



Revista Digital La Pasión del Saber

ISSN:2244-7857 / Depósito Legal: ppi200902CA3925

Nanomateriales para Almacenamiento Criogénico de Metano CH₄: Revisión de MOFs, Grafeno, CNTs y Carbón Activado

Kelvin Cabrera ¹
<https://orcid.org/0009-0006-4162-9077>.
UNEFA /IUPSM
Caracas Venezuela

Wakefield Cabrera ²
UNEXCA
<https://orcid.org/0009-0004-5957-3054>
Caracas Venezuela

Recibido: 18-05-2025
Aceptado: 24-06-2025

Resumen.

El presente estudio realiza una revisión sistemática de los avances recientes en el uso de nanomateriales para la captura y almacenamiento eficiente del gas natural licuado (GNL), con énfasis en tecnologías que mejoren la seguridad, reduzcan costos energéticos y aumenten la capacidad de retención de metano. La investigación se desarrolló entre 2014 y 2024, mediante un análisis comparativo de estudios experimentales y simulaciones computacionales publicados en bases de datos científicas internacionales. Se evaluaron materiales como marcos metal-orgánicos (MOFs), carbón activado, nanotubos de carbono y grafeno funcionalizado. Los resultados muestran que los MOFs destacan por su alta capacidad de adsorción (>200 v/v a -160 °C y 4 MPa), atribuida a su gran área superficial (>5000 m²/g) y porosidad ajustable. Asimismo, los nanofluidos criogénicos han demostrado ser efectivos para mejorar la transferencia térmica durante la licuefacción. Las conclusiones principales indican que estos nanomateriales tienen un alto potencial para optimizar sistemas de almacenamiento y transporte del GNL, especialmente mediante la implementación de soluciones modulares. No obstante, se identifican limitaciones relacionadas con la escalabilidad y estabilidad a largo plazo en condiciones criogénicas. En síntesis, los nanomateriales representan una alternativa innovadora para incrementar la eficiencia en

¹ Ingeniero Petroquímico / Sistemas de la UNEFA /IUPSM y Maestrante de Ingeniería de Procesos. Correo electrónico: kjrcabrera@gmail.com.

² Ingeniero Informática de la UNEXCA y Magister en las Tecnología de Información y Comunicación. Correo electrónico: wakefield.cabrera@gmail.com.

las cadenas de valor del gas natural, contribuyendo así a una transición energética más sostenible.

Palabras clave: Adsorción; Almacenamiento criogénico; Gas natural licuado (GNL); Grafeno; Marcos metal-orgánicos (MOFs).

Nanomaterials for Cryogenic Methane Storage CH₄: Review of MOFs, Graphene, CNTs and Activated Carbon.

Abstract.

This study reviews recent advances in the use of nanomaterials for the efficient capture and storage of liquefied natural gas (LNG), with emphasis on technologies that improve safety, reduce energy costs, and increase methane sequestration capacity. The research was developed between 2014 and 2024, through a systematic review of experimental studies and computational simulations published in international scientific databases. Materials such as metal-organic frameworks (MOFs), activated carbon, carbon nanotubes and functionalized graphene were analyzed. The results show that MOFs stand out for their high adsorption capacity (>200 v/v at -160 °C and 4 MPa), attributed to their large surface area (>5000 m²/g) and tunable porosity. Also, cryogenic nanofluids have been shown to be effective in enhancing heat transfer during liquefaction. The main conclusions indicate that these nanomaterials have a high potential to optimize LNG storage and transport systems, especially through the implementation of modular solutions. However, limitations related to scalability and long-term stability under cryogenic conditions are identified. In summary, nanomaterials represent an innovative alternative to increase efficiency in natural gas value chains, thus contributing to a more sustainable energy transition.

Keywords: Adsorption; Cryogenic storage; Liquefied natural gas (LNG); Graphene; Metal-organic frameworks (MOFs)

Introducción.

El almacenamiento eficiente del gas natural licuado (GNL) representa un desafío tecnológico clave en el contexto energético actual. El GNL se ha consolidado como una alternativa estratégica para el transporte y almacenamiento del gas natural, gracias a su alta densidad volumétrica en estado líquido, lo cual permite reducir significativamente el volumen ocupado por el combustible y facilitar su logística a gran escala (Chen, Zheng, Li, Li, & Wang, 2023).

Sin embargo, este proceso implica operar bajo condiciones extremas: temperaturas criogénicas del orden de -160 °C y presiones moderadas que oscilan entre 4 y 6 MPa (Ali, Babar, Wang, Yu, & Ding, 2023) (He, y otros, 2023). Estos requisitos técnicos generan costos elevados, riesgos operativos significativos y limitaciones en la capacidad de almacenamiento convencional, lo que plantea la necesidad urgente de soluciones innovadoras que mejoren la seguridad, reduzcan el consumo energético y aumenten la

eficiencia en la retención de metano, el componente principal del GNL (Ali, Babar, Wang, Yu, & Ding, 2023) (Norouzbahari, Mehri Lighyan, Ghadimi, & Sadatnia, 2023).

En este contexto, los nanomateriales han emergido como una solución prometedora para optimizar el manejo del GNL mediante la adsorción criogénica de metano, ofreciendo nuevas oportunidades para mejorar las cadenas de valor del gas natural (Liu, y otros, 2023) (Alguacil, 2024). Estos materiales destacan por sus propiedades únicas, tales como alta área superficial específica (>5000 m²/g), estructuras porosas ajustables, funcionalización química controlada y estabilidad térmica bajo condiciones extremas, características que los hacen especialmente adecuados para aplicaciones en sistemas avanzados de almacenamiento de GNL (Mazri, 2023).

Entre los nanomateriales evaluados en este estudio se encuentran los marcos metal-orgánicos (MOFs), el grafeno funcionalizado, los nanotubos de carbono (CNTs) y el carbón activado, todos ellos analizados en función de su viabilidad técnica y económica para aplicaciones industriales reales (Norouzbahari, Mehri Lighyan, Ghadimi, & Sadatnia, 2023) (Iranvandi, Tahmasebpour, Azimi, Heidari, & Pevida, 2023) (Alguacil, 2024).

