022, 120 pp.

[132] INFORME novoMOF AG: "*Carbon Capture: understanding existing technologies*". January 2023. Disponible en: https://novomof.com/technology/co2-capture/

© ITC-AICE 2025

De hecho, en comparación con las aminas acuosas, la tecnología más ampliamente implantada a nivel industrial, los MOFs pueden reducir prácticamente a la mitad la energía requerida para la regeneración (aproximadamente 105 kJ/mol en el caso de las aminas frente a aproximadamente 54 kJ/mol para los MOFs).

Por otra parte, en cuanto a la capacidad de captura de CO_2, la Figura 17 muestra una comparativa de distintos materiales.

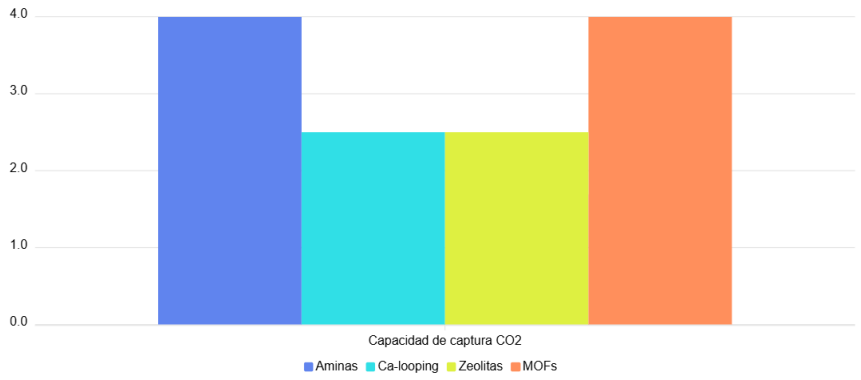


Figura 17: Comparativa capacidad de captura de CO_2 en distintos materiales. Fuente: © ITC y ref. 130.

1= Bajo; 2= Medio; 3= Alto; 4= Muy alto.

Las zeolitas presentan una capacidad de captura competitiva entre los materiales adsorbentes. Su principal desventaja radica en la elevada afinidad por el agua; en condiciones de humedad, las zeolitas reducen drásticamente su capacidad de captura (la pérdida de rendimiento puede alcanzar hasta un 90 % tras pocos ciclos). Por ello, tal y como se ha comentado en su descripción, la implementación de adsorbentes basados en zeolitas requiere una etapa previa de eliminación de humedad, lo que incrementa los costes operativos.

Otra característica crítica en la captura de carbono post-combustión es la estabilidad y resistencia en condiciones de humedad. Los materiales carbonosos y las zeolitas sufren pérdidas significativas de capacidad de captura en presencia de moléculas de agua. Por el contrario, los MOFs diseñados específicamente para la captura de CO_2 están mostrando una mayor estabilidad frente a la humedad, con pérdidas mínimas de capacidad, tal y como queda representado en la Figura 18.

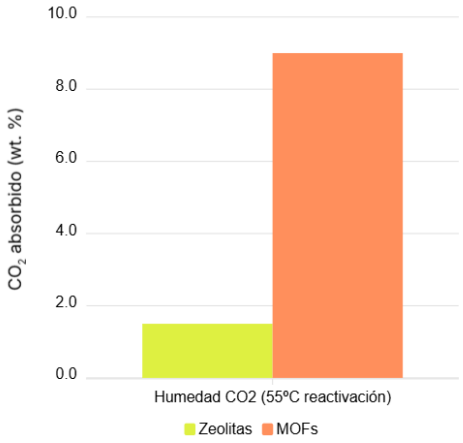
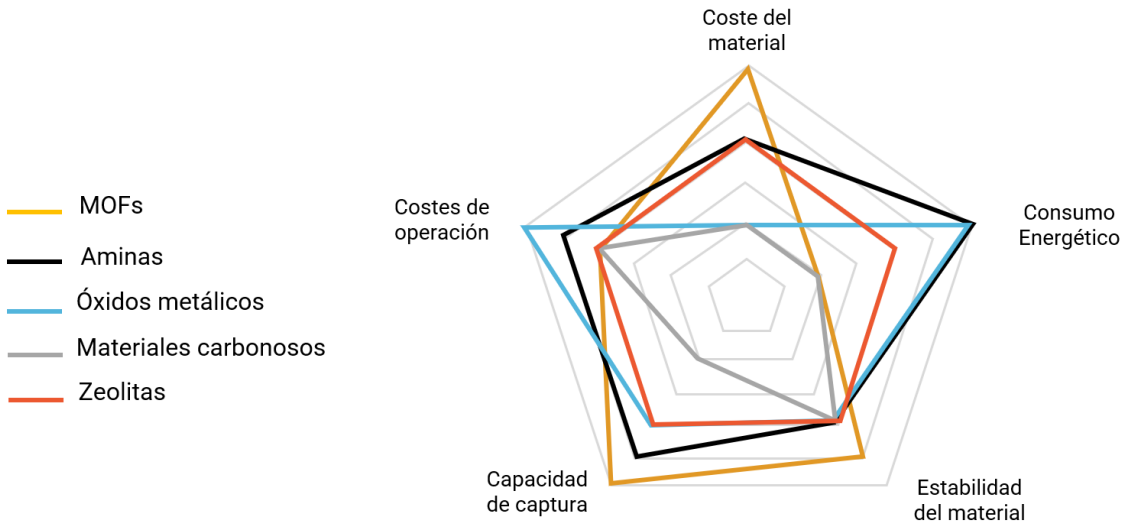


Figura 18: Comparativa capacidad de captura de CO_2 en condiciones de humedad. Fuente: © ITC y ref.130

© ITC-AICE 2025

Por tanto, materiales como óxidos metálicos y zeolitas presentan una capacidad de captura moderada en comparación con los materiales disruptivos tipo MOF, aunque estos últimos son más caros y no están disponibles comercialmente en la actualidad.

Como conclusión, aunque el lavado con aminas es actualmente la única tecnología disponible comercialmente para la captura de carbono, los avances en tecnologías alternativas muestran resultados prometedores. En particular, la implementación de tecnologías de adsorción (zeolitas y MOFs) ha logrado resultados comparables en términos de capacidad de captura, junto con un menor consumo energético en la etapa de regeneración (Figura 19).



Nótese que los vértices más alejados del centro denotan un valor mayor.

Figura 19: Comparativa características materiales para captura de CO_2. Fuente: Ref. 130.

Entre los materiales adsorbentes, los MOFs destacan por su elevada capacidad de captura y su rendimiento estable en condiciones de post-combustión. Los MOFs pueden reducir el consumo energético en la etapa de regeneración a la mitad en comparación con la tecnología de referencia (lavado con aminas). Gracias a su capacidad de ajuste estructural (*tunabilidad*), es posible diseñar estructuras con una selectividad excepcional CO_2/N_2 (Figura 20).

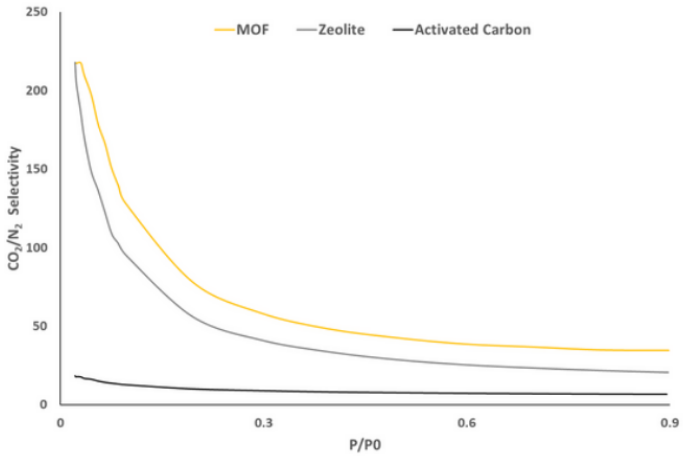


Figura 20: Comparativa selectividad de CO_2 en distintos materiales para captura. Fuente: Ref. 130

© ITC-AICE 2025

Este nivel de control en la arquitectura de los poros no es alcanzable en materiales como los carbones activados o las zeolitas. La combinación de menores requerimientos energéticos y costes operativos (incluso considerando el coste del material), junto con una mayor productividad, se traduce en beneficios significativos a nivel de proceso y operación, como por ejemplo una mayor cantidad de CO_2 capturado en un tiempo determinado.

