



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CO₂ EN ZEOLITA MORDENITA

TESIS

Para obtener el título en la
licenciatura de
INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

MIGUEL ÁNGEL MINTO ROJAS

Directora de tesis: Dra. María de los Ángeles
Velasco Hernández

Codirectora de tesis: Dra. Karin Monserrat
Álvarez Gómez

09/2025

Índice

| | |
|---|----|
| Introducción | 3 |
| Justificación | 4 |
| Objetivo general | 6 |
| Objetivos específicos | 6 |
| Hipótesis | 7 |
| CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO | 8 |
| Cambio climático | 8 |
| Propiedades fisicoquímicas del CO ₂ | 9 |
| Legislación nacional | 11 |
| Legislación internacional | 12 |
| Zeolitas naturales | 13 |
| Usos de las zeolitas naturales | 14 |
| Zeolita mordenita | 15 |
| Adsorción | 17 |
| Isotermas de adsorción | 18 |
| Cromatografía de gases | 21 |
| Cromatografía de gases inversa | 22 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA | 23 |
| Preparación del material | 23 |
| Tratamientos de la zeolita mordenita | 23 |
| Aplicación de la cromatografía de gases inversa | 24 |
| Condiciones de trabajo | 27 |
| Métodos de cálculo | 28 |
| CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 32 |
| Difracción de rayos X | 32 |
| Microscopía electrónica de barrido | 33 |
| EDS | 34 |
| Isotermas de adsorción | 34 |
| CONCLUSIONES | 44 |
| BIBLIOGRAFÍA | 46 |
| ANEXOS | 50 |

Introducción

En los años actuales en los que vivimos, el calentamiento global avanza de manera implacable, a pesar de los esfuerzos que como sociedad hemos implementado para minimizar el impacto ambiental que generamos diariamente. Las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera continúan en aumento. Según la ONU (2021), a pesar de las medidas adoptadas a nivel mundial, aún estamos lejos de alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. La temperatura global sigue en ascenso, y tanto los recursos hídricos como los ecosistemas enfrentan amenazas cada vez mayores.

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera han alcanzado niveles sin precedentes, superando las 410 partes por millón (ppm) durante la primera mitad de 2020, según los datos de la Organización Meteorológica Mundial (2020). Aunque el vapor de agua es el principal gas de efecto invernadero, el CO₂ es el segundo más importante, a pesar de que su concentración en la atmósfera es mínima, apenas un 0.035 % (Sposob, 2024).

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2021), el cambio climático también puede agravar la calidad del aire en interiores y empeorar algunos de los problemas ambientales ya existentes, además de generar nuevas dificultades a medida que las condiciones externas se tornan más extremas o frecuentes.

En este contexto y en la industria, diversas aplicaciones utilizan materiales sólidos con poros de dimensiones moleculares (microporos), como adsorbentes selectivos, gracias a la especificidad fisicoquímica que ofrecen frente a determinadas moléculas, los poros se dividen en tres categorías principales: microporos, cuyo diámetro es inferior a 2 nanómetros (nm); mesoporos, con un diámetro que varía entre 2 y 50 nm; y macroporos, que poseen un diámetro superior a 50 (nm). Gracias a esta distinción crucial, se pueden comprender las propiedades de los materiales, ya que el tamaño de los poros afecta directamente a fenómenos como el área superficial, la capacidad de adsorción y la cinética de difusión de gases y líquidos (Thommes et al., 2015). Entre

estos materiales se encuentran los carbones activados, sílice microporosa y zeolitas (Clean Air Technology Center, 2022). En la presente tesis se hace un estudio estructural, espectroscópico y morfológico con el fin de conocer las características del material zeolítico, para ello se emplean las técnicas de difracción de rayos X (DRX), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para conocer su estructura porosa y asegurar su eficacia, así como la microscopía electrónica de barrido, para su evaluación por el método de cromatografía de gases inversa.

Justificación

Actualmente, el gas CO₂ es uno de los que más se ocupa alrededor del mundo siendo de los más importantes contaminantes a nuestra atmosfera provocando diferentes inconvenientes como enfermedades respiratorias, agujero en la capa de ozono entre otros factores, por lo que se necesita una o diferentes alternativas que disminuyan este tipo de contaminación obteniendo una mitigación y adaptación de este gas (Romero, 2022).

Cabe mencionar que hay un cambio negativo de la calidad del aire en ambientes cerrados, esto debido a varios factores, como la densidad de personas laborando en un mismo lugar, la deficiente ventilación, el uso excesivo de aerosoles sanitizantes y el uso prolongado de dispositivos electrónicos (Atkinson et al; 2018).

En el ámbito de la salud ambiental, mantener una buena calidad del aire en espacios interiores concurridos es crucial. Además, en estos entornos, donde las personas pasan gran parte de su tiempo, existen múltiples variables de riesgo que influyen en la transmisión de enfermedades y que, a menudo, no se conocen bien, según la (OMS, 2019). En la figura 1 infografía de la OMS señala que cada año se producen aproximadamente 7 millones de muertes prematuras debido a la contaminación en espacios tanto abiertos como cerrados, por lo tanto, se debe considerar el concientizar sobre la gravedad de la contaminación del aire y los efectos que genera en la salud global (OMS, 2018).

