

ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA DE CAPTURA DE CO₂ MEDIANTE
ADSORBENTES SÓLIDOS A PARTIR DE EMISIONES POR DESCOMPOSICIÓN
TÉRMICA

LEONARDO RUBIEL ORJUELA VELA
OSCAR JAVIER MARIÑO BELTRÁN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
AÑO 2026

ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA DE CAPTURA DE CO₂ MEDIANTE
ADSORBENTES SÓLIDOS A PARTIR DE EMISIONES POR DESCOMPOSICIÓN
TÉRMICA

LEONARDO RUBIEL ORJUELA VELA
OSCAR JAVIER MARIÑO BELTRÁN

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

Walter Pardavé Livia

Magister en Ingeniería, Master en Ecoauditorías

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
AÑO 2026

DEDICATORIA

Yo, Javier Mariño, dedico este trabajo de grado a mi señora madre, Lux Beltrán, por su amor, apoyo y esfuerzo incondicional a lo largo de mi formación, así como a mis hermanas, Camila y Fernanda, por su compañía y motivación constante. De igual manera, a mis amigos de la universidad, quienes hicieron parte fundamental de este proceso y contribuyeron a mi crecimiento personal y académico.

Yo, Leonardo Rubiel Orjuela Vela, dedico este trabajo de grado a mi madre, Rosalba Vela Huertas, quien, desde mi infancia, sola y sin más recursos que su amor incondicional y su incansable esfuerzo, logró brindarme la educación que hoy me permite llegar hasta este momento. Su sacrificio y fortaleza fueron el pilar fundamental de todo lo que soy y he logrado.

A mis hermanos, Dayan Katherine Orjuela Vela, Brayan Fernando Orjuela Vela y Liseth Daniela Orjuela Vela, por su apoyo constante, su comprensión y su cariño inagotable. Sin ustedes a mi lado, este camino habría sido mucho más difícil de recorrer.

A Marina Cárdenas, Gonzalo Jaimes y todos aquellos quienes me brindaron su apoyo incondicional, su confianza y motivación constante para impulsarme a seguir adelante, incluso en los días más difíciles. Gracias por creer en mí y por recordarme que valía la pena continuar.

A Paula Acuña, porque cuando había dejado atrás el camino del estudio apareció en mi vida y me ayudo a reencontrarme con él. Lo que comenzó como un encuentro en el trabajo se convirtió en una historia de apoyo e inspiración. Gracias por creer en mí, impulsarme a continuar y seguir adelante, acompañándome en cada paso de este logro. Esta tesis también es tuya.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de tesis, el MSc. Walter Pardavé, por su valiosa orientación, constante acompañamiento y disposición a lo largo de todo el proceso investigativo. Su experiencia, paciencia y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo y consolidación de este trabajo, brindándonos las herramientas necesarias para abordar cada una de las etapas con criterio y rigurosidad.

De igual manera, extendemos nuestro agradecimiento al ingeniero Nehimes Castro, por su apoyo en el desarrollo experimental. Sus aportes, sugerencias y determinación continua, determinaron la correcta ejecución de las actividades experimentales y el fortalecimiento de los resultados obtenidos.

A ambos, les agradecemos profundamente su disposición permanente para atender nuestras inquietudes y guiarnos en momentos clave del proyecto, contribuyendo significativamente a la culminación satisfactoria de este trabajo de grado.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 CAPTURA DE CO ₂	15
2.2 ZEOLITA.....	16
2.3 CARBON ACTIVADO.....	17
2.4 BIOCHAR.....	17
2.5 ESTADO DEL ARTE.....	18
3. METODOLOGÍA	21
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	22
3.2.1 <i>Obtención del biochar</i>	22
3.2.2 <i>Molienda de la zeolita</i>	22
3.2.3 <i>Tamizado</i>	24
3.2.4 <i>Peletización</i>	25
3.2.5 <i>Secado</i>	26
3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE COLUMNA DE ADSORCIÓN.....	26
3.3.1 <i>Componentes</i>	27
3.3.2 <i>Funcionamiento</i>	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 CALCULO DE CO ₂ TEORICO.....	29
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	29
4.3 EFICIENCIAS DE CAPTURA.....	30
4.4 DISCUSION DE RESULTADOS.....	31
5. CONCLUSIONES	34
6. RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXOS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma general de la metodología experimental.....	21
Figura 2. Trituración en molino de bolas de la zeolita.	23
Figura 3. Extracción de la zeolita reducida de tamaño.....	23
Figura 4. Tamizado utilizando malla número 50.....	24
Figura 5. Proceso de peletización manual.	25
Figura 6. Secado en horno.....	26
Figura 7. Montaje experimental del sistema de captura de CO ₂	27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Masa de CO ₂ capturada por los adsorbentes evaluados.	30
Tabla 2. Eficiencia de captura de CO ₂ de los adsorbentes evaluados.	31

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Caracterización visual de la zeolita empleada como adsorbente.	38
Anexo B. Registro fotográfico del montaje experimental de captura de CO ₂	38
Anexo C. Registro de masa inicial: Carbón activado antes de captura de CO ₂	39
Anexo D. Registro de masa final: Carbón activado después de captura de CO ₂	39
Anexo E. Registro de masa inicial: Zeolita antes de captura de CO ₂	40
Anexo F. Registro de masa final: Zeolita después de captura de CO ₂	40
Anexo G. Registro de masa inicial: Biochar antes de captura de CO ₂	41
Anexo H. Registro de masa final: Biochar después de captura de CO ₂	41
Anexo I. Registro de masa de columna vacía del sistema experimental.	42

GLOSARIO

ADSORBENTE: Material sólido con propiedades superficiales y estructurales que permiten retener selectivamente moléculas de una fase mediante procesos de adsorción.

ADSORCIÓN: Fenómeno físico-químico mediante el cual moléculas de un gas o líquido se adhieren a la superficie de un sólido.

BIOCHAR: Material carbonoso obtenido a partir de biomasa en condiciones controladas y ausencia de oxígeno.

CAPTURA DE CO₂: Proceso mediante el cual el dióxido de carbono presente en una corriente gaseosa es separado y retenido antes de ser liberado a la atmósfera.

CARBÓN ACTIVADO: Material adsorbente de origen carbonoso con alta área superficial y microporosidad.

DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA: Proceso en el que una sustancia se descompone químicamente por aplicación de calor.

EFICIENCIA: Relación entre la cantidad de CO₂ retenida por un adsorbente y la cantidad total de CO₂ generada.