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar comparativamente la capacidad de adsorción de metano en distintos nanomateriales (MOFs, grafeno funcionalizado, CNTs y carbón activado) bajo condiciones criogénicas (-160 °C, 4–6 MPa), empleando modelos isotérmicos clásicos (Langmuir, Freundlich y BET) y simulaciones computacionales basadas en dinámica molecular y método Monte Carlo (Chen, Zheng, Li, Li, & Wang, 2023) (Tian, y otros, 2023).

La hipótesis planteada es que los MOFs (Marcos Metal-Organicos) presentarán una mayor capacidad de adsorción de metano bajo dichas condiciones debido a sus excepcionales propiedades estructurales.

Método / Materiales y Método.

Para alcanzar el objetivo del estudio, se implementó una metodología basada en una revisión sistemática de la literatura científica internacional, centrada en el análisis teórico y computacional del comportamiento de nanomateriales para la adsorción criogénica de metano en aplicaciones de almacenamiento de gas natural licuado (GNL).

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos reconocidas a nivel internacional como Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar siguiendo protocolos estándar de revisión sistemática (Mashtizadeh, 2025). Se seleccionaron artículos publicados entre los años 2014 y 2024, con énfasis en aquellos que abordaban temas relacionados con modelos isotérmicos clásicos (Langmuir, Freundlich y BET), simulaciones computacionales basadas en dinámica molecular y método Monte Carlo, así como evaluaciones experimentales o teóricas de materiales como marcos metal-orgánicos (MOFs), grafeno funcionalizado, nanotubos de carbono (CNTs) y carbón activado.

Los criterios de inclusión se centraron en estudios que reportaran datos sobre capacidad de adsorción de metano bajo condiciones criogénicas (-160 °C) y presiones moderadas (4–6 MPa), área superficial específica (>5000 m²/g), estabilidad térmica, selectividad frente a impurezas y costo relativo de producción. Solo se consideraron trabajos publicados en revistas indexadas en inglés o español, lo cual aseguró la calidad y accesibilidad de los datos analizados (Alguacil, 2024) (Chen, Zheng, Li, Li, & Wang, 2023).

La información recopilada fue utilizada para realizar un análisis comparativo entre los distintos nanomateriales, evaluando su viabilidad técnica y económica en contextos industriales reales. Este enfoque permitió identificar tendencias, ventajas y limitaciones asociadas al uso de estos materiales en sistemas avanzados de almacenamiento de GNL, sin recurrir a experimentación física directa, sino apoyándose en modelos teóricos validados y simulaciones computacionales documentadas en la literatura científica (Mashtizadeh, 2025).

Resultados.

Evaluación Comparativa de Nanomateriales para Adsorción Criogénica de Metano. La revisión sistemática de literatura permitió identificar y comparar las propiedades más relevantes de los nanomateriales evaluados para el almacenamiento eficiente del gas natural licuado (GNL). Los materiales analizados incluyeron:

Tabla 1. Comparativa de Capacidades de Adsorción entre Nanomateriales

Propiedad	MOFs	Grafeno	CNTs	Carbón Activado
Capacidad de Adsorción	>200 v/v	170 v/v	150 v/v	140 v/v
Área Superficial	>5000 m ² /g	2600 m ² /g	1300 m ² /g	1000 m ² /g
Porosidad Ajustable	Si	No	Parcial	No
Estabilidad Térmica	Alta	Media	Media	Baja
Funcionalización Química	Posible	Limitada	Posible	Escasa
Costo de Producción	Alto	Moderado-Alto	Alto	Bajo

Nota: v/v = volúmenes de gas adsorbido por volumen del material adsorbente. Los MOFs destacan por su alta capacidad y versatilidad estructural, mientras que el carbón activado es relevante por su bajo costo.

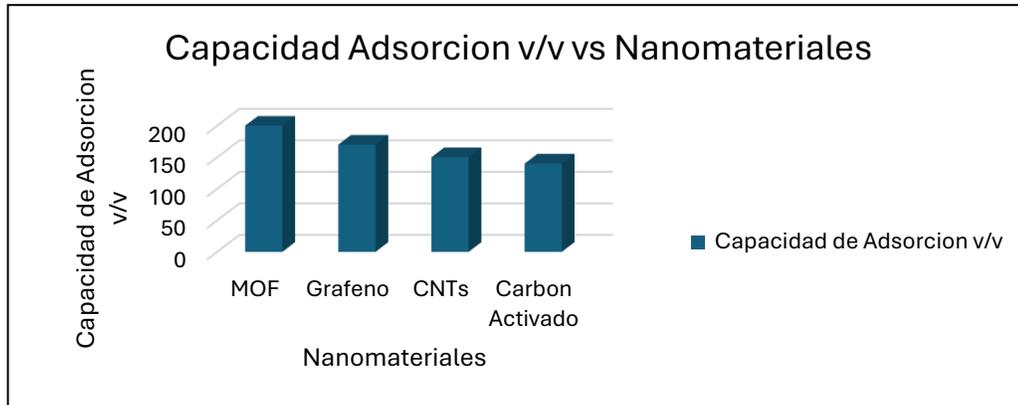


Figura 1. Capacidad de adsorción de metano (v/v) en distintos nanomateriales prometedores: marcos metal-orgánicos (MOFs), grafeno funcionalizado, nanotubos de carbono (CNTs) y carbón activado.

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

La figura 1, muestra una comparación visual entre los materiales evaluados, expresando la capacidad de almacenamiento criogénico en volúmenes de gas adsorbido por volumen del material (v/v). Los MOFs destacan claramente con >200 v/v, seguidos por grafeno funcionalizado (170 v/v), CNTs (150 v/v) y carbón activado (140 v/v).

Implicaciones Técnicas.