Algunos ejemplos industriales donde el gas tratado tiene concentraciones bajas de CO_2 (1-3 %) y que se aplican a tecnologías comerciales se muestran a continuación. Estas bajas concentraciones (1 – 3 %) son un reto porque incrementan el coste energético de la captura (más volumen de gas por tonelada de CO_2). Por eso, se usan principalmente en pilotos o en aplicaciones donde el CO_2 tiene valor comercial (bebidas, procesos químicos).

Tabla 9: Comparativa tecnologías para procesos de captura de CO_2 industriales con porcentajes 1-3%.

Uso industrial	Aplicación	Tecnología utilizada	Ejemplos reales	Porcentaje captura (%)
Plantas de energía con combustión gas natural	Turbinas de ciclo combinado.	Post-combustión con aminas (MEA)	Petra Nova (EEUU)	80-90
			Boundary Dam (Canadá)	
Producción calor industrial	Calderas industriales	Depuración con aminas	Carburos metálicos	80-90
Planta cogeneración	Calefacción urbana	Absorción química con aminas	SINTEF (Noruega)	80-90

En el caso de los materiales ya comercializados, se ha contactado a proveedores para recabar información sobre su disponibilidad, condiciones de operación y precios de mercado los cuales oscilan considerablemente en función de la cantidad adquirida (tal y como se muestra en el caso de la zeolita). La Tabla 10 muestra la información recopilada para compras de pequeñas cantidades para ensayos de laboratorio y estudio de los materiales en pilotos.

Tabla 10: Comparativa coste de materiales para procesos de captura de CO_2.

Material comercial	Cantidad adquirida (kg)	Coste calculado * (€/kg)
Mezcla óxidos metálicos	25	25,5
Biosorb	25	7,2
Intersorb	20	6
Silica	25	10,4
MOF comercial	1	2.000
Zeolita comercial	10	30
Zeolita comercial[133]	135	6,57

[133] https://www.berg-kompressoren.de/es/tamices-moleculares-para-la-eliminacion-de-trazas-de-impurezas-zeo-13x-2212086020

© ITC-AICE 2025

El material basado en óxidos metálicos se comercializa para captura de contaminantes ácidos en gases de combustión. El coste aproximado estimado para industria para estos productos específicos estaría en el intervalo de precios de 300-800 €/tonelada material, dependiendo del volumen, la granulometría y el contrato con el proveedor.

Por su parte, las zeolitas comerciales para captura de CO_2 tienen un precio aproximado de 1200-1800 €/tonelada, mucho más cara, aunque se le presupone mayor selectividad y capacidad de regeneración.

A modo orientativo, la Tabla 19 del anexo de este estudio, recoge costes comparativos para los materiales comerciales para adquisición de pequeñas cantidades.

6. ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE MATERIALES PARA LA CAPTURA DE CO_2 EN EL SECTOR DE BALDOSAS CERÁMICAS.

En el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, las principales emisiones de CO_2 se generan en la etapa de atomización, secado y cocción, presentando una composición de CO_2 típica inferior al 5 % y una presión baja, por lo que la estrategia de captura de carbono en fase postcombustión con materiales adsorbentes es especialmente relevante para la industria cerámica y representa un reto debido a la presencia de CO_2 en condiciones más diluidas que en otros sectores industriales (por ejemplo, en el caso del sector fabricante de cemento, en el que los gases de salida de los hornos tienen un contenido en CO_2 con valores comprendidos entre el 10- 20%).

A pesar de que la concentración de CO_2 en la corriente gaseosa es baja, existen soluciones técnicas en cuanto a tecnologías de captura para postcombustión, ya que hay materiales capaces de trabajar a concentraciones de CO_2 incluso más bajas, como es el caso de la concentración de CO_2 en el aire (0,04% CO_2).

Es importante conocer las condiciones de trabajo de estos materiales para poder seleccionar los más adecuados y conocer los requisitos técnicos de los mismos para una buena ejecución técnica de la captura de CO_2. No obstante, debe tenerse en cuenta que los gases de combustión asociados a estas etapas presentan otros compuestos, como puede ser vapor de agua, CO, SO_2, NO_x, HF y partículas sólidas en suspensión, los cuales interfieren en el proceso de captura y pueden degradar los materiales adsorbentes, siendo necesario la implementación de sistemas de pretratamiento de gases para evitar impurezas antes de la captura de CO_2 con materiales específicos.

Esta situación representa un desafío técnico, ya que reduce la eficiencia de los materiales adsorbentes convencionales y exige materiales con alta selectividad y capacidad de captura en condiciones reales de la industria cerámica.

Por tanto, el proceso de captura de CO_2 requiere de un análisis inicial en función de la etapa del proceso cerámico en la que se aplicará la captura para tener en cuenta los posibles compuestos y contaminantes que pueden estar presentes en los gases y podría disminuir la eficacia de los materiales de captura de CO_2 seleccionados.

Finalmente, la implementación de tecnologías postcombustión en la cerámica debe considerar además la variabilidad de los flujos de emisión, la intermitencia de los procesos térmicos y la integración con sistemas de recuperación de calor para mejorar la eficiencia energética global.

© ITC-AICE 2025

6.1. Descripción de los equipos de proceso:

- **Secaderos por atomización:**

Este equipo se utiliza para reducir la humedad de las materias primas en agua (barbotina) desde un 40% hasta un 6% aproximadamente, obteniéndose gránulos más o menos esféricos, huecos en su interior. Estas propiedades le confieren al producto una elevada fluidez, facilitando la operación posterior de llenado de los moldes de las prensas.

La corriente de gases de secado puede provenir de un quemador de gas natural, de un quemador de gas natural vena de aire o de los gases de escape de una turbina de cogeneración. En la Figura 21 se muestra la imagen de un secadero por atomización.

Figura 21: Imagen de un atomizador.

Los gases húmedos salen del atomizador y son conducidos hacia un sistema de depuración de gases para eliminar las partículas en suspensión que arrastran. Finalmente, la corriente de gases depurada se vierte al exterior a través de la chimenea.

Los parámetros que caracterizan la corriente de salida de gases de un atomizador se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Principales parámetros de la corriente de salida de un atomizador

Parámetros	Valores medios
Caudal de gases húmedos (Nm^3/h)	20.000 – 200.000
Temperatura (ºC)	90-115
Humedad (%vol.)	15-25
Partículas (mg/Nm^3)	3-25
CO_2 (% vol.) en gases secos	0,5-2,5
O_2 (% vol.) en gases secos	16-21
CO (mg/Nm^3)	5-75
NOx (mg/Nm^3)	10-200
SO_2 (mg/Nm^3)	Contiene

© ITC-AICE 2025

Además de partículas y vapor de agua, los gases de salida de los atomizadores contienen compuestos de nitrógeno y azufre. Por tanto, en los secaderos por atomización, en una etapa de pretratamiento de los gases previa a la captura de CO_2, se deberían eliminar de la corriente gaseosa, además de las partículas en suspensión, el vapor de agua, los NO_x, y el azufre.

Como se puede observar en la Tabla 11 la concentración de CO_2 en los gases de la chimenea del atomizador es muy baja. Esto es debido a que el aporte de calor al atomizador se realiza mediante la combustión de gas natural, que se quema con aire como comburente y habitualmente tanto la turbina de cogeneración como el quemador trabajan con mucho exceso de aire de combustión. Además, el atomizador se encuentra en depresión para facilitar la evaporación de agua, lo que facilita la entrada de aire ambiente al mismo. Esto hace que los gases de combustión se diluyan y presenten una composición con bajo contenido en CO_2.