EMISIONES: Corrientes gaseosas generadas del resultado de procesos de combustión.

FISISORCIÓN: Adsorción caracterizada por interacciones débiles, como fuerzas de Van der Waals, que permite la reversibilidad del proceso.

PIRÓLISIS: Descomposición de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno.

SELECTIVIDAD: Capacidad de un adsorbente para retener preferencialmente una especie química específica frente a otras en la corriente gaseosa.

ZEOLITA: Material cristalino con aluminosilicatos de estructura microporosa ordenada.

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA DE CAPTURA DE CO₂ MEDIANTE ADSORBENTES SÓLIDOS A PARTIR DE EMISIONES POR DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA

AUTOR: LEONARDO RUBIEL ORJUELA VELA, OSCAR JAVIER MARIÑO BELTRÁN

PALABRAS CLAVE: CAPTURA DE CO₂, ADSORBENTES SÓLIDOS, ZEOLITA, BIOCHAR, CARBÓN ACTIVADO

DESCRIPCIÓN: El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar comparativamente la eficiencia de captura de dióxido de carbono (CO₂) de tres adsorbentes sólidos: zeolita, biochar y carbón activado, empleando como fuente de emisión el CO₂ generado por descomposición térmica del bicarbonato de sodio (NaHCO₃). La metodología incluyó la preparación previa de los adsorbentes mediante procesos de molienda, tamizado, preparación de pellets y secado, así como el diseño y montaje de un sistema experimental compuesto por una fuente de generación de CO₂, un sistema de conducción gaseosa y una columna de adsorción. El ensayo se realizó a las siguientes condiciones: Temperatura 150 °C. y Tiempo 30 minutos. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los materiales evaluados. La zeolita presentó la mayor eficiencia de captura, con un valor de 29.39 % y una masa retenida de 0.77 g de CO₂. El biochar registró una eficiencia de 7.63 % y una captura de 0.20 g, mientras que el carbón activado mostró el menor desempeño, con una eficiencia de 0.38 % y una masa capturada de 0.01 g. Se concluye que la zeolita fue el adsorbente más eficiente bajo las condiciones experimentales establecidas, evidenciando su mayor afinidad por el CO₂ frente a los demás materiales estudiados.

* Tesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química. Director: Walter Pardavé Livia. Magister en Ingeniería, Master en Ecoauditorías. Codirector: Pedro Luis Delvasto Angarita. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

ABSTRACT

TITLE: COMPARATIVE ANALYSIS OF CO₂ CAPTURE EFFICIENCY USING SOLID ADSORBENTS FROM THERMAL DECOMPOSITION EMISSIONS

AUTHOR: LEONARDO RUBIEL ORJUELA VELA, OSCAR JAVIER MARIÑO BELTRÁN

KEY WORDS: CO₂ CAPTURE, SOLID ADSORBENTS, ZEOLITE, BIOCHAR, ACTIVATED CARBON

DESCRIPTION: This research aimed to comparatively evaluate the carbon dioxide (CO₂) capture efficiency of three solid adsorbents: zeolite, biochar, and activated carbon, using CO₂ generated by the thermal decomposition of sodium bicarbonate (NaHCO₃) as the emission source. The methodology included the prior preparation of the adsorbents through milling, sieving, pelleting, and drying processes, as well as the design and assembly of an experimental system consisting of a CO₂ generation source, a gas delivery system, and an adsorption column. The test was conducted under the following conditions: Temperature 150 °C and Time 30 minutes. The results showed significant differences among the materials evaluated. Zeolite exhibited the highest capture efficiency, with a value of 29.39% and a retained mass of 0.77 g of CO₂. Biochar registered an efficiency of 7.63% and a capture of 0.20 g, while activated carbon showed the lowest performance, with an efficiency of 0.38% and a captured mass of 0.01 g. It is concluded that zeolite was the most efficient adsorbent under the established experimental conditions, demonstrating its greater affinity for CO₂ compared to the other materials studied.

* Thesis

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Chemical Engineering. Director: Walter Pardavé Livia. Master in Engineering, Master in Eco-audits. Co-director: Pedro Luis Delvasto Angarita. PhD in Materials Science and Technology.

INTRODUCCIÓN

El incremento sostenido de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y su relación con el cambio climático han impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a reducir su liberación a la atmósfera. En este contexto, la captura de CO₂ mediante adsorbentes sólidos ha adquirido especial interés por su potencial de separación, regeneración y aplicación en sistemas más eficientes desde el punto de vista energético. Entre los materiales más estudiados se encuentran la Zeolita, el Carbón Activado y el Biochar, debido a las propiedades de su textura, su afinidad por el CO₂ y sus posibilidades de aplicación en procesos de captura postcombustión y en corrientes gaseosas simuladas, según Soo et al.¹ y Ganiyu².

A pesar de los avances reportados en la literatura, el desempeño de los adsorbentes sólidos varía de manera significativa según su estructura porosa, su composición superficial, el método de preparación y las condiciones de operación, lo que dificulta establecer comparaciones directas entre materiales cuando los estudios se realizan bajo metodologías distintas. En particular, el Carbón Activado y el Biochar han mostrado potencial para la captura de CO₂, aunque su eficiencia depende en gran medida de procesos de activación y funcionalización; por su parte, la Zeolita destaca por su elevada selectividad en corrientes secas. En consecuencia, resulta pertinente desarrollar ensayos comparativos bajo condiciones homogéneas que permitan identificar, con base en balances de materia, el material con mejor desempeño frente a una corriente de CO₂

¹ SOO, X. Y. D., et al. Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. En: *Journal of CO₂ Utilization*. 2024. vol. 81, no. 102727. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>

² GANIYU, S. A. Review of zeolitic-based sorbents for CO₂ capture: Insights into functional modifications, economic feasibility and machine learning-enhanced strategies. En: *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. vol. 23, no. 100818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100818>

generada de forma controlada a partir de la descomposición térmica del NaHCO_3 como reportan Abuelnoor et al.³, Guo et al.⁴, Li et al.⁵ y Toan et al.⁶.

Bajo este enfoque, el presente trabajo se orienta a responder la siguiente pregunta: ¿Cuál de los adsorbentes seleccionados (Zeolita, Biochar y Carbón Activado) presenta la mayor eficiencia de captura de CO_2 bajo condiciones experimentales que simulan emisiones de CO_2 ?