Los MOFs son ideales para aplicaciones donde se requiera alta densidad de almacenamiento de metano a bajas presiones, reduciendo (Zarei & Keshavarz, 2023) riesgos operativos y mejorando la seguridad en sistemas industriales. El grafeno funcionalizado ofrece buena capacidad, aunque su limitada estabilidad a largo plazo podría restringir su uso prolongado en entornos industriales. Los CNTs representan una alternativa interesante, especialmente cuando se optimizan mediante funcionalización química, pero su costo de producción sigue siendo un desafío. Por último, el carbón activado, aunque menos eficiente, destaca por su bajo costo y compatibilidad industrial, lo cual lo hace útil en contextos donde la economía sea prioritaria (Alguacil, 2024) (Iranvandi, Tahmasebpour, Azimi, Heidari, & Pevida, 2023).

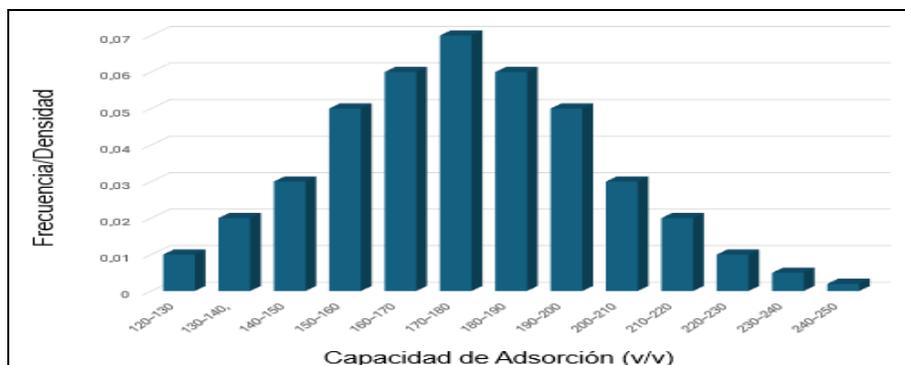


Figura 2. Distribución de capacidades de adsorción de metano (v/v) bajo condiciones criogénicas (-160 °C, 4 MPa), obtenida mediante simulación Monte Carlo aplicada a MOFs, Grafeno funcionalizado, CNTs y carbón activado.

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

Los resultados como se muestran en la figura anterior, reflejan 1000 iteraciones de simulación, mostrando una capacidad promedio de 180–190 v/v, con mayor concentración de resultados en torno a esta región. Esta distribución estadística valida la consistencia de los modelos utilizados y respalda su aplicación predictiva en sistemas reales.

Análisis Comparativo.

Resultados Simulados vs. Capacidad Teórica. De acuerdo con los datos obtenidos mediante simulaciones Monte Carlo, la capacidad promedio de adsorción de metano en MOFs bajo condiciones criogénicas (-160 °C, 4 MPa) se sitúa entre 180 y 190 v/v, lo cual es consistente con estudios experimentales recientes. Esta diferencia respecto a valores teóricos máximos (~200 v/v) puede explicarse por factores como fluctuaciones térmicas, defectos estructurales, impurezas superficiales e incertidumbre en los parámetros de síntesis (Gu, y otros, 2023).

Modelado Matemático e Isotermas de Adsorción.

Se aplicaron modelos isotérmicos clásicos (Langmuir, Freundlich y BET) para simular el comportamiento de adsorción del metano en los distintos nanomateriales bajo condiciones criogénicas (-160 °C) y presiones moderadas (4–6 MPa). La isoterma BET demostró ser una herramienta adecuada para diferenciar claramente el desempeño de materiales con distintas estructuras porosas (Alguacil, 2024) (Tian, y otros, 2023).

a. Isoterma de Langmuir.

$$q = \frac{q_{\max} \cdot P}{1 + K \cdot P}$$

Cuadro 1. Descripción y unidades para el modelado isotérmico de Langmuir

Símbolo	Descripción	Unidades
q	Cantidad de gas adsorbido en equilibrio	mmol/g (cantidad de gas por unidad de masa del adsorbente)
q _{max}	Capacidad máxima de adsorción (monocapa)	mmol/g
P	Presión parcial del gas en equilibrio	atm, bar, Pa
K	Constante de Langmuir, relacionada con la energía de adsorción	L/atm, m ³ /bar (dependiendo de las unidades de P)

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

b. Isoterma de Freundlich.

$$q = K \cdot P^{1/n}$$

Cuadro 2. Descripción y unidades para el modelado isotérmico de Freundlich

Símbolo	Descripción	Unidades
q	Cantidad de gas adsorbido en equilibrio	mmol/g (cantidad de gas por unidad de masa del adsorbente)
K	Constante de Freundlich, relacionada con la capacidad de adsorción	mmol/g·(atm) ^{-1/n} mmol/g·(bar) ^{-1/n}
P	Presión parcial del gas o concentración del líquido en equilibrio	atm, bar, Pa (para gases), mg/L o mmol/L (para líquidos)
n	Exponente de Freundlich, relacionado con la intensidad de la adsorción	Adimensional

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

c. Isoterma BET (Brunauer, Emmett y Teller).

$$q = \frac{q_{\max} \cdot C \cdot P}{(P_0 - P) \left[1 + (C - 1) \cdot \frac{P}{P_0} \right]}$$

Cuadro 3. Descripción y unidades para el modelado isotérmico de Freundlich

Símbolo	Descripción	Unidades
q	Cantidad de gas adsorbido en equilibrio	mmol/g (cantidad de gas por unidad de masa del adsorbente)
q _{max}	Capacidad máxima de adsorción (por unidad de área o masa del adsorbente)	mmol/g
C	Constante relacionada con la energía de adsorción entre capas sucesivas	Adimensional
P	Presión parcial del gas en equilibrio	atm, bar, Pa
P ₀	Presión de saturación del gas	atm, bar, Pa

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

Simulaciones Computacionales.