La temperatura de salida de los humos es de 90 – 115 ºC, por lo que para determinados materiales de captura como son las zeolitas, se deberían enfriar los gases a la salida antes de la captura de CO_2, o bien seleccionar otro material.

- **Secaderos de baldosas:**

Un secadero de baldosas cerámicas es un equipo esencial en la línea de producción, diseñado para eliminar la humedad de las piezas tras su conformado, antes de la etapa de esmaltado y decoración. Su función principal es reducir el contenido de agua en las baldosas y aumentar su temperatura, para facilitar el proceso de esmaltado, y evitar que en la entrada del horno se produzcan grietas o explosiones de las piezas por un secado brusco durante el inicio de la cocción.

Los tipos de secaderos más habituales son secaderos horizontales de rodillos o secaderos verticales. En los secaderos horizontales las baldosas se transportan sobre rodillos en túneles cerrados, mientras que en los secaderos verticales (Figura 22) las piezas se colocan en estanterías móviles dentro de cámaras con circulación de aire caliente. Para su funcionamiento, estos equipos utilizan aire caliente (100 - 250ºC) generado por quemadores de gas.

Figura 22. Imagen de un secadero vertical de baldosas.

© ITC-AICE 2025

Los gases de secado son, en su mayoría, recirculados, y el resto salen por la chimenea, que actúa como purga del sistema, sacando la humedad eliminada de las piezas al exterior. Los parámetros que caracterizan la corriente de salida de gases de un secadero se recopilan en la Tabla 12.

Tabla 12: Principales parámetros de la corriente de salida de un secadero

Parámetros	Valores medios
Caudal de gases húmedos (Nm^3/h)	7.000 – 20.000
Temperatura (ºC)	90-120
Humedad (%vol.)	3-5
CO_2 (% vol.) en gases secos	1-2
O_2 (% vol.) en gases secos	18-21
CO (mg/Nm^3)	50-100

En el caso de los secaderos de baldosas cerámicas, dependiendo del material de captura a utilizar, únicamente sería necesario eliminar el agua presente si utilizamos materiales de captura basados en adsorción física (como el caso de las zeolitas), puesto que, en estos materiales la molécula de agua compite con el CO_2 para en el proceso de captura por fisisorción.

- **Hornos de cocción de baldosas cerámicas:**

Un horno de cocción de baldosas cerámicas es un equipo de proceso donde el aporte de calor se realiza por combustión de gas natural en quemadores situados en las paredes del horno, que utilizan como comburente aire a temperatura ambiente o precalentado. La tecnología de cocción más habitual es la cocción simultanea del soporte y esmalte (monococción) aunque existen instalaciones de bicocción en las que se realiza una primera cocción del soporte antes de la operación de esmaltado y decoración, y una segunda cocción tras la aplicación de esmalte y aplicaciones decorativas.

Los gases calientes resultantes de la operación de cocción se emiten a la atmósfera a través de dos focos emisores: chimenea de humos y chimenea de enfriamiento.

Los gases de combustión procedentes de la zona de calentamiento y cocción se emiten al exterior por la chimenea de humos, que se encuentra a la entrada del horno. Previo paso por el ventilador de extracción estos gases se diluyen con aire ambiente para reducir su temperatura y no dañar el ventilador de extracción. Generalmente, la temperatura a la que son vertidos al exterior se encuentra entre los 160ºC y 200ºC.

La Figura 23 muestra una imagen de un horno de cocción de baldosas cerámicas.

© ITC-AICE 2025

Figura 23. Imagen de un horno de cocción de baldosas cerámicas.

La composición de los gases presentes en la chimenea de humos es variable, pues contienen compuestos procedentes de la combustión del gas natural y también compuestos resultado de las recciones químicas que experimenta el material cerámico cuando es sometido a elevada temperatura.

Los parámetros que caracterizan la corriente de salida de gases de la chimenea de humos de un horno son que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Principales parámetros de la corriente de salida de un horno.

Parámetros	Intervalos
Caudal de gases húmedos (Nm^3/h)	11.000-20.000
Temperatura (ºC)	180-200
Humedad (%vol.)	5-10
CO_2 (% vol.) en gases secos	3-5
O_2 (% vol.) en gases secos	15-18
CO (mg/Nm^3)	5-75
NOx (mg/Nm^3)	10-200
SO_2 (mg/Nm^3)	Contiene
HCl (mg/Nm^3)	Contiene
HF (mg/Nm^3)	Contiene

Por tanto, en el caso de procesos de captura adaptados a los hornos de cocción de baldosas cerámicas, se requiere un pretratamiento de los gases de combustión más completo. En esta chimenea existen diferentes compuestos y contaminantes: partículas, elementos ácidos (HF, HCl) compuestos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y vapor de agua (H_2O). Según lo expuesto anteriormente, el sistema de pretratamiento debe tener varias fases para eliminarlos de manera selectiva y eficiente.

© ITC-AICE 2025

6.2. Análisis de los materiales de captura más adecuados para el proceso cerámico

En el apartado anterior se ha mostrado cuáles son los compuestos presentes en los gases de chimenea asociados a cada una de las etapas del proceso cerámico donde se generan emisiones de gases a la atmósfera. El estudio detallado de la composición de los gases es, pues, necesario para asegurar un correcto pretratamiento previo a la entrada de los gases en un equipo de captura de CO_2.

A partir de la identificación de materiales realizada, se ha llevado a cabo un análisis teórico y prospectivo de aplicación de los materiales a las necesidades del sector cerámico con el fin de analizar las opciones más adecuadas de cara a su integración en equipos de captura adaptados a corrientes con bajas concentraciones de CO_2.

La Tabla 14 muestra una comparativa entre materiales comercialmente disponibles para captura de CO_2 y su adecuación para su aplicación en el sector cerámico, donde los gases presentan una concentración de CO_2 inferior al 5 % y hay presencia de otros elementos en la corriente que dificultan su captura. La tabla recopila las características más significativas que presentan estos materiales, así como sus condiciones óptimas de trabajo y la tipología de regeneración más idónea para cada uno de los materiales.

Como se puede observar, los compuestos funcionalizados con aminas y los MOF presentan la selectividad más elevada. Por otro lado, la zeolita tiene una selectividad moderada y los carbones presentan baja selectividad en estas condiciones de trabajo. Las aminas soportadas y los MOF tienen buena tolerancia a la humedad mientras que los otros adsorbentes deben trabajar en condiciones secas.

La capacidad de captura en cada material depende de la temperatura y la presión de trabajo. Estos valores se presentan en un rango de valores entre 0,5 - 15 mmol/g según el material seleccionado.

En general, cada material tiene unas estrategias de regeneración estudiadas que facilitan la reutilización del material y su uso consecutivo sin una pérdida excesiva de actividad. Las estrategias de regeneración son un punto importante para su uso industrial, siendo la regeneración por temperatura (TSA) y vacío (VSA) las más comunes y utilizadas.

Desde un punto de vista económico, los precios más bajos corresponden a las zeolitas, los carbones activados y los óxidos metálicos como el óxido de calcio, que además tienen alta disponibilidad comercial. Por otro lado, los MOF son los compuestos más caros que existen en el mercado y son pocos los materiales tipo MOF que se comercializan actualmente.

© ITC-AICE 2025

Tabla 14: Resumen de los materiales para captura de CO_2 aplicables a industria cerámica y características de aplicabilidad en la industria.