³ ABUELNOOR, N., et al. Activated carbons from biomass-based sources for CO_2 capture applications. En: *Chemosphere*. 2021. vol. 282, no. 131111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>

⁴ GUO, S., et al. Recent advances in biochar-based adsorbents for CO_2 capture. En: *Carbon Capture Science & Technology*. 2022. vol. 4, no. 100059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100059>

⁵ LI, Z., et al. Washcoated zeolite structured adsorbents for CO_2 capture and recovery by rotary adsorption. En: *Carbon Capture Science & Technology*. 2025. vol. 16, no. 100378. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100378>

⁶ TOAN, S., et al. Thermodynamics of NaHCO_3 decomposition during Na_2CO_3 -based CO_2 capture. En: *Journal of Environmental Sciences*. 2019. vol. 78, pp. 74–80. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.07.005>

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de captura de CO₂ de distintos adsorbentes sólidos (Carbón Activado, Biochar y Zeolita) aplicados a emisiones de CO₂ por descomposición térmica, mediante balances de materia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la capacidad de captura de CO₂ de cada adsorbente bajo condiciones experimentales.

Comparar el desempeño de los diferentes adsorbentes, identificando el material más eficiente para la captura de CO₂.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CAPTURA DE CO₂.

La captura de CO₂ mediante adsorbentes sólidos constituye una de las alternativas más relevantes dentro de las tecnologías de mitigación de emisiones, debido a que combina eficiencia de separación, posibilidad de regeneración del material y uso de sólidos porosos con elevada afinidad por este gas. En este tipo de proceso, el CO₂ es retenido en la superficie del adsorbente por interacciones físicas o químicas, cuyo comportamiento depende de variables como el área superficial, la distribución de poros, la química de superficie y las condiciones de operación. La literatura reciente ubica a la adsorción como una de las rutas más prometedoras para el desarrollo de sistemas de captura más eficientes y sostenibles, de acuerdo con Soo et al.⁷.

En el marco de esta investigación, la generación de CO₂ a partir de la descomposición térmica del bicarbonato de sodio (NaHCO₃) resulta conceptualmente pertinente, ya que permite disponer de una fuente controlada de emisión gaseosa para evaluar el comportamiento de distintos adsorbentes bajo condiciones reproducibles. Desde el punto de vista teórico, la descomposición del NaHCO₃ hacia carbonato de sodio, agua y dióxido de carbono sustenta su empleo como sistema de liberación de CO₂ en estudios de captura y comparación de materiales adsorbentes, según Toan et al.⁸.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la adsorción de CO₂ puede explicarse por dos mecanismos principales: la fisisorción y la quimisorción. La primera se produce por

⁷ SOO, X. Y. D., et al. Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. En: *Journal of CO₂ Utilization*. 2024. vol. 81, no. 102727. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>

⁸ TOAN, S., et al. Thermodynamics of NaHCO₃ decomposition during Na₂CO₃-based CO₂ capture. En: *Journal of Environmental Sciences*. 2019. vol. 78, pp. 74–80. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.07.005>

fuerzas intermoleculares relativamente débiles y se favorece en materiales con elevada microporosidad; la segunda implica interacciones más intensas con grupos funcionales activos o sitios básicos presentes en la superficie del sólido. En adsorbentes carbonosos y biochars modificados, la eficiencia de captura suele aumentar cuando se desarrollan ultramicroporos y se incorporan grupos superficiales que incrementan la afinidad por el CO₂. En el caso de las zeolitas, además de la porosidad, también influyen la estructura cristalina, la relación Si/Al y la presencia de cationes en la red, factores que favorecen la selectividad hacia esta molécula, como describen Abuelnoor et al.⁹, Ganiyu¹⁰ y Guo et al.¹¹.

2.2 ZEOLITA.

La zeolita es un adsorbente con una estructura microporosa cristalina y ordenada ampliamente reconocida por su alta selectividad hacia el CO₂, especialmente en condiciones secas. Entre sus principales ventajas se encuentran su elevada porosidad, su estabilidad térmica y su capacidad de separación basada en tamizado molecular. No obstante, la bibliografía reciente también advierte limitaciones relacionadas con la sensibilidad a la humedad y con desafíos asociados al escalamiento y la aplicación industrial. En consecuencia, la zeolita se considera un material de referencia en la captura

⁹ ABUELNOOR, N., et al. Activated carbons from biomass-based sources for CO₂ capture applications. En: *Chemosphere*. 2021. vol. 282, no. 131111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>

¹⁰ GANIYU, S. A. Review of zeolitic-based sorbents for CO₂ capture: Insights into functional modifications, economic feasibility and machine learning-enhanced strategies. En: *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. vol. 23, no. 100818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100818>

¹¹ GUO, S., et al. Recent advances in biochar-based adsorbents for CO₂ capture. En: *Carbon Capture Science & Technology*. 2022. vol. 4, no. 100059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100059>

de CO₂, aunque su desempeño puede verse condicionado por las condiciones reales de operación, según Ganiyu¹².

2.3 CARBON ACTIVADO.

El carbón activado representa otra familia de adsorbentes de gran interés para la captura de CO₂. Su relevancia se asocia con su alta área superficial, su estabilidad térmica, su menor costo relativo y la posibilidad de producirse a partir de residuos lignocelulósicos u otras biomásas. Además, puede modificarse mediante activación física, activación química o funcionalización superficial, con el fin de optimizar su textura porosa y su afinidad por el CO₂. Por ello, la literatura lo reconoce no solo como un adsorbente competitivo, sino también como una plataforma versátil para mejorar capacidad y selectividad, como señalan Abuelnoor et al.¹³ y Mukherjee et al.¹⁴.

2.4 BIOCHAR.

El biochar, por su parte, es un material carbonoso obtenido por conversión termoquímica de biomasa en atmósfera limitada de oxígeno. Su importancia conceptual radica en que combina el potencial de captura de CO₂ con criterios de sostenibilidad, valorización de residuos y economía circular. Sin embargo, la bibliografía coincide en que el biochar sin modificación suele presentar un rendimiento inferior al de otros adsorbentes más

¹² GANIYU, S. A. Review of zeolitic-based sorbents for CO₂ capture: Insights into functional modifications, economic feasibility and machine learning-enhanced strategies. En: *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. vol. 23, no. 100818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100818>

¹³ ABUELNOOR, N., et al. Activated carbons from biomass-based sources for CO₂ capture applications. En: *Chemosphere*. 2021. vol. 282, no. 131111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>

¹⁴ MUKHERJEE, A., et al. Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. En: *Journal of Environmental Sciences*. 2019. vol. 83, pp. 46–63. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>

desarrollados, por lo que con frecuencia requiere procesos de activación o funcionalización para aumentar su área superficial, su microporosidad y la presencia de grupos activos. En ese sentido, el biochar se considera un adsorbente ambientalmente promisorio, cuyo desempeño depende en gran medida del precursor y del tratamiento aplicado, según Guo et al.¹⁵ y Zhang et al.¹⁶.