Las zeolitas poseen diversas propiedades, como por ejemplo la capacidad de intercambio iónico selectivo y la habilidad de adsorber moléculas en su gran área interna, siempre y cuando estas

puedan pasar por sus poros. Debido a este tamaño de poro uniforme, la zeolita puede funcionar como un tamiz molecular. Entre las zeolitas naturales, algunas destacan por su bajo costo, abundancia, pureza y fácil disponibilidad, lo que las convierte en materiales prometedores para múltiples procesos industriales contemporáneos (Núñez, 2021). Gracias a que cuentan con estas características las hacen un material excelente para ser aplicado en la descontaminación del aire. Mediante diferentes tipos de tratamientos químicos como el uso de HCl y AgNO₃ los cuales se ocupan para activar y caracterizar la zeolita y así mejorar su eficiencia como adsorbedor de gases, con el fin de utilizarla como un medio de purificación (Wilmer et al., 2014). Por otra parte, el hacer pruebas con la zeolita natural sin ningún tratamiento químico puede ser benéfico en la presente investigación.



Figura 1. Muertes por contaminación del aire, Organización Panamericana de la Salud (2018).

Objetivo general

Analizar la capacidad de adsorción que tiene la zeolita mordenita natural y modificada químicamente con HCl y AgNO₃ aplicando la cromatografía de gases inversa para obtener una mejor calidad del aire.

Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar el material zeolítico natural y modificado por EDS que se aplicara en la columna como fase estacionaria en la cromatografía de gases inversa.
- ✓ Realizar pruebas con el cromatógrafo de gases, inyectando CO₂ a temperaturas de 350° C disminuyendo las temperaturas hasta llegar a 210° C.
- ✓ Estimar la capacidad de adsorción de las zeolitas estudiadas, a través de las ecuaciones pertinentes: Freundlich, Langmuir , Henry y Clausius-Clapeyron.

Hipótesis

El uso de la mordenita activada mediante tratamientos térmicos y químicos permitirá la adsorción favorable para la captación de CO₂ del aire, mediante el proceso de cromatografía de gases inversa debido a que la mordenita es un material poroso que absorbe CO₂ por su tamaño de poro. Los canales de la mordenita son de tamaño nanométrico, lo que contribuye a su área superficial y alta porosidad.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

Cambio climático

El efecto invernadero es un proceso natural que ocurre en la atmósfera de la Tierra, donde ciertos gases como lo son el (CO_2 , el CH_4 y $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$) atrapan el calor del Sol y lo retienen cerca de la superficie; consiste en la absorción de la radiación térmica que emite la superficie terrestre por ciertos gases. Luego, parte de esta radiación térmica es devuelta a la tierra, y calienta la superficie más de lo que debería. Las emisión de gases, entre ellos el CO_2 , se ha incrementado de manera alarmante en el último siglo. Se estima que la concentración de CO_2 en la atmósfera ha ascendido en casi 100 ppm en los últimos 150 años (Álvarez, 2024).

Esto se relaciona con el aumento de la temperatura en la Tierra y con una serie de daños concomitantes (fusión de los casquetes polares, cambios en la vegetación natural, cambios en las especies animales, etc.). La mayor parte del dióxido de carbono (CO_2) emitido a la atmósfera proviene de procesos industriales, principalmente de la quema de combustibles (fósiles) en países más desarrollados (Álvarez, 2024).

A lo largo de las últimas décadas, la actividad humana (principalmente), ha provocado un aumento notable de los gases de efecto invernadero, lo que se considera la causa del incremento en la temperatura promedio de la atmósfera. Este aumento de temperatura tiene graves consecuencias, afectando la dinámica del clima, la biodiversidad y la calidad de vida en todo el planeta (Sposob, 2024).

Es un proceso natural definido como el conjunto de fenómenos, cambios o transformaciones que ocurren en la naturaleza sin la intervención consciente o directa del ser humano, que ocurre en la atmósfera del planeta y que es necesario para el desarrollo de la vida en la Tierra ; sin embargo, el desequilibrio del efecto invernadero es generado por la actividad del ser humano, como la disminución de los bosques por la deforestación indiscriminada, entre otras actividades (Sposob, 2024) siendo esta una forma consciente del ser humano de destruir el planeta que le aporta su sobrevivencia. Por otro lado, durante la Segunda Revolución Industrial, a mediados del siglo XVIII,

los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera empezaron a aumentar rápidamente. Este incremento también se debe a la deforestación a nivel mundial o tala (indiscriminada), ya que los árboles, al captar CO₂ y convertirlo en oxígeno mediante el proceso de la fotosíntesis, ayudan a regular la concentración de este gas. Al haber menos árboles, se reduce esta capacidad natural de la Tierra para absorber CO₂ (Sposob, 2024). A continuación, algunas consecuencias e impactos del cambio climático son:

- Cambios en los patrones de precipitaciones.