Familia de compuestos	Selectividad trabajo (2-3% CO_2)	Presencia de humedad	Capacidad captura típica (mmol/g)	Tipología de regeneración del material	Coste orientativo para uso escala industrial (€/kg)	Disponibilidad comercial
Aminas soportadas (PEI/APTES)	Alta	Mejora la captura	1–4 según carga/soporte	TVSA (80–150 °C) VSA	9,3 - 18,6	Alta
Resinas amínicas (Lewatit, Purolite)	Alta	Compite con la captura de CO_2	0,5 – 2	TVSA (<100 °C; 50-100 mbar)	9,3 - 90,0	Muy alta (LANXESS, Purolite)
Zeolita	Media	Compite con la captura de CO_2	0,5 – 3	TSA (120–250 °C) VSA	0,93 – 2,8	Muy alta
MOF comercial	Alta	No afecta	2,5 – 4	PTSA	Bajo NDA (elevado)	Bajo pedido (BASF, Svante)
Carbones activados	Media-baja	Afecta o no, según el carbón seleccionado	1 – 3	TSA	1,49 – 2,5	Muy alta
Óxidos e hidróxidos metálicos	Alta	Mejora la captura	8 – 15	TSA	0,15 – 0,8	Muy alta

TVSA= *Temperature- Vacuum Swing Adsorption*; VSA= *Vacuum Swing Adsoption*; TSA= *Temperature Swing Adsorption*; PTSA= *Pressure-Temperature Swing Adsorption.*

Non-Disclosure Agreement (NDA) = Acuerdo de Confidencialidad.

© ITC-AICE 2025

En lo que se refiere a la capacidad de captura entre materiales para bajas concentraciones de CO_2, la comparativa muestra que, las zeolitas, las aminas soportadas, las resinas amínicas comerciales, el carbón activo y los MOF son materiales que permiten valores de captura comprendidos entre 0,5 y 4 mmol/g. En concreto, la zeolita 13X y algunos MOF comerciales son materiales de interés creciente para soluciones de captura en el caso de una baja concentración de CO_2.

Las aminas soportadas sobre sílice no se considerarán en este estudio dada su potencial toxicidad. Sin embargo, aunque los MOF comerciales como el CALF-20 serían idóneos para su aplicación, este material tiene limitada disponibilidad comercial para industria y su precio es muy elevado, por lo que se descarta su uso en este análisis de materiales para la industria cerámica.

Por otra parte, los carbones activados adsorben la molécula de CO_2 de forma eficiente, sin embargo, presentan una selectividad muy baja con mezclas CO_2/N_2 y debido a su baja área superficial, después de varios ciclos, su eficacia baja un 30-50 %, siendo difícil el tratamiento de corrientes gaseosas con baja concentración de CO_2 y elevada humedad.

Las zeolitas presentan una capacidad de captura de CO_2 a bajas presiones de trabajo (1 bar) con valores alrededor de 0,2-0,4 $g_{CO2}/g_{adsorbente}$, disminuyendo esta capacidad de captura en un 50-70 % en condiciones húmedas. Por tanto, este es un factor relevante a la hora de su aplicación en la industria cerámica y es necesario una condensación o eliminación de vapor de agua previo a la captura. Por otra parte, el consumo energético para su regeneración mediante TSA es elevado en comparación con los otros materiales como los MOFs.

Así, la zeolita seleccionada para el estudio se puede utilizar en post-combustión para gases de chimenea que contienen un 10 - 15% en volumen de CO_2 hasta captura de CO_2 del ambiente (DAC), en donde el CO_2 está en una concentración de 400 ppm (0,04%) y se requiere alta selectividad.

La zeolita comercial seleccionada se utiliza principalmente para la captura de CO_2 mediante adsorción física, por lo que su rango de trabajo depende de la temperatura. La temperatura óptima de captura para este material es de 20-60ºC, siendo más eficiente cuanto más baja la temperatura. Por encima de 80-100ºC, la temperatura de adsorción disminuye significativamente porque el calor favorece la desorción, dado que la regeneración del material se hace a temperaturas de 100-250ºC para liberar el CO_2 y reutilizar la zeolita en varios ciclos consecutivos.

Por otro lado, los materiales basados en óxidos metálicos alcalinotérreos, como el CaO, tienen valores de capacidad de captura más elevado, en torno a 8 – 15 mmol/g. Estos materiales sufren procesos de aglomeración y pérdida de actividad con los ciclos de captura. Sin embargo, algunas de las ventajas para su empleo en la industria son su capacidad de adsorción de CO_2 incluso a bajas concentraciones, su buena tolerancia a la presencia de impurezas y humedad, que es una materia prima muy abundante, lo que facilita su escalabilidad, económica (300-800 €/tonelada) y que es reutilizable en el orden de centenas de ciclos sin perder actividad, permitiendo una captura de CO_2 rápida y eficiente.

Por tanto, si priorizamos un ciclo muy rápido de captura de CO_2 (cinética rápida) o bien las corrientes llevan vapor de agua que llega a la planta de captura, se recomienda el uso de materiales basados en óxidos metálicos ya que podemos tratar los gases con un nivel menor de depuración previa. El único requisito para su aplicación sería eliminar los óxidos de azufre.

© ITC-AICE 2025

Como conclusión de este análisis de materiales, por la naturaleza de las emisiones de la industria cerámica, y teniendo en cuenta la disponibilidad comercial y el coste económico, se validará el uso de una zeolita comercial, así como un material basado en óxidos metálicos para su testeo en laboratorio utilizando análisis termogravimétrico.

7. VALIDACIÓN EN LABORATORIO DE MATERIALES DE CAPTURA SELECCIONADOS.

La validación en laboratorio de materiales de captura se llevó a cabo con los dos materiales seleccionados: material comercial basado en óxidos metálicos y zeolita comercial.

Los ensayos de captura de CO_2 se han realizado mediante la técnica TGA siguiendo la metodología basada en análisis termogravimétricos.[134] Para llevar a cabo los experimentos en el laboratorio, en primer lugar, se estabilizó el material en atmósfera inerte para eliminar humedad y posibles contaminantes y se fijó la temperatura de trabajo según los datos de bibliografía para cada material. La validación de la eficiencia de captura a escala de laboratorio se ha llevado a cabo con gases simulados con una composición del 2% CO_2.

7.1. Estudio de validación de captura de CO_2 del material basado en óxidos metálicos.

En este apartado se describen los resultados de los experimentos realizados para llevar a cabo la evaluación del material comercial basado en óxidos metálicos como material de captura de CO_2 aplicable a la industria cerámica, caracterizada por tener una composición de emisiones con porcentajes de CO_2 en torno al 2-3%.

Figura 24: Muestra de material comercial basado en óxidos metálicos.

Este adsorbente presenta una superficie específica en el rango de lo esperado para la composición de materiales de reactivo cálcico granular (20 m^2/g) y una porosidad significativamente mayor que el mineral natural, lo que permite que ofrezca mayor eficiencia y mejor reactividad.

En estos experimentos, los ciclos térmicos seleccionados se llevan a cabo en 4 etapas que incluyen etapas de calentamiento bajo gas inerte, etapa de enfriamiento hasta la temperatura de captura en gas inerte (evitando adsorciones del ambiente), una etapa a la temperatura de captura, que se realiza con un gas sintético de composición al 2% CO_2 para

[134] Li, Hailong, Mingyu Qu, Yuandong Yang, Yingchao Hu, and Wenqiang Liu. *One-Step Synthesis of Spherical CaO Pellets via Novel Graphite-Casting Method for Cyclic CO2 Capture*. Chemical Engineering Journal, 2019, 374, 619–25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.214.

© ITC-AICE 2025

simular composiciones de la industria cerámica y una etapa final de regeneración del material y final del ciclo bajo atmósfera inerte.

En un experimento típico, el análisis termogravimétrico muestra el aumento o pérdida de masa correspondiente a diversos ciclos de captura-desorción del material. En una primera zona de estabilización, el material se mantiene en atmósfera inerte para eliminar la humedad y la masa se estabiliza.