2.5 ESTADO DEL ARTE.

La literatura científica reciente sobre captura de CO₂ por adsorción evidencia un crecimiento sostenido y una diversificación importante de materiales adsorbentes, entre los que destacan las zeolitas, los carbones activados y los adsorbentes derivados de biomasa. Las revisiones más recientes coinciden en que no existe un adsorbente universalmente superior en todas las condiciones, ya que el desempeño depende de variables como temperatura, presión, humedad, concentración de CO₂, estructura del adsorbente y estrategia de regeneración. Por ello, el estado actual del conocimiento se orienta más a comparar familias de materiales y sus condiciones óptimas de trabajo que a establecer una jerarquía absoluta entre ellas, como indican Ganiyu¹⁷ y Soo et al.¹⁸.

En el caso de las zeolitas, la evidencia reciente mantiene la idea de que estos materiales son especialmente competitivos en corrientes secas y relativamente concentradas de

¹⁵ GUO, S., et al. Recent advances in biochar-based adsorbents for CO₂ capture. En: *Carbon Capture Science & Technology*. 2022. vol. 4, no. 100059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100059>

¹⁶ ZHANG, C., et al. Direct air capture of CO₂ by KOH-activated bamboo biochar. En: *Journal of the Energy Institute*. 2022. vol. 105, pp. 399–405. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.10.017>

¹⁷ GANIYU, S. A. Review of zeolitic-based sorbents for CO₂ capture: Insights into functional modifications, economic feasibility and machine learning-enhanced strategies. En: *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. vol. 23, no. 100818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100818>

¹⁸ SOO, X. Y. D., et al. Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. En: *Journal of CO₂ Utilization*. 2024. vol. 81, no. 102727. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>

CO₂. Estos resultados refuerzan el papel de las zeolitas como adsorbentes de alta eficiencia, aunque la propia literatura especializada sigue señalando la humedad como una de sus limitaciones más relevantes, según Ganiyu¹⁹ y Li et al.²⁰.

Con respecto al carbón activado, el estado del arte muestra un panorama favorable, aunque estrechamente dependiente del precursor y del método de activación. La bibliografía reciente indica que la mejora de la microporosidad y de la estructura jerárquica del sólido incrementa notablemente el desempeño en captura de CO₂. En este sentido, un estudio de 2024 sobre carbón activado derivado de aserrín reportó una captación de 9.2 mmol·g⁻¹ a 25 °C y 1 bar, así como una selectividad CO₂/N₂ de 40.2 y estabilidad durante diez ciclos, lo que confirma el alto potencial de esta familia cuando su síntesis es adecuadamente optimizada. Aun así, las revisiones también destacan que su desempeño final depende de manera importante de las condiciones experimentales y del diseño del adsorbente.

En relación con el biochar, la literatura reciente muestra una evolución significativa en su valoración como adsorbente. Aunque tradicionalmente se le ha atribuido un rendimiento inferior frente a zeolitas y carbones activados, los estudios más recientes lo presentan como una plataforma sostenible con potencial de mejora mediante activación química y modificación superficial. Una revisión de 2022 subraya que el biochar prístino suele exhibir baja adsorción y que su mejora requiere aumentar área superficial, porosidad y grupos funcionales. En la misma línea, un estudio experimental con biochar de bambú activado con KOH reportó una capacidad de 3.49 mmol·g⁻¹ a 25 °C y 1 bar, junto con estabilidad prometedora a baja humedad relativa.

¹⁹ GANIYU, S. A. Review of zeolitic-based sorbents for CO₂ capture: Insights into functional modifications, economic feasibility and machine learning-enhanced strategies. En: Chemical Engineering Journal Advances. 2025. vol. 23, no. 100818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2025.100818>

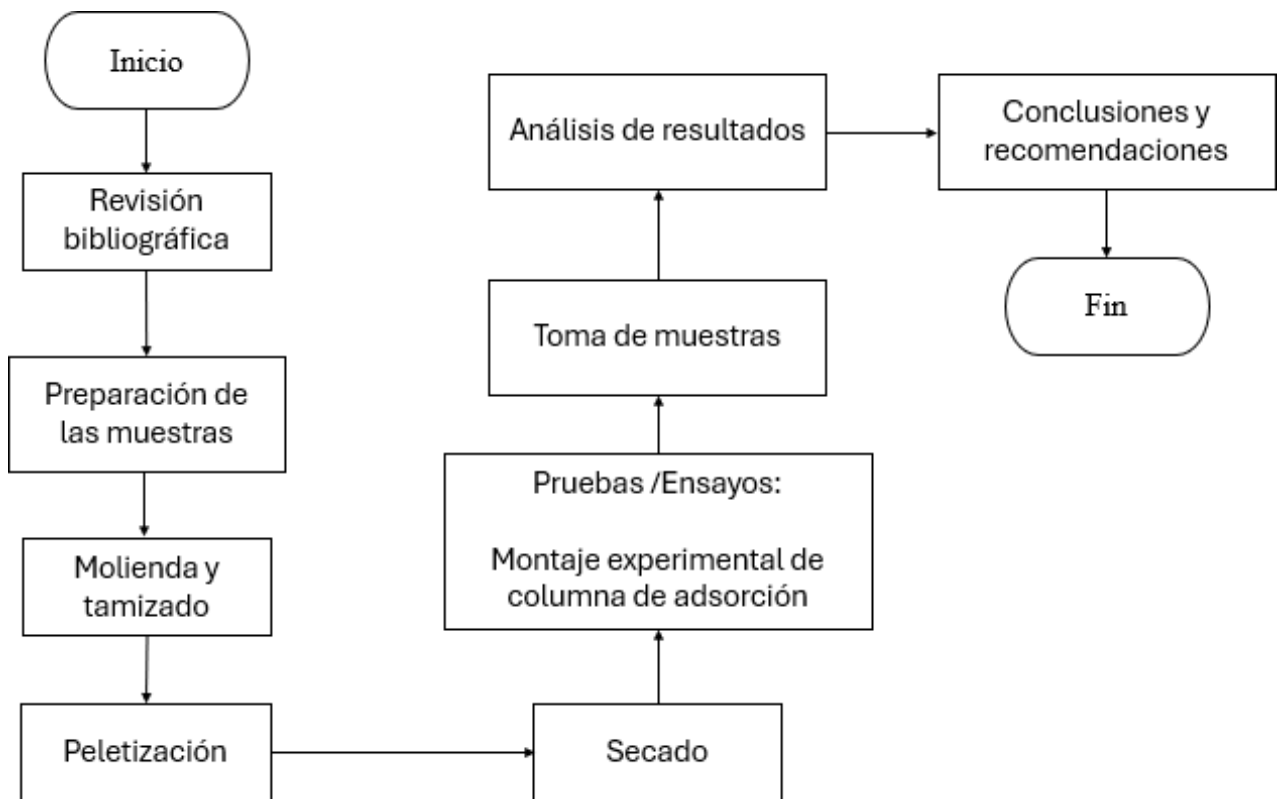
²⁰ LI, Z., et al. Washcoated zeolite structured adsorbents for CO₂ capture and recovery by rotary adsorption. En: Carbon Capture Science & Technology. 2025. vol. 16, no. 100378. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100378>