El cambio climático ha alterado la dinámica de las lluvias a nivel mundial, lo que ha llevado a inundaciones y sequías más frecuentes e intensas en diferentes regiones del mundo, las cuales se han vuelto más vistosas en ciudades.

- Cambios en los ecosistemas.

El cambio climático ha producido severos cambios ecológicos que incluyen la pérdida de la biodiversidad y tristemente en la extinción de muchas especies.

- Aumento de la temperatura de los océanos.

El cambio climático afecta la vida marina y los ecosistemas acuáticos. Además, favorece el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos que se alimentan de agua cálida, como los huracanes y las tormentas tropicales.

- Deterioro de la salud humana.

El cambio climático afecta la salud humana por la contaminación del aire, la exposición a altas temperaturas y olas de calor, la falta de agua, las inundaciones, la transmisión de enfermedades, entre muchos otros acontecimientos.

Propiedades fisicoquímicas del CO₂

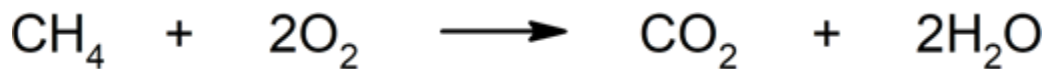
El CO₂ es una molécula lineal y no polar, a pesar de tener enlaces polares. Esto se debe a que, dada la hibridación del carbono, la molécula posee una geometría lineal y simétrica. Su representación por estructura de Lewis es: O=C=O. A pesar de que el CO₂ existe principalmente en su forma gaseosa, también tiene forma sólida y líquida. Solo puede ser sólido a temperaturas de -78 °C. El CO₂ líquido existe principalmente cuando se disuelve en agua y solamente es soluble

en agua cuando la presión se mantiene. Cuando la presión desciende intentará escapar al aire, dejando una masa de burbujas de aire en el agua (Prtr-España, s. f.). El CO₂ es un gas que se encuentra en muy baja concentración atmosférica de manera natural, es un ingrediente necesario en el ciclo de vida de animales y plantas, se libera en la respiración de los seres vivos y es retenido por las plantas en forma de carbono a través de la fotosíntesis.

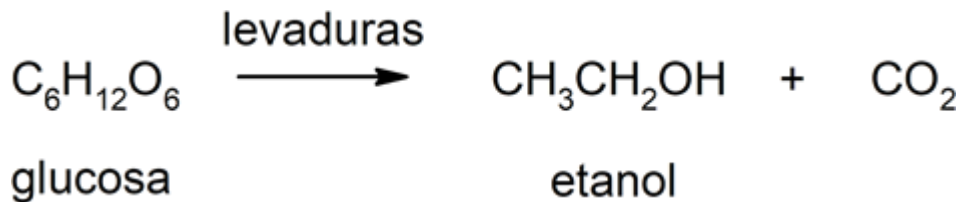
Usos del Dióxido de Carbono (CO₂) en su forma sólida. El dióxido de carbono en su estado sólido se conoce como hielo seco y se obtiene a muy bajas temperaturas. Es un refrigerante muy eficaz porque, a diferencia del hielo de agua, no deja residuos líquidos al calentarse, sino que se transforma directamente en gas. Esta propiedad ayuda a reducir la contaminación microbiana en productos frescos. Además de su uso como refrigerante, el CO₂ es poco reactivo y no inflamable, por lo que es ideal para usarlo en extintores. Como no conduce la electricidad, es especialmente útil para apagar incendios donde existe riesgo de electrocución (Álvarez, 2024).

El CO₂ se forma a partir de diversos procesos, se destacan entre ellos:

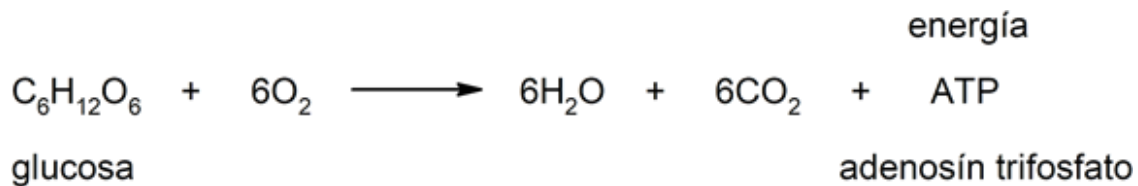
- Combustión. La combustión de materiales fósiles y no fósiles, como petróleo, carbón, gas, produce CO₂. Por ejemplo: la combustión del metano (CH₄).



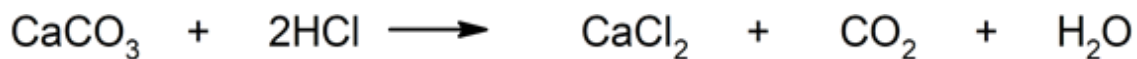
- Fermentación. La fermentación de azúcares que realizan bacterias y levaduras, por lo general conduce a la formación de ácidos y/o alcoholes y de CO₂. Por ejemplo: la fermentación alcohólica.



- Respiración. La respiración de los animales consiste en tomar oxígeno y liberar CO₂. Por ejemplo: la respiración celular.