A continuación, cuando se cambia el gas a CO_2, es cuando se registra el incremento de masa. En este momento, se inicia la medida para la captura, donde el material empieza a adsorber CO_2 y la balanza detecta un incremento de masa que se registra mediante una curva de TGA que muestra como aumenta la masa con el tiempo debido a que el material captura CO_2. Al alcanzar el equilibrio (masa estable), se ha alcanzado la capacidad máxima de captura.

La pendiente de la curva nos indica la velocidad de captura. Cuando la curva se aplana, el material ha capturado todo el CO_2 que puede, y el aumento total de masa nos permite calcular la capacidad de captura en gramos de CO_2 por gramo de adsorbente (expresado como $gr_{CO2}/gr_{adsorbente}$).

A partir de este momento, se inicia la regeneración del material. Para ello, se cambia la atmósfera a N_2 para desorber el CO_2 y se inicia la pérdida de masa cuando el CO_2 es liberado. La etapa de regeneración del material se lleva a cabo aumentando la temperatura en atmósfera inerte. La masa en este momento disminuye, indicando que el material es reutilizable.

Por tanto, el estudio de las curvas termogravimétricas indica cuánto CO_2 puede adsorber el material, cual es la cinética de esa adsorción y cuantos ciclos nos permite el material para la captura de CO_2.

En este estudio, se realizaron los ensayos para el material seleccionado en 5 ciclos de adsorción-desorción representativos en atmósfera al 2% CO_2 (Figura 25).

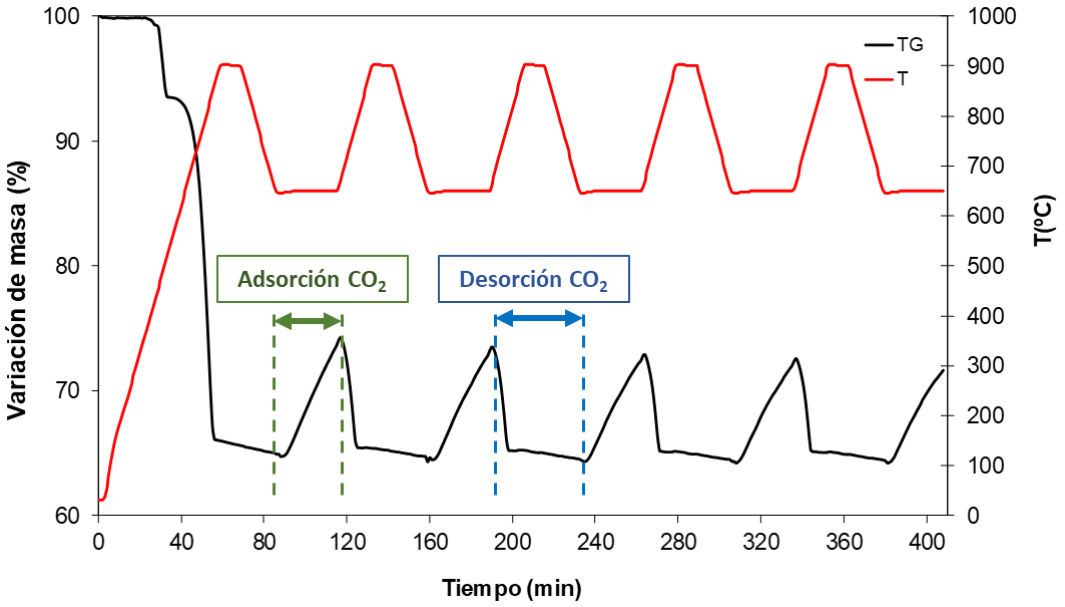


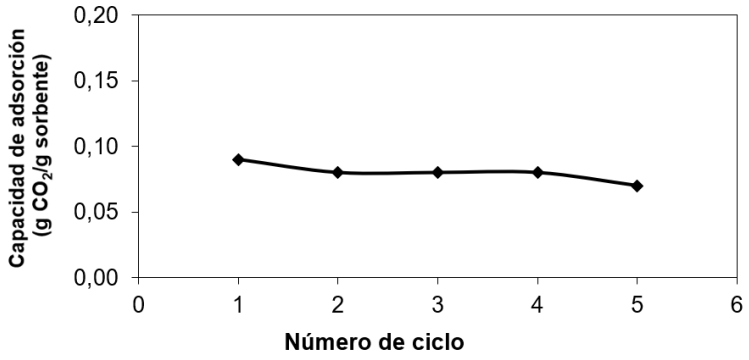
Figura 25: Análisis termogravimétrico de 5 ciclos en atmósferas de N_2 y 2%CO_2.

© ITC-AICE 2025

Con los resultados obtenidos de la ganancia de masa, se puede calcular la capacidad de adsorción de CO_2, que indica la masa de CO_2 retenida por unidad de masa del material adsorbente.

A continuación, se muestra la capacidad de adsorción o de captura de CO_2 con los ciclos a los que ha sido sometido la muestra.

Como podemos ver en la Figura 26, el material pierde un poco de eficacia tras un ciclo de captura, pero se mantiene constante los siguientes ciclos hasta que vuelve a bajar en el último ciclo. No obstante, la pérdida de eficacia es baja y sólo disminuye la captura en 0,02 unidades de adsorción en gramos de CO_2 por gramo de adsorbente.



CICLO	Captura CO_2 (g CO_2/g sorbente)
Ciclo 1	0,09
Ciclo 2	0,08
Ciclo 3	0,08
Ciclo 4	0,08
Ciclo 5	0,07

Figura 26: *Capacidad de adsorción para un proceso de 5 ciclos.*

Este resultado muestra una capacidad de captura mínima en los 30 minutos de adsorción correspondiente a 2,04 mmol CO_2/g adsorbente (es decir, 0,09 g CO_2/g adsorbente) si utilizamos una composición al 2% de CO_2. Si el tiempo del ensayo es más largo, la cantidad de CO_2 capturado aumentaría hasta alcanzar los valores indicados en la bibliografía.

Si en lugar de tener una composición al 2% aumentamos la concentración de CO_2 hasta el 15%, la capacidad de adsorción mínima en los primeros 30 minutos de la prueba aumenta hasta valores de 7,73 mmol CO_2/ g adsorbente (0,34 g CO_2/g adsorbente), muy cercano a valores de bibliografía de este informe (8 -15 mmol CO_2/g adsorbente).[36]

Por tanto, los ensayos realizados muestran la validez del material para la captura de CO_2 a bajas concentraciones, aunque no se ha alcanzado la máxima capacidad de captura por las condiciones particulares del ensayo realizado, ya que este ensayo se ha llevado a cabo durante un periodo de captura de 30 minutos y el material podría seguir capturando CO_2 hasta saturación de la superficie del adsorbente.

A nivel industrial, y para la estimación del coste del material, se considera más adecuado utilizar valores mayores de adsorción a los obtenidos en el laboratorio por las razones expuestas. Por tanto, teniendo en cuenta que el material es apto para capturar CO_2 a concentraciones del 2% con tiempos de captura adecuados (cinética rápida), el cálculo económico de los costes de captura referentes al material (apartado 7.3) se realizará aplicando valores de captura obtenidos de referencias bibliográficas, puesto que el material podrá capturar CO_2 hasta saturación de la superficie adsorbente y alcanzaríamos la captura máxima en concentraciones del 2% CO_2. Estos valores máximos de captura están situados entorno a 15 mmol CO_2/g adsorbente para los materiales basados en óxidos metálicos.

© ITC-AICE 2025

7.2. Estudio de validación de captura de CO_2 de la zeolita comercial.

Los ensayos se han realizado con una zeolita comercial utilizada habitualmente para la adsorción de CO_2 en la industria, que es considerada como el material de referencia en todos los estudios de captura de CO_2. En este trabajo se ha establecido una temperatura inicial de 40ºC como temperatura de trabajo para poder comparar los resultados obtenidos con los datos publicados en bibliografía.