La evidencia disponible sugiere que, bajo condiciones experimentales secas, controladas y con una corriente relativamente simple de CO₂, como la generada por descomposición térmica del NaHCO₃, la zeolita presenta bases bibliográficas para ser considerada el adsorbente con mayor eficiencia esperada. El carbón activado aparece como un competidor sólido, especialmente cuando posee una microporosidad altamente desarrollada, mientras que el biochar suele requerir procesos de activación o modificación para aproximarse a esos niveles de desempeño. No obstante, esta tendencia debe interpretarse con cautela, debido a que los valores reportados en la literatura proceden de estudios realizados con materiales, configuraciones y condiciones operativas diferentes, lo que limita la comparación directa entre resultados (Foorginezhad et al., 2024; Guo et al., 2022; Li et al., 2025)

3. METODOLOGÍA

Para la metodología se presenta la Figura 1 con el flujograma general de la metodología experimental desarrollada para la preparación de los adsorbentes y evaluación de captura de CO₂.

Figura 1. Flujograma general de la metodología experimental.



Fuente: Elaboración propia.

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Se efectuó una revisión sistemática de la literatura disponible, apoyada en fuentes especializadas como artículos científicos, libros y bases de datos institucionales de la

Universidad Industrial de Santander, con el objetivo de consolidar un marco teórico actualizado.

3.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.

3.2.1 Obtención del biochar.

El biochar se produce mediante pirólisis, un proceso termoquímico en el cual biomasa de origen vegetal es sometida a altas temperaturas (300–700 °C) en ausencia o con limitada presencia de oxígeno, generando su descomposición térmica y la liberación de compuestos volátiles, mientras que el residuo sólido obtenido corresponde a un material rico en carbono cuyas características dependen de las condiciones operativas del proceso. Este material es proveniente del proyecto de producción de biochar del ingeniero Nehimes Castro, adscrito al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Santander (UDES).

3.2.2 Molienda de la zeolita.

Debido a la presentación inicial del material Apéndice A, se llevó a cabo un proceso de trituración mediante molienda en molino de bolas, desarrollado en dos fases. En la primera etapa se emplearon aproximadamente 20 bolas de acero de 4 cm de diámetro durante 30 minutos, con el fin de lograr una reducción inicial del tamaño de partícula. Posteriormente, en una segunda fase, se utilizaron bolas de 2 cm de diámetro durante 30 minutos para continuar con el refinamiento del material. Durante todo el procedimiento se garantizó un adecuado sellado del equipo como medida de seguridad en la operación. La reducción de tamaño de partícula se realizó mediante molino de bolas, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Trituración en molino de bolas de la zeolita.



Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la molienda, el material triturado fue extraído para continuar con el proceso de acondicionamiento granulométrico, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Extracción de la zeolita reducida de tamaño.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Tamizado.

Posterior al proceso de molienda, la zeolita fue sometida a una etapa de tamizado utilizando una malla número 50, con el propósito de obtener una distribución de tamaño de partícula más uniforme. Esta operación permitió separar partículas de mayor tamaño y garantizar una granulometría más homogénea para la preparación de los pellets adsorbentes.

La homogeneidad en el tamaño de partícula resulta importante debido a que influye directamente en el empaquetamiento del material dentro de la columna de adsorción, en la transferencia de masa y en el contacto superficial entre el gas y el adsorbente. Asimismo, una distribución granulométrica controlada favorece la estabilidad mecánica de los pellets y reduce la presencia de partículas finas que puedan generar pérdidas de material durante el ensayo experimental. El proceso de tamizado realizado mediante malla #50 se presenta en la Figura 4.

Figura 4. Tamizado utilizando malla número 50.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Peletización.

Se llevó a cabo el proceso de peletización de los adsorbentes, zeolita, biochar y carbón activado de forma manual, mediante la conformación de pellets a partir de mezclas preparadas individualmente para cada material. En cada caso, se empleó una proporción de 75 % en peso del adsorbente correspondiente y 25 % de cemento como agente aglomerante, adicionando agua en cantidad suficiente para lograr una adecuada consistencia y cohesión de la mezcla. Posteriormente, el material fue moldeado manualmente hasta obtener pellets de forma aproximadamente esférica con un diámetro cercano a 15 mm, adecuados para su posterior uso en el proceso experimental, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Proceso de peletización manual.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Secado.

Los pellets obtenidos fueron sometidos inicialmente a un proceso de secado a temperatura ambiente durante 24 horas, con el fin de eliminar la mayor parte de la humedad libre presente en la mezcla. Posteriormente, se realizó un secado en horno a una temperatura de 80 °C durante 20 min, como se muestra en la figura 6, con el objetivo de remover la humedad residual y mejorar la estabilidad e integridad mecánica de los pellets para su uso en el proceso experimental.

Figura 6. Secado en horno.