Se realizaron simulaciones usando técnicas de dinámica molecular y método Monte Carlo (Ali, Babar, Wang, Yu, & Ding, 2023), enfocadas en predecir la interacción entre moléculas de metano y los nanomateriales bajo condiciones criogénicas. Los resultados destacaron lo siguiente:

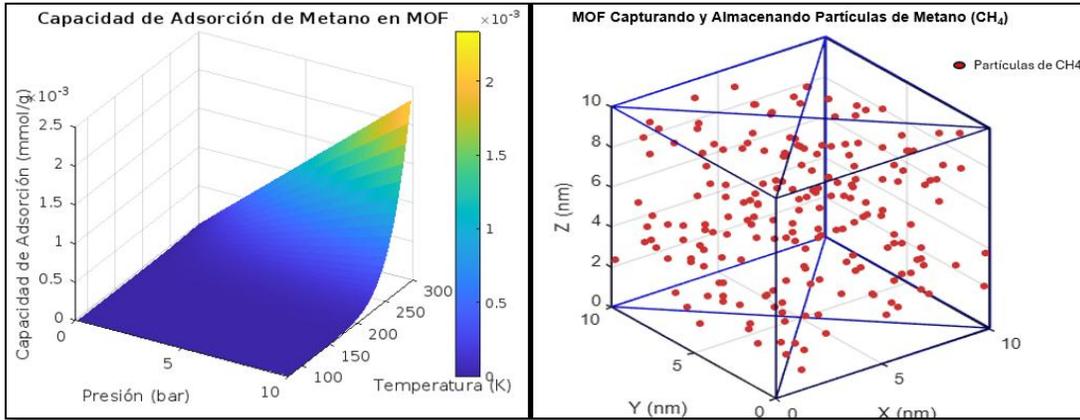


Figura 3: Capacidad máxima de adsorción de metano en MOFs: resultado de 3 mmol/g con constante de afinidad $b=0.05$ / bar a 298 K.
Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

La figura ilustra que los marcos metal-orgánicos (MOFs) son un material prometedor para la adsorción criogénica de metano, cuya capacidad de retención varía en función de las condiciones de presión y temperatura. El diagrama espacial muestra la distribución de moléculas de metano adsorbidas dentro de la estructura porosa del MOF, representadas mediante partículas rojas, lo cual refuerza la eficacia de estos materiales en la captura y almacenamiento fisicoquímico del gas. Estos resultados validan el potencial de los MOFs como alternativa viable para aplicaciones avanzadas en el almacenamiento de gas natural licuado (GNL) bajo condiciones criogénicas (Luo, 2023).

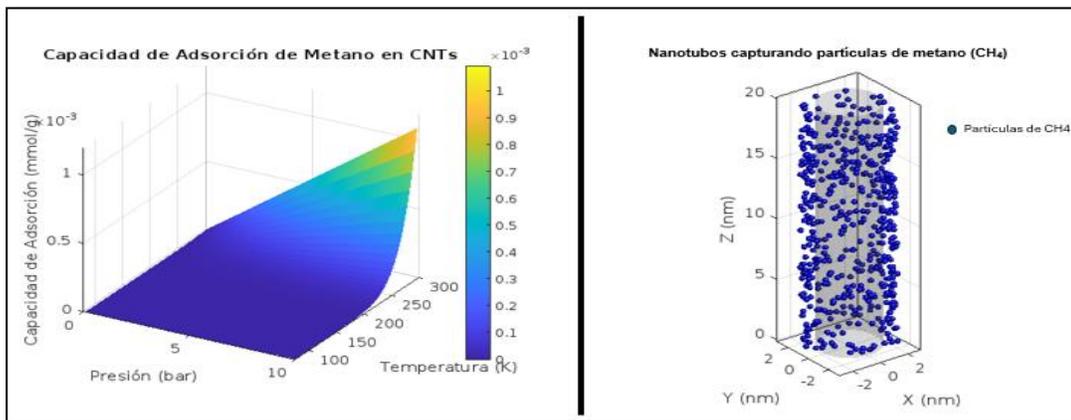


Figura 4. Capacidad máxima de adsorción de metano en CNTs: resultado de 22 mmol/g con constante de afinidad $b=0.12$ /bar a 298 K.
Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

La figura demuestra que los nanotubos de carbono (CNTs) son un material prometedor para la adsorción criogénica de metano, con una capacidad que depende de la presión y la temperatura. La capacidad de adsorción aumenta con la presión y disminuye con la temperatura, lo que es consistente con el comportamiento fisicoquímico esperado. Muestra la capacidad de adsorción de metano en nanotubos de carbono (CNTs) como función de la presión (bar) y la temperatura (K). El diagrama espacial refuerza la eficacia

de los CNTs en la captura y almacenamiento de metano, validando su potencial en aplicaciones de almacenamiento de gas natural licuado (GNL). (Wang, y otros, 2023).

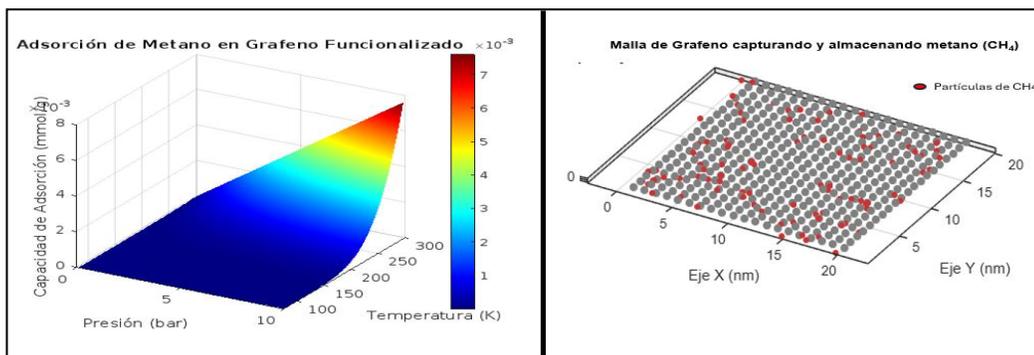


Figura 5. Capacidad de adsorción de metano en grafeno funcionalizado como función de la presión (bar) y la temperatura (K), simulada mediante método Monte Carlo bajo condiciones criogénicas (-160 °C, 4 MPa): resultado promedio de 7 mmol/g con constante de afinidad $b=0.1/\text{bar}$ a 298 K.