- Reacción de carbonatos con ácidos. Algunas sales, como los carbonatos, pueden reaccionar con ácidos y formar CO₂. Por ejemplo: reacción del carbonato de calcio (CaCO₃) y el ácido clorhídrico (HCl).



Legislación nacional

La NORMA Oficial Mexicana NOM-163-SEMARNAT-SCFI-2023, la cual trata de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provenientes del escape y es aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3,857 kilogramos.

La presente Norma Oficial Mexicana establece los parámetros y la metodología para el cálculo de los promedios corporativos metas y observación de las emisiones de CO₂ expresados en gramos de CO₂ por kilómetro (g CO₂/km).

LEY GENERAL DE CAMBIO CLIMÁTICO (LGCC): El objeto de esta ley es el siguiente: I. Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático regulación y mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para contribuir a la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera, considerando los compromisos internacionales de México. (Ley General de Cambio Climático, 2012).

Legislación internacional

La legislación internacional ha jugado un papel fundamental en la lucha global contra el cambio climático, enfocándose en la reducción de las emisiones de CO₂. Dos de los acuerdos más importantes que han liderado estos esfuerzos son el (Protocolo de Kioto de 1997) y el Acuerdo de (París de 2015). El Protocolo de Kioto fue el primer acuerdo vinculante que comprometió a los países desarrollados a reducir sus emisiones, creando mecanismos de flexibilidad como el Mecanismo de Desarrollo Limpio, que busca la inversión de los países en proyectos que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, con el fin de disminuir las emisiones globales en un 5% como objetivo general. Esta ley entró en vigor en 2005, sin embargo, uno de los principales retos fue que no todos los países asumieron el compromiso, generando un bajo impacto global. Por su parte, el acuerdo de París llegó como remplazo representando un avance significativo ya que estableció un marco inclusivo al involucrar a casi todos los países del mundo. El objetivo principal de este es mantener los aumentos de temperatura global por debajo de los 2°C, así como alcanzar la neutralidad de carbono para la segunda mitad del siglo XXI. Se implementa en ciclos de 5 años mediante la Contribución Determinada a Nivel Nacional, esto es un plan nacional de acción climática en el que cada país se compromete a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, (United Nations. s. f. S/A).

Además de los acuerdos globales también se han implementado mecanismos como los mercados de carbono y el comercio de emisiones, lo cual incentiva a empresas y países a la reducción de CO₂ de manera eficiente, impactando incluso en sectores de aviación o marítimos. También se cuenta con normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO) que proporcionan estándares globales para medir, gestionar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, buscan ser una herramienta para las organizaciones que buscan cumplir con las regulaciones sobre el cambio climático. Las normas ISO en conjunto complementan los esfuerzos de cada acuerdo internacional al proporcionar un estándar para la medición, gestión y reducción de las emisiones de CO₂ de forma transparente y verificable; entre las más relevantes están, (ISO 14067) que se centra en la cuantificación de la huella de carbono de los productos, permitiendo un análisis de las emisiones a lo largo del ciclo de vida de este. (ISO 14064), proporciona directrices

para poder cuantificar, informar y verificar las emisiones y reducciones de gases de efecto invernadero. Finalmente, la (ISO 50001), gestiona la energía en las organizaciones, busca mejorar la eficiencia energética y con ello contribuir indirectamente en la reducción de emisiones (ISO 14067:2018).

Zeolitas naturales

El término zeolita viene del griego zéo y líthos que quiere decir piedra que hierve o piedra efervescente. Las zeolitas son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos predominantemente de sodio y calcio (Clarke, 1980). Las zeolitas naturales poseen una estructura microporosa que les confiere propiedades adsorbentes y una notable capacidad de intercambio catiónico, la cual se debe a un desequilibrio de cargas determinado por la proporción de Si y Al en su composición. Gracias a estas características, las zeolitas se utilizan en diversas aplicaciones ambientales, como la eliminación de metales pesados en efluentes mineros y el tratamiento de drenaje ácido de minas y rocas . También son eficaces para la adsorción de vapores de mercurio en hornos y para el tratamiento de suelos y líquidos contaminados con radiación provenientes de centrales nucleares (Curi et al., 2006). Las zeolitas naturales se originan por la precipitación de fluidos en los poros de las rocas o por la alteración de materiales volcánicos. La formación de sus diferentes especies es determinada por factores como la presión, la temperatura, la actividad de especies iónicas y la presión parcial del agua. Aunque se conocen alrededor de 40 especies naturales, solo unas cuantas se usan ampliamente, incluyendo la mordenita, clinoptilolita, phillipsita, erionita y chabasita (Jiexiang y Surent, 1993).

La mayoría de las ocurrencias de zeolita pueden ser encontradas en uno de los seis ambientes geológicos (Clifont, 1987; Luz, 1994; Mumpton, 1973; Sheppard, 1975). Estos son: salino o lagos alcalinos, suelos alcalinos, diagenético, sistema abierto, hidrotermal y sedimentos marinos.

Las propiedades más relevantes de las zeolitas naturales son: porosidad, adsorción e intercambio iónico. Las zeolitas son estructuradas en redes cristalinas tridimensionales, compuestas de tetraedros del tipo TO₄ (T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co ...) unidos en los vértices por un átomo de oxígeno.