La Figura 27 muestra el aspecto del material comercial que se presenta en esferas con un área específica superficial de 409 m^2/g. Los valores habituales para este material son del rango de 400-800 m^2/g.

Figura 27: Zeolita comercial.

Para el estudio de la capacidad de captura de CO_2 de la zeolita, tal como se ha comentado anteriormente, los ensayos realizados siguieron la metodología basada en análisis termogravimétricos.[134]

La muestra comercial de zeolita para los análisis se secó en estufa de laboratorio a 110ºC y, previamente a la realización del ensayo, se enfrió en un desecador para su acondicionamiento a temperatura ambiente, evitando así que se adsorban gases del ambiente (H_2O, CO_2 ambiental, entre otros) en la superficie de la zeolita, que nos llevaría a resultados erróneos en el ensayo a realizar.

Los ensayos realizados con la zeolita se realizaron en un crisol de platino teniendo en cuenta las etapas del ciclo térmico seleccionadas y diseñadas acorde a las características del material, evitando su descomposición térmica, y permitiendo explorar toda su capacidad de adsorción de CO_2 en concentraciones del 2%. Las etapas del ciclo térmico seleccionadas para este material se establecen a una temperatura de 40ºC como punto de partida para para los ciclos de adsorción de CO_2 y se va a ir subiendo progresivamente hasta los 200ºC para los ensayos de captura.

Para la realización de los ensayos, se ha seguido el mismo procedimiento descrito en el apartado anterior para el material basado en óxidos metálicos, consistente 5 ciclos consecutivos de adsorción-desorción. Cada uno de los ciclos llevados a cabo, permite conocer la ganancia de peso de la muestra al adsorber CO_2 en los poros del material y determinar su capacidad de captura en peso.

Los resultados obtenidos tras la realización de cinco ciclos de adsorción en atmósfera de 2% CO_2 se muestran en la Figura 28.

© ITC-AICE 2025

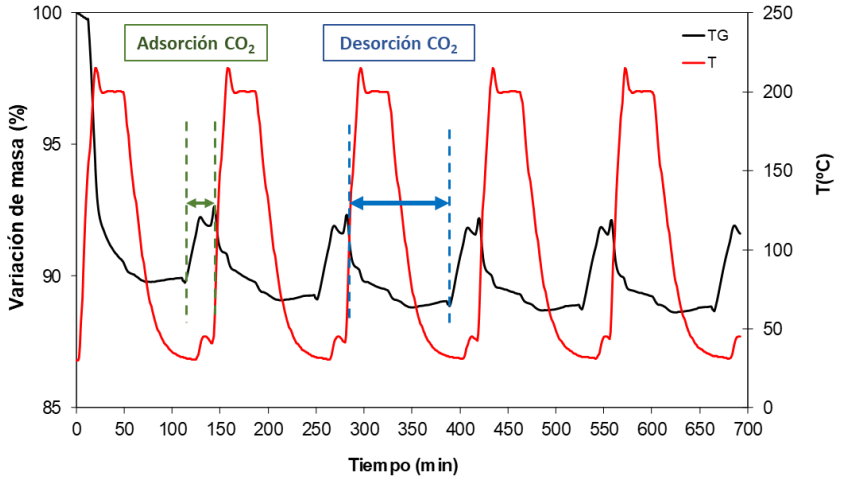
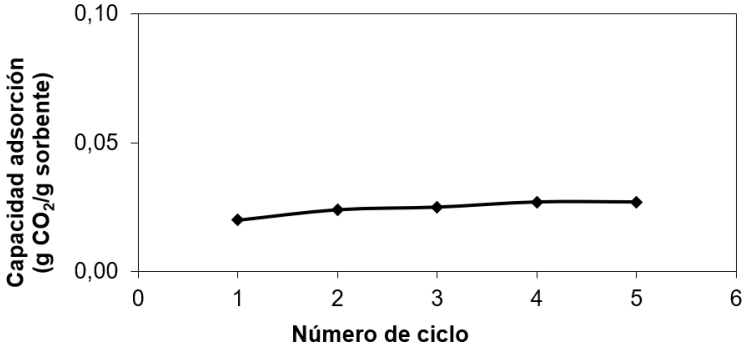


Figura 28: *Análisis termogravimétrico de 5 ciclos en atmósferas de N_2 y 2%CO_2.*

Tal y como se observa en Figura 29, tras los 5 ciclos de adsorción, el material sigue teniendo capacidad de captura de CO_2 sin pérdida de actividad y manteniendo constante su eficacia. Se aprecia la capacidad de regeneración y cómo se mantiene la capacidad de adsorción en varios ciclos de captura-desorción de la zeolita comercial.



CICLO	Captura CO_2 (g CO_2/g zeolita)
Ciclo 1	0,02
Ciclo 2	0,02
Ciclo 3	0,03
Ciclo 4	0,03
Ciclo 5	0,03

Figura 29: Capacidad de adsorción para un proceso representativo de 5 ciclos

Con los resultados obtenidos de la ganancia de masa, se calcula la capacidad de adsorción en la captura de CO_2 utilizando zeolita en las condiciones de trabajo establecidas.

Los resultados obtenidos muestran una adsorción de 0,03 $g_{CO2}/g_{zeolita}$ (es decir, 0,68 mmol CO_2/g zeolita) como resultado de adsorción mínima para la zeolita en las condiciones de trabajo establecidas. Según bibliografía, los datos de absorción para zeolitas tienen resultados en el rango de 0,5 - 3 mmol/g, puesto que a esta presión parcial los resultados limitan la cantidad capturada.[135]

Como en el caso anterior, los ensayos realizados muestran la validez del material para la captura de CO_2 a bajas concentraciones (2% CO_2), aunque no se ha alcanzado la máxima capacidad de captura debido a las condiciones particulares del ensayo realizado (tiempo de adsorción de 30 minutos). Si se ampliara el tiempo de captura, el material es capaz de

[135] Jinbao Liu, Xianzhi Sun, Na Li, Tiantian Tan, Fen Zhang, Min Sun & Qian Liu. *Effect of synthesis conditions on the properties of 13X zeolites for CO2 adsorption*. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2024, 36, 1, 2387683. DOI: 10.1080/26395940.2024.2387683.

© ITC-AICE 2025

capturar CO_2, a presiones de trabajo adecuadas, hasta saturación de los poros del mismo (adsorción por fisisorción).

Del mismo modo, a nivel industrial, y para la estimación del coste del material, se considera más adecuado utilizar valores mayores de adsorción de bibliografía a los obtenidos en el laboratorio por las razones expuestas. Se considerarán para el cálculo económico los valores obtenidos de referencias bibliográficas (3 mmol/g).

7.3. Análisis tecno-económico de captura de CO_2 en la industria cerámica.

Una vez analizados los dos materiales seleccionados en condiciones de laboratorio, con los resultados obtenidos, se plantea realizar una extrapolación a una instalación de captura a escala industrial.

El coste industrial de la zeolita varía según el formato (pellets, polvo o esferas), la pureza y el volumen de compra, siendo los rangos de precios entre 1.200 – 1.800 €/tonelada de este material.[136] Por otra parte, el coste del material basado en óxido de calcio utilizado en los ensayos se sitúa en el rango entre 300 - 800 €/tonelada.

Con estos valores, se calcula a continuación el coste que supondría la captura de 1 tonelada de CO_2 utilizando ambos materiales, considerando únicamente el coste del material, sin incluir los costes energéticos derivados de la regeneración del material adsorbente y otros costes de OPEX.

- **Materiales basados en óxidos metálicos.**

Para la captura de 1 tonelada de CO_2 utilizando materiales basados en óxidos metálicos, como el óxido de calcio analizado en este trabajo, se requiere de 1,7 toneladas de material debido a la estequiometria de la reacción y a factores prácticos como la pureza del adsorbente, la eficacia de la reacción y las pérdidas mecánicas y operativas del sistema.