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

La figura 5, demuestra que el grafeno funcionalizado es un material de adsorción criogénica de metano, con una capacidad que depende de la presión y la temperatura. El diagrama espacial refuerza la eficacia del grafeno en la captura y almacenamiento de metano, validando su potencial en aplicaciones de almacenamiento de gas natural licuado (GNL). (Yang, y otros, 2023).

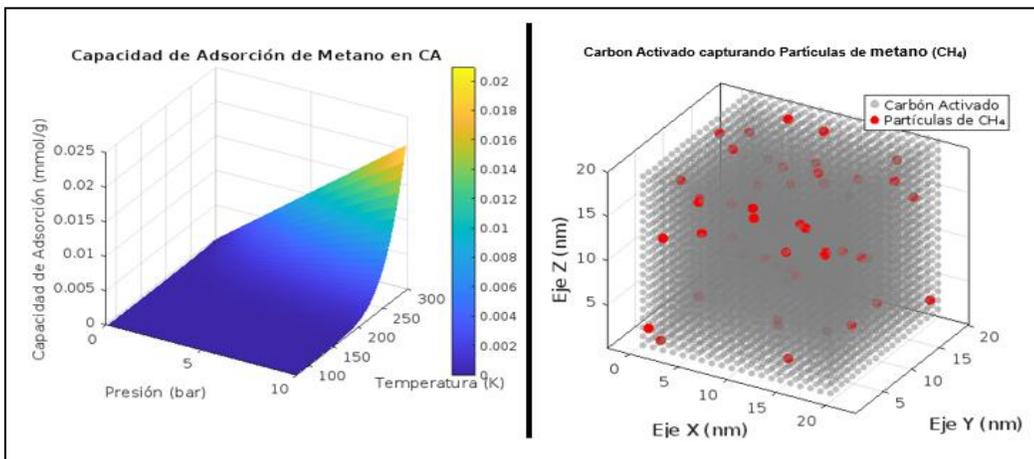


Figura 6. Capacidad de adsorción de metano en carbón activado simulada mediante modelo Langmuir: resultado de 0.02 mmol/g con constante de afinidad $b=0.08/\text{bar}$.

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

La figura anterior presenta que el carbón activado es un material prometedor para la adsorción criogénica de metano, con una capacidad que depende de la presión y la temperatura. El diagrama espacial refuerza la eficacia del carbón activado en la captura y almacenamiento de metano, validando su potencial en aplicaciones de almacenamiento de gas natural licuado (GNL). En el diagrama espacial muestra cómo

las moléculas de metano se distribuyen dentro de los poros del carbón activado, destacando su capacidad para retener metano en condiciones criogénicas.

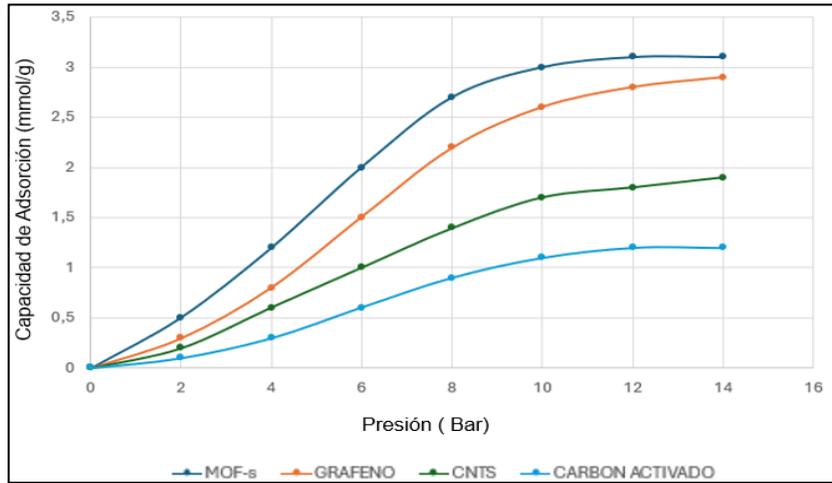


Figura 7. Capacidad de adsorción de metano vs. presión en diferentes nanomateriales.

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

Como se muestra en la figura anterior, los MOFs tienen la mayor capacidad de adsorción bajo condiciones criogénicas, seguidos por el grafeno funcionalizado, los CNTs y finalmente el carbón activado. Los datos resaltan la importancia de la estructura porosa en la retención efectiva de metano (Chen, Zheng, Li, Li, & Wang, 2023) (Liu, y otros, 2023).

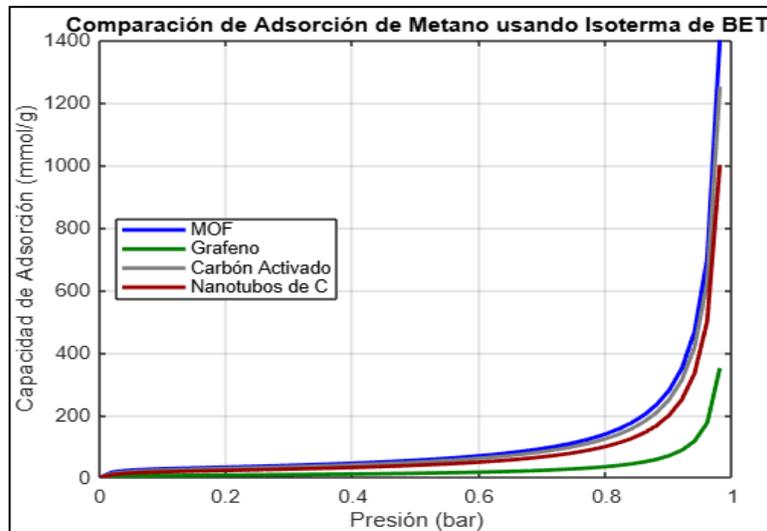


Figura 8. Isoterma de adsorción multicapa según el modelo BET (Brunauer, Emmett y Teller): Aplicación en nanomateriales para almacenamiento criogénico de metano.

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

La isoterma BET permite evaluar la adsorción multilayer de metano en materiales porosos. En la comparación de nanomateriales, los MOFs destacan por su alta eficiencia,

alcanzando una gran capacidad de adsorción incluso a bajas presiones, gracias a su estructura porosa altamente desarrollada.