Usos de las zeolitas naturales

Las zeolitas naturales son minerales muy utilizados en la industria debido a sus propiedades únicas, usadas principalmente como adsorbentes comerciales, un ejemplo es el secado de gases y líquidos, los procesos de adsorción son utilizados ampliamente en la industria con el objetivo de purificar los efluentes para el mejoramiento de las materias primas. Una de las ventajas de las zeolitas es que pueden adsorber cantidades de agua que otros adsorbentes no pueden hacer, a bajas presiones la zeolita también muestra capacidad de adsorción significativa para vapores de agua (Curi et al., 2006). Las zeolitas poseen la capacidad de adsorber moléculas cuyos diámetros críticos son menores que el tamaño de sus aberturas de entrada, mientras que las moléculas de mayor tamaño no logran ser adsorbidas (Mumpton et al., 1999). Gracias a esta propiedad, el secado mediante zeolitas naturales puede realizarse tanto en fase gaseosa como en fase líquida. Otro de los usos de estas zeolitas es en los sistemas de purificación de gases, en la actualidad hay varios tipos de sistemas de purificación de gases que implican la adsorción debido a que estos adsorbentes pueden capturar impurezas y la purificación de algunos componentes. Entre la gran variedad de adsorbentes los más selectivos para los compuestos polares e insaturados son las zeolitas naturales, mientras que las zeolitas con alto contenido de sílice son altamente resistentes a los ácidos y térmicamente estables, permitiendo la purificación de gases a altas temperaturas (Wang et al., 2018).

Una de las grandes propiedades que tienen las zeolitas naturales en la purificación de gases es que muestran una alta selectividad por el nitrógeno molecular en mezclas binarias de O_2-N_2 , dado que esta selectividad está definida por la composición catiónica que tienen las zeolitas naturales. Una de las zeolitas que sirve para separar estos gases es la zeolita mordenita siendo mejor que las zeolitas sintéticas. Debido a su gran propiedad de las zeolitas naturales, son utilizadas para la fabricación de adsorbedores para el enriquecimiento del oxígeno que se encuentra en el aire. Además del uso de las zeolitas en la industria, estas también tienen usos en la agricultura, el tratamiento de aguas y la fabricación de fertilizantes. En la agricultura las zeolitas naturales son un material excelente para el mejoramiento del suelo ayudando también en la calidad y la retención de nutrientes en el mismo (Usos de las Zeolitas Naturales, s.f.). Una de las importancias

de estas zeolitas es su estructura porosa única la cual permite que estas funcionen como tamices moleculares haciéndolas útiles en diferentes usos en la industria.

Zeolita mordenita

La mordenita es un mineral de apariencia fibrosa de color blanco, amarillento o rosado con diversas aplicaciones por sus propiedades adsorbentes. Es útil para el saneamiento ambiental, como fertilizante y como material de construcción. En procesos químicos se usa como tamiz molecular y catalizador. Se encuentra asociado a otros minerales como calcita, caolinita, glauconita y cuarzo. La mordenita es un mineral de la clase de los tectosilicatos, y dentro de esta pertenece al llamado “grupo de las zeolitas”. Fue descubierta en 1864 en la pequeña localidad de Morden de la bahía de Fundy en el condado de Kings, en Nueva Escocia. La estructura de la mordenita se caracteriza por la presencia del poro : canal principal de 12 miembros con un acceso libre de 0.65 x 0.7 nm, y otro canal secundario de 8 miembros con una ventana de entrada de 0.26 x 0.57 nm. Cadenas de tetraedros de silicio y aluminio que se enlazan formando anillos de cinco miembros, generando una red tridimensional estable (Hernández et al., 2010).

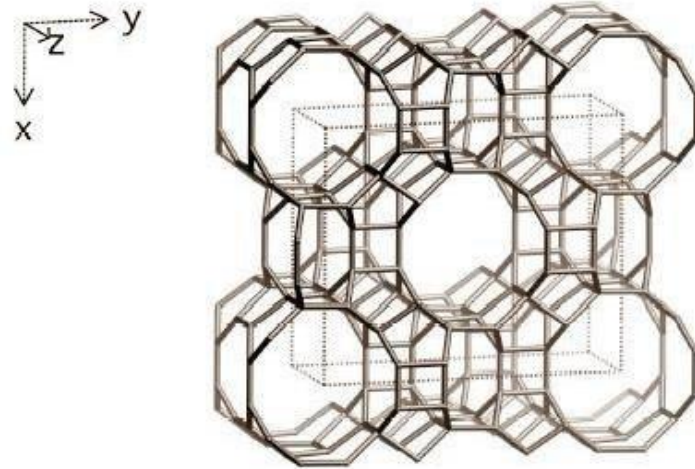


Figura 2. Estructura de la mordenita (Chourio et al., 2006).



Figura 3. Mordenita natural ICUAP (2025).