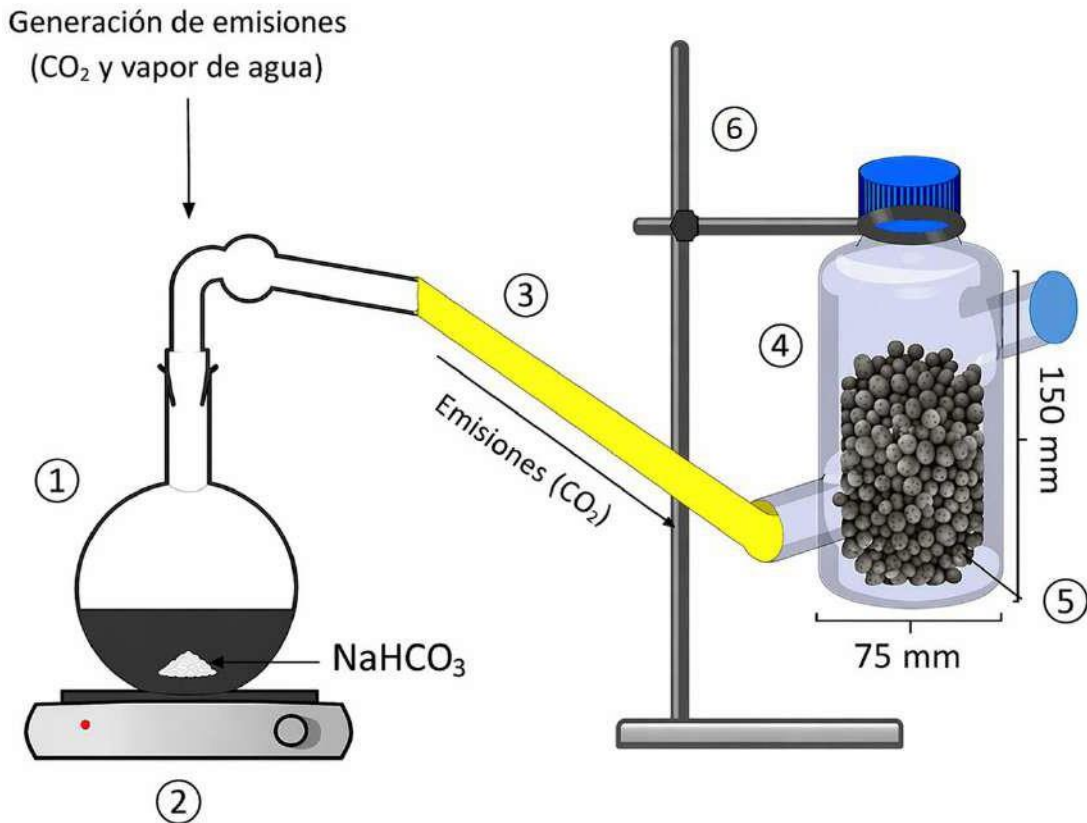
Fuente: Elaboración propia.

3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE COLUMNA DE ADSORCIÓN.

El montaje experimental fue diseñado con el propósito de generar CO₂ de manera controlada y conducirlo a través de un medio adsorbente, permitiendo evaluar la

capacidad de captura de diferentes materiales bajo condiciones establecidas. Los componentes del sistema que se muestran en la Figura 7.

Figura 7. Montaje experimental del sistema de captura de CO₂.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Componentes.

Fuente de emisiones (balón aforado ① + placa de calentamiento ②) para la generación controlada de CO₂ a partir de la descomposición térmica de NaHCO₃. Conectores y tubería de vidrio borosilicato y polietileno resistentes a altas temperaturas ③, empleados para la conducción de las emisiones gaseosas. Columna de adsorbentes ④: diámetro 75 mm y altura efectiva de 150 mm. Pellets de biochar, zeolita y carbón activado ⑤, obtenidos mediante proceso de peletización, empleados como medio adsorbente en las

columnas. Soportes metálicos y abrazaderas universales ⑥, utilizados para sostener y estabilizar el sistema de columnas.

3.3.2 Funcionamiento.

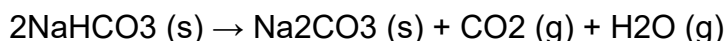
El funcionamiento del sistema se inició con el calentamiento de la placa a una temperatura de 150 °C durante un periodo de 30 minutos, con el fin de inducir la descomposición térmica del NaHCO_3 y generar CO_2 . El gas producido fue conducido a través de un sistema de tubería hacia una columna que contenía los pellets, permitiendo su contacto directo con el flujo gaseoso y favoreciendo el proceso de adsorción.

Previo al desarrollo de la prueba, la campana que contenía los pellets fue pesada para establecer una referencia inicial. Posteriormente, una vez finalizado el ensayo, se realizó una segunda medición una hora después, con el objetivo de determinar la cantidad de CO_2 capturada por diferencia de masa. Este montaje experimental, como se muestra en la figura y apéndice B, permitió evaluar el desempeño de cada adsorbente bajo condiciones controladas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CALCULO DE CO₂ TEORICO.

Con el fin de determinar la eficiencia de captura de los adsorbentes evaluados, fue necesario calcular teóricamente la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) generada durante la descomposición térmica del bicarbonato de sodio (NaHCO₃). Este cálculo permitió establecer una referencia cuantitativa para comparar la masa de CO₂ capturada experimentalmente por cada adsorbente. La descomposición térmica del bicarbonato de sodio ocurre de acuerdo con la siguiente reacción estequiométrica:



Esto indica que, a partir de 10 g de bicarbonato de sodio, se dispone teóricamente de 0.119 moles de reactivo para llevar a cabo la reacción de descomposición térmica. A partir de esta cantidad y considerando las relaciones estequiométricas de la reacción balanceada, se determinaron los moles teóricos de cada uno de los productos generados. El resultado obtenido indica que la descomposición térmica de 10 g de NaHCO₃ genera teóricamente 2.62 g de CO₂. Este valor constituye la base de referencia para el cálculo de las eficiencias de captura de los adsorbentes evaluados experimentalmente.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

La cantidad de CO₂ capturada por cada adsorbente se determinó mediante diferencia de masa entre el estado inicial y final de los pellets posterior al ensayo experimental. Para ello, se realizó el pesaje de cada sistema adsorbente antes de la exposición al flujo gaseoso y posteriormente una vez finalizado el proceso de adsorción. La masa de CO₂ capturada se calculó mediante la siguiente expresión:

$$m_{\text{CO}_2} = m_f - m_i$$

Donde: *mf* corresponde a la masa final del adsorbente después del ensayo y *mi* corresponde a la masa inicial del adsorbente antes del ensayo. Los registros de masa inicial y final para cada adsorbente se presentan en los Anexos C al H. A partir de estos valores experimentales se determinó la cantidad de CO₂ retenida por cada material evaluado.

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias importantes en la capacidad de captura entre los adsorbentes analizados. La zeolita presentó la mayor masa retenida de CO₂, seguida por el biochar y finalmente el carbón activado. Estos resultados sugieren una mayor afinidad de la zeolita por el CO₂ bajo las condiciones experimentales establecidas. La Tabla 1 presenta las masas registradas antes y después del ensayo experimental, así como la cantidad de CO₂ capturada por cada adsorbente evaluado.