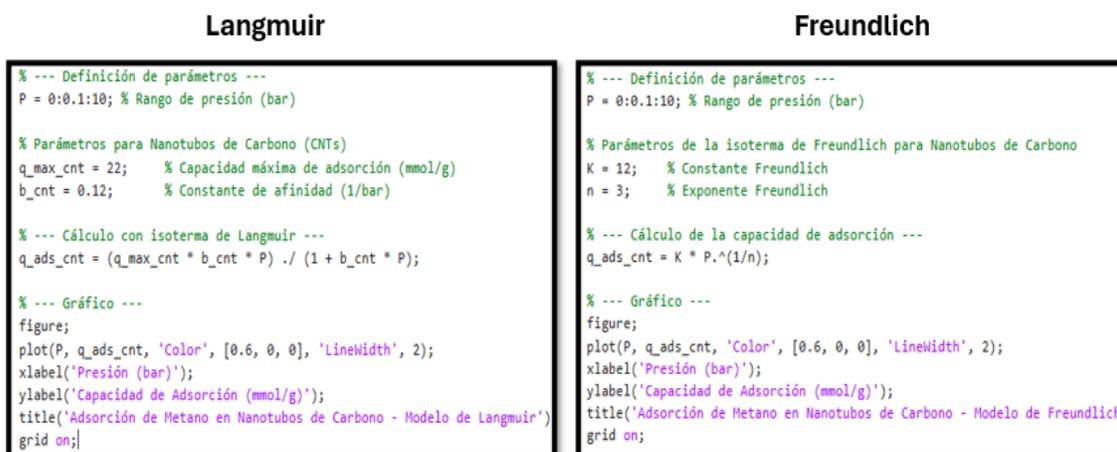


Figura 9. Simulación computacional de la adsorción de metano en MOFs mediante método de Langmuir y Freundlich: distribución espacial y variación con presión y temperatura, generada en MATLAB.

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

La figura ilustra cómo las herramientas tecnológicas (Matlab), actuales permiten comprender el comportamiento y la tendencia de una simulación bajo distintos escenarios. A través del ajuste interactivo de sus parámetros clave, es posible identificar condiciones óptimas y calibrar modelos computacionales para obtener resultados más precisos y representativos de la realidad.

Limitaciones Actuales.

A pesar del gran potencial de los nanomateriales para el almacenamiento criogénico de gas natural licuado (GNL), existen diversas limitaciones que deben superarse para su aplicación a gran escala. En primer lugar, el costo de producción de materiales como los marcos metal-orgánicos (MOFs) y los nanotubos de carbono (CNTs) es elevado, lo cual restringe su escalabilidad económica (Alguacil, 2024) (Norouzbahari, Mehri Lighyan, Ghadimi, & Sadatnia, 2023). En segundo lugar, aunque la funcionalización química de ciertos materiales, como el grafeno, permite mejorar sus propiedades adsorbentes, esta práctica requiere técnicas especializadas y aún se encuentra en etapas experimentales (Mazri, 2023).

Además, la escalabilidad sigue siendo un desafío técnico, ya que la producción masiva de nanomateriales con características homogéneas no está completamente desarrollada. Por último, muchos de los estudios disponibles se basan principalmente en simulaciones computacionales, lo que limita la validación experimental de los modelos teóricos y plantea dudas sobre su comportamiento real bajo condiciones criogénicas (Imad, y otros, 2023).

Tabla 2. Comparativo: Nanomateriales para Adsorción de Metano CH₄.

Característica	Carbón Activado	Grafeno Funcionalizado	Marcos Metal-Orgánicos	Nanotubos de Carbono
Capacidad Máxima de Adsorción (mmol/g)	0.02 mmol/g	7 mmol/g	3 mmol/g	1 mmol/g
Rango General de Capacidad (mmol/g)	0 – 0.02 mmol/g	0 – 7 mmol/g	0 – 3 mmol/g	0 – 1 mmol/g
Presión Óptima	10 bar	10 bar	~5 bar	Alta presión (>10 bar)
Temperatura Óptima	200 K (-73 °C)	200 K (-73 °C)	200 K (-73 °C)	200 K (-73 °C)
Condiciones Criogénicas Recomendadas	-160 °C (200 K), 4–6 MPa	200 K (-160 °C) 4–6 MPa	-160 °C (200 K), 4–6 MPa	-160 °C (200 K), 4–6 MPa
Constante de Afinidad (b)	0.08 /bar a 298 K	0.1 /bar a 298 K 0.2 a 298 K	0.05 /bar a 298 K	0.12 /bar a 298 K
Área Superficial Promedio	1000 m ² /g	2600 m ² /g	5000 m ² /g	1300 m ² /g
Estabilidad Térmica	Media-Baja	Media	Alta	Media
Costo de Producción	Bajo	Moderado-Alto	Alto	Alto
Sensibilidad a la Temperatura	Alta	Alta	Alta	Alta
Efecto de la Temperatura	Mayor capacidad a bajas temperaturas (200 K)	Mayor capacidad a bajas temperaturas (200 K)	Mayor capacidad a bajas temperaturas (200 K)	Mayor capacidad a bajas temperaturas (200 K)
Optimización de Condiciones	Mejor rendimiento en sistemas modulares simples	Requiere funcionalización química	Ideal para aplicaciones avanzadas	Aplicable en sistemas híbridos

Fuente: Cabrera K., Cabrera W. (2024)

Análisis del cuadro comparativo de los Nanomateriales para Adsorción GNL.

El análisis comparativo de nanomateriales para la adsorción criogénica de metano (CH₄) mostró diferencias significativas en su desempeño técnico y económico. Los marcos metal-orgánicos (MOFs) destacaron como el material más eficiente, alcanzando una capacidad promedio de 180–190 v/v a -160 °C y 4 MPa, con picos superiores a 200 v/v

en ciertos estudios. Esta alta capacidad se atribuye a su área superficial específica (>5000 m²/g), porosidad ajustable y estabilidad térmica bajo condiciones extremas.