En 1972, Mumpton, F. realizó en México el primer descubrimiento de un yacimiento de zeolitas de origen sedimentario (clinoptilolita y mordenita). En el Valle del río Atoyac, a 15 kilómetros al noroeste de la ciudad de Oaxaca y a 3 kilómetros al norte del poblado de Etlá. Se encuentra en rocas ígneas de tipo andesita, formando vetas y cavidades amigdaloides. Aparece también como producto secundario de la hidratación de vidrio volcánico. En sedimentos aparece como mineral antigénico (Shuwen, 2003). Los parámetros texturales de la zeolita mordenita consisten en:

- Porosidad
- Superficie específica
- Volumen total de poros
- Volumen de microporos
- Rugosidad
- Forma y tamaño de poros
- Permeabilidad

Adsorción

La adsorción es un fenómeno superficial que se puede definir como el enriquecimiento de uno o más componentes en la región entre dos fases, conocida como interfase o capa interfacial. En el presente contexto, una de las fases es necesariamente un sólido, el adsorbente, y la fase móvil un fluido, que puede ser gas o líquido. El compuesto que se concentra en la superficie se denomina adsorbato, y la sustancia en la fase fluida capaz de ser adsorbida es el adsorbente. Si el adsorbato es un gas, éste puede ser un compuesto puro o una mezcla. Si la fase fluida es un líquido, éste puede ser un componente puro, una mezcla de líquidos miscibles o una disolución.

Adsorción – Química industrial (s. f. S/A).

La adsorción es originada por un cuerpo sólido y las moléculas de gas. Esto dependerá del tipo de poros, tamaños y naturaleza química. En el caso particular de la adsorción en poros de tamaño similar a los que son adsorbidos se llama llenado de microporos (Sing et al., 2011).

Adsorción y desorción son términos usados para indicar la dirección de ciertas cantidades adsorbidas que han sido calculadas, con referencia en las curvas. Los ciclos de histéresis de

adsorción se generan cuando la curva de adsorción o curva límite ascendente y la curva límite de desorción descendente no coinciden (Thommes, 2015).

Isotermas de adsorción

Una isoterma es la relación entre la cantidad de gas adsorbido por un sólido, a temperatura constante como una constante. A su vez, la cantidad de sustancia adsorbida se define como el exceso en moles sobre la capa superficial, relacionado a 1cm^2 de superficie o bien 1 g de adsorbente y se designa la con la letra “a”, por lo tanto, las unidades de adsorción son mol/cm^2 o mol/g (Aguilar, 1985).

La IUPAC en 1985/2015 realizó una clasificación de 6 isotermas de fisisorción. Al pasar los años se han encontrado nuevas características para estas isotermas ya que se encuentran relacionadas con las estructuras particulares de los poros (Figura 4).

La IUPAC definió el tamaño de los poros de un sólido en tres tipos: microporos, mesoporos y macroporos:

- Microporos: Dimensiones inferiores a 2 nanómetros
- Mesoporos: Dimensiones entre 2 y 50 nanómetros
- Macroporos: Dimensiones superiores a 50 nanómetros

La isoterma de adsorción es la relación entre la concentración de gas adsorbido y la presión a la que está en equilibrio a temperatura constante. La isoterma de adsorción refleja la interacción entre la superficie del sólido y las moléculas de gas.

Algunos tipos de isotermas son:

- Isoterma de Henry
- Isoterma de Freundlich

- Isoterma de Langmuir
- Isoterma de Temkin
- Isoterma de Gibbs
- Modelo BET

Tipo I

El adsorbato cubre al adsorbente, el cual tiene una superficie uniforme, hasta que se forma una monocapa y entonces el proceso se detiene. La gran mayoría de los procesos de quimisorción muestran este tipo de isoterma (Figura 4 - I).

Tipo II

El adsorbato cubre al adsorbente hasta que se forma una monocapa y el proceso continúa con adsorción en multicapas. Es un perfil frecuente en procesos de adsorción física en los cuales las interacciones son poco específicas. Para que se produzca este tipo de comportamiento es necesario que la afinidad del adsorbato por el adsorbente sea algo mayor que la afinidad del adsorbato por sí mismo (Figura 4 - II).

Tipo III

El adsorbato tiene aproximadamente la misma afinidad por el adsorbente y por sí mismo, o es ligeramente más afín a sí mismo que al adsorbente, por lo cual es una vez que se ha adsorbido una molécula ésta actúa también como sitio libre para que otra molécula se adsorba. Esto conduce a un recubrimiento desigual, con partes limpias, partes cubiertas con monocapa y partes cubiertas con multicapa (Figura 4 - III).

Tipo IV

En este caso el comportamiento inicial consiste en formar una monocapa, para luego mostrar comportamiento de formación de multicapas hasta alcanzar un espesor de multicapa máximo a una presión máxima P_0 . Este comportamiento se justifica postulando un adsorbente rugoso en el cual la monocapa inicial deja muchos huecos, que terminan por saturarse de adsorbato al alcanzar la presión P_0 (condensación capilar) (Figura 4 - IV).

Tipo V

En este caso el comportamiento inicial consiste en formar una multicapa hasta alcanzar un "espesor de multicapa" máximo. Este comportamiento se justifica postulando un adsorbente rugoso, como en el caso IV, y un adsorbato que interactúa débilmente con el adsorbente (Figura 4 - V).