Tabla 1. Masa de CO₂ capturada por los adsorbentes evaluados.

Absorbente	Masa inicial [g]	Masa final [g]	CO ₂ [g]
Carbon Activado	130.42	130.43	0.01
Zeolita	224.31	225.08	0.77
Biochar	157.00	157.20	0.20

Fuente: Elaboración propia.

4.3 EFICIENCIAS DE CAPTURA.

La eficiencia de captura de CO₂ para cada adsorbente se determinó comparando la masa de CO₂ capturada experimentalmente respecto a la cantidad teórica de CO₂ generada durante la descomposición térmica del NaHCO₃. La eficiencia se calculó mediante la siguiente expresión:

$$n(\%) = \frac{m_{CO_2, \text{teorico}}}{m_{CO_2, \text{experimental}}} * (100)$$

Donde: $mCO_2, experimental$ corresponde a la masa de CO_2 retenida experimentalmente y $mCO_2, teorico$ corresponde a la masa teórica total de CO_2 generada. Los resultados obtenidos muestran que la zeolita presentó la mayor eficiencia de captura, alcanzando un valor de 29.39 %, mientras que el biochar registró una eficiencia de 7.63 % y el carbón activado presentó el menor desempeño, con una eficiencia de 0.38 %.

Las diferencias observadas entre los adsorbentes pueden asociarse principalmente a sus propiedades texturales y estructurales. La elevada microporosidad y selectividad de la zeolita favorecieron una mayor retención de CO_2 , mientras que el biochar presentó un comportamiento intermedio posiblemente limitado por su menor desarrollo de área superficial y grupos activos. Por otra parte, el bajo desempeño del carbón activado sugiere que las condiciones experimentales empleadas no favorecieron significativamente su capacidad adsorbente. La Tabla 2 presenta las eficiencias de captura de CO_2 obtenidas experimentalmente para cada adsorbente bajo las condiciones de operación establecidas.

Tabla 2. Eficiencia de captura de CO_2 de los adsorbentes evaluados.

Absorbente	$NaHCO_3$ [g]	CO_2 - teórico [g]	CO_2 - experimental [g]	Eficiencia [%]
Carbon Activado	10	2.62	0.01	0.38
Zeolita	10	2.62	0.77	29.39
Biochar	10	2.62	0.20	7.63

Fuente: Elaboración propia.

4.4 DISCUSION DE RESULTADOS.

Los resultados experimentales evidenciaron diferencias significativas en la capacidad de captura de CO_2 entre los adsorbentes evaluados. La zeolita presentó la mayor eficiencia de captura, alcanzando un valor de 29.39 %, superior al biochar (7.63 %) y al carbón activado (0.38 %). Este comportamiento puede asociarse principalmente a la elevada microporosidad y selectividad característica de las zeolitas, propiedades ampliamente

reportadas en la literatura para procesos de adsorción de CO₂ en corrientes gaseosas secas.

La mayor afinidad de la zeolita hacia el CO₂ se relaciona con su estructura cristalina ordenada y con la presencia de sitios activos capaces de favorecer interacciones. Estudios recientes han reportado que materiales como la zeolita presentan altas capacidades de adsorción debido a sus microporos ordenados y a la fuerte interacción generada entre el CO₂ y la superficie del material. Bajo las condiciones experimentales empleadas en este trabajo, estas características favorecieron un mejor desempeño frente a los otros adsorbentes analizados.

El biochar presentó una eficiencia intermedia, lo cual concuerda con lo reportado en investigaciones recientes. Aunque este material posee ventajas relacionadas con sostenibilidad y aprovechamiento de biomasa residual, su capacidad de captura suele depender fuertemente de procesos de activación química o modificación superficial. En este caso, el biochar utilizado no fue sometido a tratamientos adicionales de activación, bajo recomendación del ingeniero encargado de producir el biochar, lo que posiblemente limitó el desarrollo de microporos y grupos funcionales capaces de incrementar la afinidad por el CO₂.

Por otra parte, el carbón activado presentó la menor eficiencia de captura experimental, comportamiento que difiere parcialmente de algunos resultados reportados en la literatura. Diversos estudios han demostrado que el carbón activado puede alcanzar elevadas capacidades de adsorción cuando posee una estructura microporosa altamente desarrollada y condiciones óptimas de activación. Sin embargo, factores como la humedad residual, la distribución de tamaño de poro, el método de peletización o las

condiciones operativas del ensayo pueden afectar considerablemente su desempeño, según Foorginezhad et al.²¹ y Mukherjee et al.²²

Adicionalmente, debe considerarse que el uso de cemento como aglomerante durante la peletización pudo generar reducción parcial de área superficial disponible en algunos materiales, afectando la accesibilidad a los sitios activos de adsorción. Asimismo, las diferencias observadas podrían relacionarse con la compactación de los pellets y con variaciones en la resistencia a la transferencia de masa dentro de la columna experimental. En términos generales, los resultados obtenidos muestran concordancia con la tendencia reportada en estudios previos, donde las zeolitas suelen exhibir mayor selectividad y eficiencia de captura bajo condiciones secas y controladas de operación. No obstante, las capacidades experimentales obtenidas en este trabajo corresponden a condiciones específicas de ensayo y no deben extrapolarse directamente a sistemas industriales, debido a diferencias en flujo gaseoso, presión, humedad y composición de gases de combustión.

²¹ FOORGINEZHAD, S., et al. Activated porous carbon derived from sawdust for CO₂ capture. En: Materials Chemistry and Physics. 2024. vol. 317, no. 129177. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129177>

²² MUKHERJEE, A., et al. Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. En: Journal of Environmental Sciences. 2019. vol. 83, pp. 46–63. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>

5. CONCLUSIONES

La zeolita presentó la mayor eficiencia de captura de CO₂, con un valor de 29.39%, superando ampliamente al biochar (7.63%) y al carbón activado (0.38%). Bajo las condiciones experimentales establecidas, la zeolita demostró ser el material más efectivo para la adsorción de CO₂.

Se logró evaluar la eficiencia de captura mediante balances de materia, determinando la masa de CO₂ retenida por cada adsorbente por diferencia de peso antes y después de la exposición. Esto evidencia que no todos los adsorbentes sólidos tienen el mismo desempeño bajo las mismas condiciones, y que la zeolita es la más promisoría para aplicaciones de captura de CO₂ en sistemas de baja escala.