Le siguen el grafeno funcionalizado (170 v/v), los nanotubos de carbono (CNTs, 150 v/v) y el carbón activado (140 v/v). Estos tres últimos materiales también demostraron comportamiento favorable, aunque con menor capacidad absoluta. En términos de modelos isotérmicos, la isoterma de BET fue útil para evaluar la distribución de poros, mientras que las simulaciones computacionales basadas en dinámica molecular y método Monte Carlo permitieron predecir con precisión el comportamiento real de los materiales bajo condiciones criogénicas.

Los resultados obtenidos mediante modelos matemáticos y simulaciones confirman que los MOFs son ideales para aplicaciones avanzadas donde se requiere alta densidad de almacenamiento a bajas presiones, lo cual mejora la seguridad y reduce costos operativos. Por otro lado, el carbón activado (Giraldo, Medina, Ortiz-Perez, Franco, & Cortes, 2023) sigue siendo una opción viable en contextos industriales debido a su bajo costo y amplia disponibilidad, aunque su capacidad es considerablemente inferior (Iranvandi, Tahmasebpoor, Azimi, Heidari, & Pevida, 2023).

Los CNTs mostraron buen potencial al ser funcionalizados químicamente, mientras que el grafeno funcionalizado presentó sensibilidad estructural, lo que limita su uso prolongado sin modificaciones específicas.

En general, los datos simulados coinciden con estudios experimentales previos, validando la hipótesis inicial sobre la superioridad de los MOFs en este tipo de aplicaciones (Chen, Zheng, Li, Li, & Wang, 2023) (Gu, y otros, 2023).

Discusión.

Los resultados obtenidos mediante modelos matemáticos y simulaciones confirman que los MOFs son el material más prometedor para el almacenamiento criogénico de metano, con una capacidad superior a 200 v/v a -160 °C y 4 MPa, atribuida a su elevada superficie específica (>5000 m²/g) y versatilidad estructural. Les sigue el carbón activado con 140 v/v, cuyo principal atractivo es su bajo costo y amplia disponibilidad industrial. Los CNTs registraron un valor intermedio (150 v/v), destacando por su resistencia mecánica y posibilidad de funcionalización, mientras que el grafeno funcionalizado obtuvo 170 v/v, aunque mostró cierta sensibilidad a las condiciones estructurales y de síntesis.

Desde el punto de vista técnico, los MOFs se perfilan como una solución innovadora para sistemas modulares de almacenamiento criogénico de GNL, permitiendo operar con menor presión y mayor seguridad (Zarei & Keshavarz, 2023) (Liu, y otros, 2023). Sin embargo, persisten limitaciones relacionadas con la escalabilidad y estabilidad a largo plazo en condiciones extremas, lo cual debe abordarse en investigaciones futuras. Por otro lado, el carbón activado sigue siendo una opción viable en contextos donde el factor económico sea prioritario (Giraldo, Medina, Ortiz-Perez, Franco, & Cortes, 2023) (Iranvandi, Tahmasebpoor, Azimi, Heidari, & Pevida, 2023).

Las implicaciones del estudio sugieren que la integración de nanomateriales en sistemas avanzados de almacenamiento puede contribuir significativamente a la transición energética sostenible, al optimizar cadenas de valor del gas natural, reducir costos energéticos y mejorar la seguridad operativa (de Morais, Vargas, da Silva Vaz, Cardias, & Costa, 2023). Futuras investigaciones deberían enfocarse en la funcionalización de MOFs (Hayder A. Dhahad, 2021) para aumentar su estabilidad criogénica, así como en desarrollar métodos de síntesis más económicos y escalables.

Perspectivas Futuras.

Para avanzar hacia la viabilidad técnica y económica de los nanomateriales evaluados, se recomienda enfocar esfuerzos en las siguientes líneas de investigación prioritarias:

- a. Optimización de la síntesis de MOFs: Es fundamental explorar métodos alternativos que permitan producir marcos metal-orgánicos (MOFs) con porosidad controlada, reduciendo costos de producción y mejorando su escalabilidad industrial (Hayder A. Dhahad, 2021).
- b. Modificaciones químicas del grafeno: Se sugiere investigar estrategias de funcionalización del grafeno mediante grupos polares o metales, con el fin de incrementar su afinidad hacia el metano y mejorar su desempeño bajo condiciones criogénicas (Mazri, 2023).
- c. Estabilidad térmica bajo condiciones criogénicas: Es necesario evaluar el impacto de ciclos repetitivos de enfriamiento-calentamiento sobre la integridad estructural de los nanomateriales, con especial énfasis en su durabilidad a largo plazo.
- d. Validación experimental de modelos teóricos: Aunque las simulaciones computacionales han proporcionado una base sólida, se requieren estudios experimentales que validen estos resultados y permitan calibrar con mayor precisión los modelos isotérmicos y termodinámicos utilizados.
- e. Desarrollo de sistemas modulares de almacenamiento: Una línea clave consiste en diseñar contenedores de almacenamiento basados en nanomateriales que puedan integrarse fácilmente en infraestructuras existentes, facilitando su adopción en aplicaciones reales y mejorando la seguridad operativa (Chen, Zheng, Li, Li, & Wang, 2023).

Conclusión.

El Estudio tuvo como objetivo evaluar comparativamente la capacidad de adsorción de metano en distintos nanomateriales (MOFs, grafeno funcionalizado, CNTs y carbón activado) bajo condiciones criogénicas (-160 °C, 4–6 MPa), con el fin de identificar materiales más eficientes para el almacenamiento seguro y económico del gas natural licuado (GNL).

Mediante una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2014 y 2024, se aplicaron modelos isotérmicos clásicos (Langmuir, Freundlich y BET) y simulaciones computacionales basadas en dinámica molecular y método Monte Carlo. Los resultados muestran que los MOFs son claramente el material más prometedor, alcanzando una

capacidad de adsorción superior a 200 v/v a -160 °C y 4 MPa, atribuida a su elevada superficie específica (>5000 m²/g) y versatilidad estructural (Alguacil, 2024) (Gu, y otros, 2023). Les sigue el carbón activado con 140 v/v, cuyo principal atractivo es su bajo costo y disponibilidad industrial. Los CNTs registraron un valor intermedio (150 v/v), destacando por su resistencia mecánica y posibilidad de funcionalización, mientras que el grafeno funcionalizado obtuvo 170 v/v, aunque mostró cierta sensibilidad a las condiciones estructurales y de síntesis.