Tipo VI

Este tipo de isoterma muestra un comportamiento escalonado, donde la adsorción ocurre en capas discretas. Es característica de la adsorción en superficies muy uniformes donde las interacciones adsorbato-adsorbato son fuertes y se forman multicapas bien definidas (Figura 4 – VI).

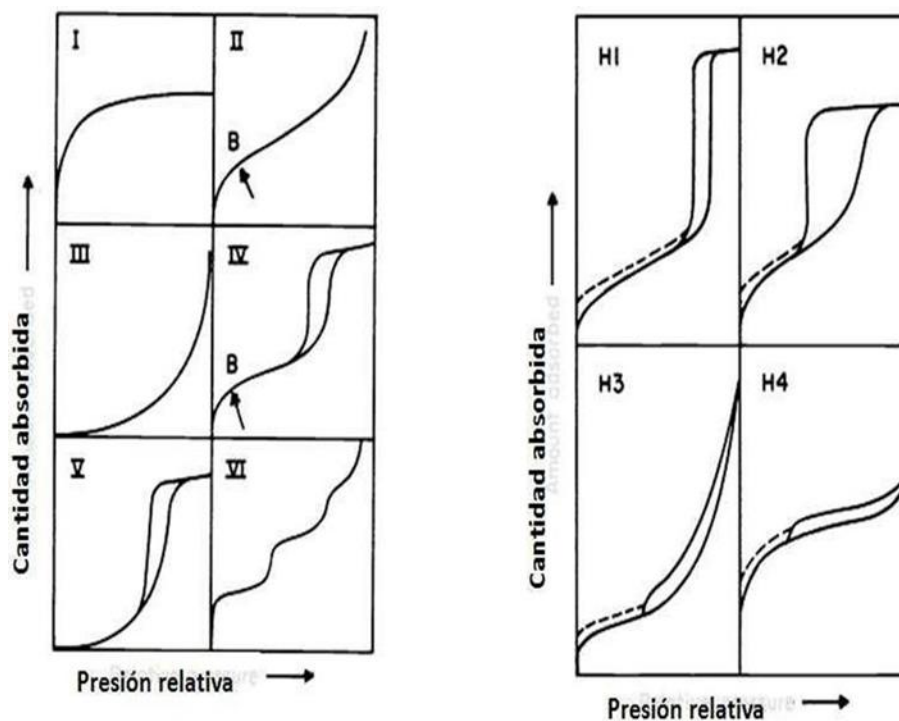


Figura 4. A) Tipos de isothermas de adsorción. B) Ciclo de histéresis según la clasificación de la IUPAC.

Cromatografía de gases

La cromatografía es una técnica muy utilizada hoy en día, de acuerdo con la unión internacional de química pura y aplicada (IUPAC, s/a) la define como un método físico de separación en que los componentes a separar se distribuyen en dos fases, una fase estacionaria y una fase móvil. La cromatografía de gases es una técnica analítica ampliamente utilizada en la industria para el control de calidad, así como para la identificación y cuantificación de compuestos volátiles en una mezcla. El proceso se lleva a cabo en un cromatógrafo de gases, donde la muestra se inyecta y es transportada por un gas portador inerte a través de una columna. La separación de los componentes ocurre porque cada uno interactúa de forma diferente con una fase estacionaria que se encuentra dentro de la columna, lo que provoca que viajen a distintas velocidades. Esta diferencia en la velocidad de elución permite que los componentes se separen y puedan ser analizados de manera individual al salir de la columna. (Martínez, 2025). De esa manera, la cromatografía emplea diversas técnicas que aprovechan las diferencias en la velocidad de retención de cada componente, y puede separarlos, identificarlos y cuantificarlos.

Cromatografía de gases inversa

La cromatografía de gases inversa (CGI) es una técnica especializada que se diferencia de la cromatografía de gases convencional porque su objetivo principal no es analizar la muestra inyectada, sino caracterizar la fase estacionaria misma. En lugar de usar la columna para separar compuestos, la CGI se enfoca en estudiar las propiedades de la fase estacionaria (que puede ser un material, fibra o película), utilizando los compuestos inyectados como sondas para obtener información sobre su superficie, sus interacciones y su estructura. El material de la fase estacionaria puede colocarse directamente en la columna, ya sea empaquetado, recubriendo un soporte o adhiriéndose a las paredes internas. Esta configuración permite estudiar las interacciones del material con líquidos o vapores volátiles conocidos, llamados "sondas". La fuerza de esta interacción se mide cuantificando el tiempo de retención de la sonda, lo que indica qué tan fuertemente se adhiere al material (Santos & Guthrie, 2005). La CGI puede proporcionar información sobre parámetros termodinámicos, energía superficial, cinética de reacción y parámetros texturales, como el área superficial y porosidad; En la cromatografía de gases inversa, la fase sólida es la que se estudia, ya que está enfocado en las características del material poroso, esto a partir de gases simples con propiedades fisicoquímicas ya conocidas, las cuales nos ayudaran como referencia al comportamiento de nuestro material como adsorbente (Osuna, 2010).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Preparación del material

En este estudio se utilizaron muestras de zeolita mordenita provenientes de yacimientos de La Magdalena Apasco, Oaxaca, México. Estas zeolitas, almacenadas en el departamento de Zeolitas del ICUAP, fueron seleccionadas por sus propiedades adsorbentes ya demostradas en investigaciones previas, lo que las hace adecuadas para la experimentación. En la Figura 5 se muestra la mordenita natural sin ningún tratamiento, la cantidad de muestra se observa en la Figura 6 y el tamaño utilizado para los diferentes tratamientos se observa en la Figura 7 (Hernández et al., 2020).