Por otra parte, es importante destacar que el proceso de carbonatación-calcinación para estos materiales permite su regeneración. Los estudios indican que estos materiales se pueden mantener hasta 50 ciclos con buena eficiencia, aunque pueden aguantar cientos de ciclos, pero la conversión se reduce progresivamente con los ciclos debido a la sinterización que sufre el material.

En esta aplicación, se consideran 50 ciclos de trabajo previo a la sinterización y pérdida sustancial de reactividad, aunque con estrategias de rehidratación del material y control de la temperatura de calcinación (550ºC), se podría mejorar este límite.

La Tabla 15 muestra cuál sería el coste efectivo de capturar una tonelada de CO_2 con este material, considerando su capacidad de captura de CO_2, la estequiometría de la reacción de captura y la cantidad de ciclos que es posible reutilizar el material.

136 https//www.chinazeolite.net/sale-41099231-naike-zeolite-molecular-sieve-13x-absorbent-for-gas-purifyair-separationh2s-co2-removal.html

© ITC-AICE 2025

Tabla 15: Coste del óxido de calcio para la captura de 1 t de CO_2 presente en concentraciones del 2% en corrientes de combustión.

Material	Capacidad de captura (mmol/g)	Capacidad de captura (g/g)	Toneladas necesarias	Coste inicial (€)	Ciclos máximos	Coste efectivo (€/t CO_2/ciclo)
Óxidos metálicos	15	0,70	1,7	300-800	50	10,2 – 27,2

Los resultados obtenidos indican que, aunque los materiales basados en óxidos metálicos tienen un coste inicial bajo, el coste efectivo para la captura de 1 tonelada de CO_2 se sitúa en un rango entre 10,2 y 27,2 €/t CO_2 para 50 ciclos de trabajo.

Además del coste del material, el proceso de captura de CO_2 con óxido de calcio implica elevar la temperatura de los gases hasta la temperatura a la que se produce la reacción de adsorción (650 º C), así como realizar la desorción a elevada temperatura (900 º C).

La ventaja de este sistema es el bajo coste inicial del material, y poder tratar los gases eliminando únicamente el azufre, pero presenta el inconveniente de las elevadas temperaturas de reacción, así como el bajo número de ciclos que se puede utilizar el material.

- **Zeolita comercial.**

Para el caso de la zeolita, la captura de CO_2 es física, por lo que la capacidad típica de sorción se calcula en función de los resultados experimentales para la presión parcial de CO_2 que se requiera capturar y en las condiciones establecidas de regeneración.

En aplicaciones industriales, se ha publicado que el material soporta cientos de ciclos si se evita contaminación con humedad excesiva. La zeolita puede superar los 1000 ciclos en condiciones óptimas, lo que la hace ideal para procesos continuos.

La adsorción física de la zeolita es muy sensible a la temperatura. Si la temperatura de los gases es 150 ºC, la capacidad de captura es mucho menor que si están a 40 º C. Por tanto, si los gases se enfrían es posible reducir la cantidad necesaria de zeolita para capturar la misma cantidad de CO_2. En la Tabla 16 se muestra la diferencia entre la capacidad de captura de CO_2 de la zeolita a 40 ºC y a 150 ºC, así como la cantidad que haría falta en cada situación para la captura de una tonelada de CO_2 y el coste asociado.

Tabla 16: Coste de la zeolita para captura de CO_2 aplicables a industria cerámica.

Material	Condiciones	Capacidad de captura (mmol/g)	Capacidad de captura (g/g)	Toneladas necesarias	Coste medio aproximado (€)
Zeolita	40 °C, 2% CO_2	2,0	0,088	11,36 t	17.000 €
Zeolita	150 °C, 2% CO_2	0,5	0,022	45,45 t	68.000 €

De los datos anteriores se desprende que la elevada temperatura de los gases en la salida de los hornos y secaderos del sector cerámico sería un inconveniente para el empleo de zeolita, y que de mantenerse esa temperatura no sería posible utilizar este material, por los elevados costes asociados.

© ITC-AICE 2025

Por tanto, si se plantea el empleo de zeolitas, es necesario enfriar los gases para así facilitar la captura de CO_2 con este material. Además, el empleo de zeolitas requeriría una etapa previa de pretratamiento de gases para eliminar vapor de agua, ácidos y compuestos de nitrógeno.

Considerando una temperatura de trabajo de 40 ºC, la Tabla 17 muestra cuál sería el coste efectivo de capturar una tonelada de CO_2 con este material, considerando su capacidad de captura de CO_2, y los ciclos máximos permitidos de reutilización para estos materiales

Tabla 17: Coste de la zeolita para la captura de 1 t de CO_2 presente en concentraciones del 2% en corrientes de combustión.

Material	Capacidad de captura (mmol/g)	Capacidad de captura (g/g)	Toneladas necesarias	Coste inicial (€)	Ciclos máximos	Coste efectivo (€/t CO_2/ciclo)
Zeolita	2,0	0,088	11,36	17.000	1.000	17

Aunque la inversión inicial en zeolita es mucho mayor, su larga vida útil hace que el coste por tonelada capturada sea competitivo (17 €).

Como conclusiones de este estudio prospectivo, atendiendo exclusivamente al precio del material, las diferencias no son significativas.

Este estudio determina que los óxidos metálicos son mucho más económicos ya que requieren menos masa de material al reaccionar químicamente con el CO_2. Por otra parte, las zeolitas requieren una inversión inicial más alta, y su desempeño es altamente dependiente de la temperatura, por lo que es recomendable realizar el enfriamiento de los gases de combustión hasta su temperatura óptima de trabajo (40 º C).

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis realizado explora el papel clave de la captura de CO_2 en la descarbonización industrial, con un enfoque particular en la química que sustenta estas tecnologías. La captura de CO_2 ofrece un conjunto de tecnologías maduras y en desarrollo que pueden adaptarse a procesos industriales existentes, con potenciales de mitigación de CO_2 que van desde un 25% hasta más del 90%, dependiendo de las condiciones del proceso y la tecnología seleccionada.

Muchas de estas tecnologías ya utilizan materiales que son capaces de capturar CO_2 incluso a concentraciones de 400 ppm (0,04 %) y han sido implantadas industrialmente (tecnologías de captura de CO_2 del aire).

Las principales **conclusiones** sobre los materiales para captura de CO_2 en entornos industriales cerámicos analizados en este informe son:

- Se considera clave y estratégico el desarrollo de materiales más eficientes, económicos y sostenibles para su aplicación en industrias con emisiones de CO_2 en bajas concentraciones, y a temperaturas situadas en el intervalo entre 90 - 200 º C, tales como la industria cerámica.

© ITC-AICE 2025

- El rendimiento en la captura de CO_2 no depende únicamente del material adsorbente utilizado, es importante integrar adecuadamente el tipo de adsorbente con el diseño del reactor y la estrategia de regeneración.
- Es imprescindible abordar proyectos de demostración en entornos reales industriales (gases a temperatura, con humedad y contaminantes) y realizar estudios tecno-económicos para facilitar la implementación industrial.

- Materiales como las zeolitas requieren de un pretratamiento de gases para eliminar el vapor de agua y el azufre contenido en los gases industriales. Otros materiales como algunos MOF o los óxidos metálicos muestran mejores tolerancias a la presencia de agua y contaminantes en los gases, aunque sigue siendo recomendable este proceso de depuración de los gases previo a la captura de CO_2 para aumentar la durabilidad del material. En cualquier caso, es necesario un pretratamiento de gases diseñado de manera específica para cada corriente de combustión particular y cada material adsorbente.
- Entre los materiales estudiados, atendiendo exclusivamente al precio del material, las diferencias no son significativas.