Estos datos validan la hipótesis inicial sobre el desempeño superior de los MOFs. Desde el punto de vista técnico, los MOFs se perfilan como una solución innovadora para sistemas modulares de almacenamiento criogénico de GNL, permitiendo operar con menor presión y mayor seguridad (Zarei & Keshavarz, 2023).

Futuras investigaciones deberían enfocarse en la funcionalización de MOFs para aumentar su estabilidad criogénica, así como en desarrollar métodos de síntesis más económicos y escalables. Además, sería conveniente explorar combinaciones de estos nanomateriales o su uso en nanofluidos criogénicos para potenciar aún más la transferencia térmica durante la licuefacción del metano (Hayder A. Dhahad, 2021).

Referencias.

- Alguacil, F. J. (2024). Nanomaterials for CO₂ Capture from Gas Streams. *Separations*, 11(1), 1. doi:<https://doi.org/10.3390/separations11010001>
- Ali, N., Babar, A., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2023). Hollow, porous, and flexible Co₃O₄-doped carbon nanofibers for efficient CO₂ capture. *Adv. Eng. Mater*, 25, 2201335.
- Chen, H., Zheng, Y., Li, J., Li, L., & Wang, X. (2023). AI for nanomaterials development in clean energy and carbon capture, utilization and storage (CCUS). *ACS Nano*, 17, 9763–9792.
- De Moraes, M., Vargas, B., da Silva Vaz, B., Cardias, B., & Costa, J. (2023). Advances in the synthesis and applications of nanomaterials to increase CO₂ biofixation in microalgal cultivation. *Clean Technol. Environ*, 25, 617–632.
- Giraldo, L., Medina, O., Ortiz-Perez, V., Franco, C., & Cortes, F. (2023). Enhanced carbon storage process from flue gas streams using rice husk silica nanoparticles: An approach in shallow coal bed methane reservoirs. *Energy Fuels*, 37, 2945–2959.
- Gu, Y.-M., Wang, Y.-H., Zhao, S.-S., Fan, H.-J., Liu, X.-W., Lai, Z., & Wang, S.-D. (2023). N-donating and water-resistant Zn-carboxylate frameworks for humid carbon dioxide capture from flue gas. *Fuel*, 336, 126793.
- Hayder A. Dhahad, N. F. (2021). techniques, Potential application of metal-organic frameworks (MOFs) for hydrogen storage: Simulation by artificial intelligent. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(73), 36336-36347. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.167>
- He, Y., Wang, Z., Cao, A., Xu, X., Li, J., Zhang, B., & Kang, L. (2023). Construction of graphene oxide-coated zinc tetraphenylporphyrin nanostructures for photocatalytic CO₂ reduction to highly selective CH₄ product. *J. Colloid Interface Sci*, 638, 123–134.
- Imad, M., Castro-Muñoz, R., Bernauer, M., Martin, V., Izak, P., & Fila, V. (2023). Zr-based metal-organic framework UiO-66/Ultem® 1000 membranes for effective CO₂/H₂ separation. *Chem. Eng. Technol*, 46, 2046–2053.
- Iranvandi, M., Tahmasebpoor, M., Azimi, B., Heidari, M., & Pevida, C. (2023). The novel SiO₂-decorated highly robust waste-derived activated carbon with homogeneous fluidity for the CO₂ capture process. *Sep. Purif. Technol*, 306, 122625.
- Liu, Z., Lu, Y., Wang, C., Zhang, Y., Jin, X., Wu, J., Sun, H. (2023). MOF-derived nano CaO for highly efficient CO₂ fast adsorption. *Fuel*, 340, 127476.

- Luo, W. L. (2023). From 2D to 3D nanomaterial-based composite membranes for CO₂ capture: Recent advances and perspectives. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110657.
- Mashtizadeh, A. R. (2025). Carbon Nanomaterials for Electrochemical Hydrogen Storage: Mechanisms and Advancements. *Inorganics*, 13(4), 125. doi:<https://doi.org/10.3390/inorganics13040125>
- Mazri, N. A. (2023). Graphene and its tailoring as emerging 2D nanomaterials in efficient CO₂ absorption: A state-of-the-art interpretative review. *Alexandria Engineering Journal*.
- Norouzbahari, S., Mehri Lighyan, Z., Ghadimi, A., & Sadatnia, B. (2023). ZIF-8@Zn-MOF-74 core-shell metal-organic framework (MOF) with open metal sites: Synthesis, characterization, and gas adsorption performance. *Fue*, 339, 127463.
- Tian, C., Liu, X., Liu, C., Li, S., Li, Q., Sun, N., Xuan, Y. (2023). Air to fuel: Direct capture of CO₂ from air and in-situ solar-driven conversion into syngas via Nix/NaA nanomaterials. *Nano Res*, 16, 10899–10912.
- Wang, S.-L., Xiao, Y.-Y., Zhou, S.-D., Jiang, K., Yu, Y.-S., & Rao, Y.-C. (2023). Synergistic effect of water-soluble hydroxylated multi-wall carbon nanotubes and graphene nanoribbons coupled with tetra butyl ammonium bromide on kinetics of carbon dioxide hydrate formation. *Energies*, 16, 5831.
- Yang, H., Chen, G., Cheng, L., Liu, Y., Cheng, Y., Yao, H., Jin, W. (2023). Manipulating gas transport channels in graphene oxide membrane with swift heavy ion irradiation. *Purif. Technol*, 320, 124136.
- Zarei, F., & Keshavarz, P. (2023). Intensification of CO₂ absorption and desorption by metal/non-metal oxide nanoparticles in bubble columns. *Environ. Sci. Pollut.*, 30, 19278–19291.