Bajo condiciones estandarizadas (misma fuente de CO₂, mismo tiempo de exposición, misma temperatura de generación), se determinó la capacidad de captura en términos de masa de CO₂ retenida y eficiencia porcentual, estos valores reflejan la capacidad real de cada material para retener CO₂ en las condiciones ensayadas.

La zeolita es, por tanto, el material más eficiente individualmente. Su superioridad se atribuye a su estructura microporosa ordenada y alta superficie específica, que favorece la adsorción física de CO₂. El biochar, aunque con menor eficiencia, presenta un desempeño moderado que podría mejorarse mediante activación química o modificación superficial. El carbón activado, sorprendentemente, mostró una eficiencia muy baja (0.38%), lo que sugiere que, bajo las condiciones de este experimento (posiblemente baja presión parcial de CO₂, temperatura ambiente en la columna, o saturación rápida), no resultó efectivo. No se evaluaron combinaciones de adsorbentes, pero con base en los resultados, la zeolita es el material recomendado para sistemas de captura de CO₂ en condiciones similares.

6. RECOMENDACIONES

Normalizar la masa del adsorbente y usar la misma masa de adsorbente (ej. 100 g) para todos los materiales y reportar siempre la capacidad másica ($\text{mg CO}_2/\text{g adsorbente}$), que permitirá comparar la cantidad empleada.

Repetir y realizar un análisis estadístico, con al menos tres réplicas por adsorbente, calcular desviación estándar y aplicar un ANOVA para confirmar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas.

Suplir la generación de CO_2 sustituyendo la descomposición de NaHCO_3 por una botella de CO_2 comercial o un generador ácido-base ($\text{CaCO}_3 + \text{HCl}$), que permiten flujo constante, controlable y sin vapor de agua.

Caracterizar los adsorbentes y realizar un análisis BET (área superficial), SEM (morfología) y FTIR (grupos funcionales) para correlacionar las propiedades fisicoquímicas con la capacidad de captura de CO_2 .

BIBLIOGRAFÍA

ABUELNOOR, N., et al. Activated carbons from biomass-based sources for CO₂ capture applications. En: *Chemosphere*. 2021. vol. 282, no. 131111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>

FOORGINEZHAD, S., et al. Activated porous carbon derived from sawdust for CO₂ capture. En: *Materials Chemistry and Physics*. 2024. vol. 317, no. 129177. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129177>

GANIYU, S. A. Review of zeolitic-based sorbents for CO₂ capture: Insights into functional modifications, economic feasibility and machine learning-enhanced strategies. En: *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. vol. 23, no. 100818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2025.100818>

GUO, S., et al. Recent advances in biochar-based adsorbents for CO₂ capture. En: *Carbon Capture Science & Technology*. 2022. vol. 4, no. 100059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100059>

LI, Z., et al. Washcoated zeolite structured adsorbents for CO₂ capture and recovery by rotary adsorption. En: *Carbon Capture Science & Technology*. 2025. vol. 16, no. 100378. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100378>

MUKHERJEE, A., et al. Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. En: *Journal of Environmental Sciences*. 2019. vol. 83, pp. 46–63. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>

SOO, X. Y. D., et al. Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. En: *Journal of CO₂ Utilization*. 2024. vol. 81, no. 102727. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>

TOAN, S., et al. Thermodynamics of NaHCO_3 decomposition during Na_2CO_3 -based CO_2 capture. En: *Journal of Environmental Sciences*. 2019. vol. 78, pp. 74–80. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.07.005>

ZHANG, C., et al. Direct air capture of CO_2 by KOH-activated bamboo biochar. En: *Journal of the Energy Institute*. 2022. vol. 105, pp. 399–405. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.10.017>

ANEXOS

Anexo A. Caracterización visual de la zeolita empleada como adsorbente.

La siguiente imagen presenta la zeolita utilizada durante el desarrollo experimental antes del proceso de reducción de tamaño de partícula.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Registro fotográfico del montaje experimental de captura de CO₂.

La siguiente imagen muestra el montaje experimental implementado para la generación y conducción de CO₂ hacia la columna de adsorción. El sistema estuvo conformado por una fuente de generación de CO₂, un sistema de conducción gaseosa y una columna empacada con pellets adsorbentes.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo C. Registro de masa inicial: Carbón activado antes de captura de CO₂.

La siguiente imagen presenta el registro de masa inicial del carbón activado previo al ensayo experimental de adsorción de CO₂.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo D. Registro de masa final: Carbón activado después de captura de CO₂.

La siguiente imagen presenta el registro de masa final del carbón activado posterior al ensayo experimental.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo E. Registro de masa inicial: Zeolita antes de captura de CO_2 .

La siguiente imagen presenta el registro de masa inicial de la zeolita previo al proceso experimental de adsorción.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo F. Registro de masa final: Zeolita después de captura de CO_2 .

La siguiente imagen muestra el registro de masa final de la zeolita después de la exposición al flujo gaseoso de CO_2 .



Fuente: Elaboración propia.

Anexo G. Registro de masa inicial: Biochar antes de captura de CO₂.

La siguiente imagen presenta el registro de masa inicial del biochar antes del desarrollo del ensayo experimental de adsorción de CO₂.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo H. Registro de masa final: Biochar después de captura de CO₂.

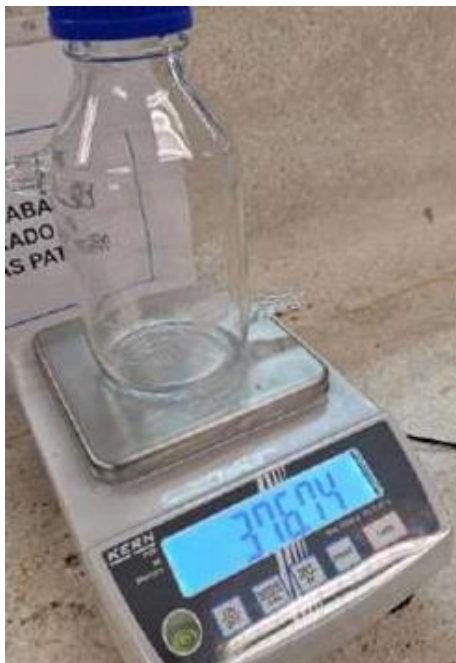
La siguiente imagen presenta el registro de masa final del biochar posterior al ensayo experimental.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo I. Registro de masa de columna vacía del sistema experimental.

La siguiente imagen presenta el registro de masa de la columna vacía utilizada durante el desarrollo experimental.



Fuente: Elaboración propia.