Las principales **recomendaciones** para la implementación de tecnologías de captura de CO_2 para postcombustión empleando adsorbentes sólidos en la industria cerámica, teniendo en cuenta la baja concentración de CO_2 en los gases y temperaturas de los gases de chimenea entorno a 150 º C son las siguientes:

- **Priorizar tecnologías postcombustión adaptadas a bajas concentraciones de CO_2.** Dado que los gases de combustión cerámicos contienen CO_2 en concentraciones típicamente entre el 1 –5 %, se recomienda el uso de materiales con alta selectividad en condiciones diluidas, como zeolitas, óxidos metálicos o sorbentes líquidos funcionalizados en soportes sólidos formulados para ambientes industriales.
    - Ciertos MOFs comerciales (ej. CALF-20) son materiales prometedores, aunque todavía muy caros para su aplicación industrial.

- **Seleccionar materiales resistentes a contaminantes ácidos.** La presencia de ciertos contaminantes (SO_2, HF, HCl) y partículas puede comprometer la estabilidad de los materiales adsorbentes. Se recomienda emplear tecnologías que hayan demostrado tolerancia a estos compuestos, como los materiales de óxidos metálicos, ciertos MOFs hidrofóbicos o bien invertir sistemas de pretratamiento de gases que evite gastos innecesarios en reemplazo de materiales de captura.

- **Evaluar la integración energética del sistema de captura.** La regeneración de los materiales adsorbentes puede requerir calor o presión. Se recomienda estudiar la posibilidad de integrar el sistema de captura con la recuperación de calor de los hornos cerámicos para mejorar la eficiencia energética global.

- **Realizar pruebas piloto en condiciones reales de emisión.** Antes de la implementación a escala industrial, se recomienda realizar ensayos en laboratorio y planta piloto para validar el comportamiento de los materiales en

© ITC-AICE 2025

condiciones reales de operación, incluyendo variabilidad de flujo, temperatura y composición de gases.

- **Considerar soluciones modulares y escalables.** Dado el carácter descentralizado de muchas instalaciones cerámicas, se recomienda optar por tecnologías modulares que puedan adaptarse a distintos tamaños de planta y facilitar su replicabilidad.

- **Explorar sinergias con otras tecnologías de descarbonización.** La captura de CO_2 puede combinarse con estrategias de electrificación, eficiencia energética o valorización del CO_2 capturado en productos cerámicos, lo que puede mejorar la viabilidad técnica y económica del conjunto.

© ITC-AICE 2025

9. ANEXOS.

9.1. Información adicional de materiales de captura de CO_2.

Tabla 18: Adsorción de CO_2 con materiales soportados y condiciones de captura descritas en trabajos bibliográficos.

Tipo de Material Adsorbente	Descripción	Soportes / Estructura	Funcionalización	Ventajas	Desventajas
Aminas Soportadas	Grupos amina inmovilizados en soportes sólidos. Prometedores para captura de CO_2 a baja temperatura.	Sílices (SiO_2), alúminas (Al_2O_3), óxidos de titanio (TiO_2), zeolitas, polímeros porosos.	Aminas primarias, secundarias o terciarias; unidas covalentemente o impregnadas.	Alta capacidad de captura si existe una buena interacción química entre soporte y amina.	Posible degradación por oxígeno, necesidad de regeneración energética.
MOFs (Redes Metal-Orgánicas)	Materiales cristalinos con alta área superficial y porosidad ajustable.	Formados por iones metálicos unidos a ligandos orgánicos. Porosidad y topología ajustables.	Grupos amina u otros grupos básicos en ligandos.	Alta selectividad, buena capacidad de adsorción, regeneración eficiente.	Estabilidad hidrotérmica limitada, coste elevado.
Sorbentes basados en carbono	Incluyen carbón activado, nanotubos de carbono, grafeno funcionalizado. Basados en fisisorción.	Estructuras de carbono microporosas.	Grupos amina, impregnación con hidróxidos alcalinos (ej. KOH) aumentan quimisorción.	Bajo coste, alta estabilidad mecánica y térmica, posibilidad de uso de residuos como precursores (economía circular).	Menor capacidad de adsorción comparado con aminas soportadas.

© ITC-AICE 2025

Tabla 19: Coste efectivo estimado de la captura mediante adsorción de CO_2 con distintos materiales descritos en este informe.

Material	Capacidad de captura (mmol/g)	Capacidad de captura (g/g)	Toneladas necesarias	Coste captura* (€)	Ciclos máximos	Coste efectivo* (€/t CO_2/ciclo)
Zeolita	2,0	0,088	11,36	17.000	1.000	17
MOF	1,8	0,079	12,66	25.316	450.000	0,056
Carbones activados	0,8	0,035	28,57	42.857	1.000	42,86
Resinas amínicas	3,0	0,130	7,69	23.077	5.000	4,62
Aminas funcionalizadas	4,0	0,180	5,56	19.444	5.000	3,89
$Ca(OH)_2$	13,4	0,590	1,69	339	50	6,78
CaO	18,0	0,790	1,27	228	50	4,56

*Los precios son orientativos para compras a nivel laboratorio. Estos precios serán más bajos cuando se compren materiales a granel en escala de toneladas.

© ITC-AICE 2025

El presente informe nº C253143 expedido a petición de la firma ASCER - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE AZULEJOS Y PAVIMENTOS CERÁMICOS, consta de una portada y 66 páginas.

Castellón, 09 de diciembre de 2025

DOCUMENTO CERTIFICADO DIGITALMENTE

Para comprobar la validez e integridad de este informe, puede pulsar aquí.
Si la validez aparece como DESCONOCIDA, por favor, siga los pasos del documento 'Instrucciones firma electrónica'.
Toda reproducción en papel se considera copia.

Dra. Mónica Viciano Miralles
Investigadora del Área de Sostenibilidad
Síntesis Química a partir de CO_2

Cláusulas de responsabilidad

Los resultados, conclusiones y/o recomendaciones contenidas en este informe sólo se refieren al material sometido a ensayo y/o a la información suministrada por el peticionario.

No se admite ninguna responsabilidad referente a la exactitud y representatividad del muestreo a menos que éste haya sido efectuado bajo nuestra propia supervisión. Salvo mención expresa, las muestras y sus referencias han sido elegidas libremente por el peticionario.

Reservados todos los derechos. El contenido de este informe goza de la protección que le otorga la ley. No podrá ser comunicado, transformado, reproducido o distribuido públicamente en todo o en parte, sin la autorización expresa del Instituto de Tecnología Cerámica - AICE. La distribución de este informe solamente está autorizada para el envío puntual y no masivo a clientes y/o proveedores del peticionario, con el único objetivo de informar y siempre citando la autoría del Instituto de Tecnología Cerámica –AICE.

El Instituto de Tecnología Cerámica - AICE no se hace responsable del uso que el peticionario u otra persona o entidad haga de los datos o indicaciones contenidos en el presente informe, en perjuicio o en beneficio de las marcas comerciales que el peticionario haya podido citar como identificación de las muestras sometidas a estudio.

Este informe tiene carácter exclusivamente comercial y no podrá ser utilizado en cualquier procedimiento judicial o administrativo, ni como dictamen pericial ni como prueba documental, salvo autorización expresa del Instituto de Tecnología Cerámica - AICE. La autorización por parte de ITC-AICE estará condicionada, cuando así se requiera, al abono por parte del cliente, incluso con carácter previo, de los fondos necesarios para cubrir los gastos asociados a la defensa de este informe. ITC-AICE se reserva el derecho de tomar las oportunas acciones legales en caso de incumplimiento de esta cláusula.

El Instituto de Tecnología Cerámica - AICE podrá incluir en sus informes análisis, comentarios o cualquier otra valoración que juzgue necesaria, aun cuando ésta no hubiese sido expresamente solicitada.

El Instituto de Tecnología Cerámica - AICE se compromete a respetar estrictamente el carácter confidencial de los datos y resultados obtenidos en este informe. En caso de ser requerido por ley o autorizado por disposiciones contractuales para revelar información confidencial, el Instituto de Tecnología Cerámica – AICE planotificará al cliente la información proporcionada, salvo que esté prohibido por ley.

© ITC-AICE 2025