Figura 5. Muestra de zeolita Mordenita sin tratamiento ICUAP elaboración propia. (2024).

Tratamientos de la zeolita mordenita

La zeolita mordenita ha sido modificada químicamente con ácido clorhídrico y con nitrato de plata. La presente investigación se desarrollará por el método científico, de acuerdo con el siguiente procedimiento: Reactivos y Materiales: El reactivo HCl de la marca MEYER al 98% de pureza y AgNO_3 fue suministrado por Fermont a una concentración de 37.5%. Los gases N_2 y He (> 99.999%, INFRA Corp.) fueron de alta pureza para los estudios texturales de adsorción en las zeolitas estudiadas.

Activación y tratamiento de la muestra; Las muestras fueron NMOR; HMOR Y AgMOR se llevó a cabo tratamientos ácidos con HCl con una solución al 0.01 N de acuerdo con esto la zeolita, la cual tiene un alto contenido de microporos el cual puede tener una mejor efectividad en el proceso de adsorción, esto se debe a que los microporos están obstruidos por materiales ajenos a la zeolita y con este tratamiento químico se puedan abrir estos poros (Hernández et al., 2020). La solución fue diluida en 250 mL de agua destilada, que fue agregada lentamente en el sistema de tratamiento como se observa en la (Figura 8). Para la Activación de la muestra HMOR. Intercambio catiónico con solución de plata; Para la muestra AgHMOR se llevó a cabo tratamientos ácidos con HCl correspondiente a la zeolita original la cual fue tratada con AgNO_3 (0.03N, 250 mL). Usando el mismo sistema de intercambio se agregó la solución a la zeolita para el intercambio catiónico.

Tratamiento Térmico; Así mismo se dio a las muestras de zeolita Mordenita, un tratamiento térmico a 250 °C durante 4 horas para poder eliminar la humedad que se encuentra en las cavidades de la zeolita.

Aplicación de la cromatografía de gases inversa

Se tamizaron las muestras de zeolita Mordenita natural, zeolita Mordenita protonada y zeolita Mordenita con AgNO_3 en un tamiz de numero 60 con una abertura de 0.0098 pulgadas el cual favorece el tratamiento químico que fue aplicado en las muestras de acuerdo con Hernández et al., (2020). Posteriormente, con las muestras tamizadas se empaco la columna cromatográfica de aproximadamente 40 cm de largo con una capacidad de 0.240 gr a 0.270 gr de muestra en su interior. Se coloco la columna cromatográfica empacada en el cromatógrafo de gases para después identificar fugas en el sistema. Verificando el sistema del equipo se checo el flujo para poder dar un tratamiento térmico de 350°C durante 3 horas para eliminación de la humedad. Terminando el tratamiento térmico, se da comienzo a las corridas en diferentes temperaturas.



Figura 6. Tamizado de la muestra



Figura 7. Tamaño de la muestra



Figura 8. Modificación química de la muestra con HCl

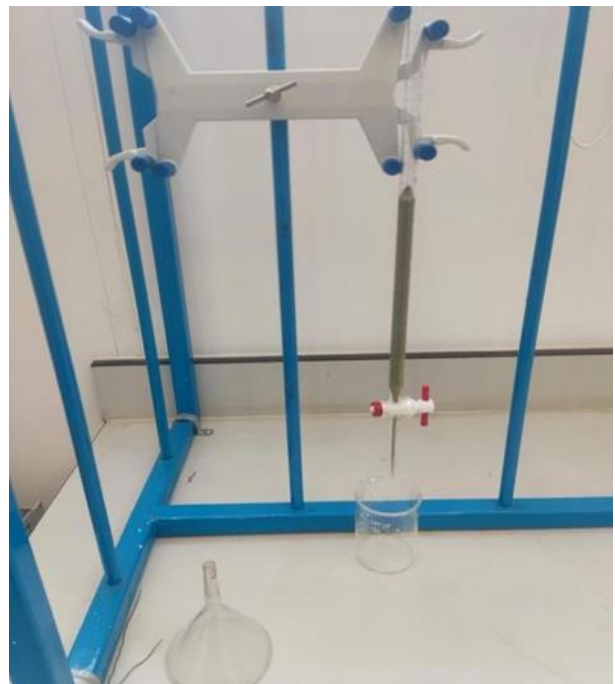


Figura 9. Modificación química de la muestra con AgNO_3



Figura 10. Empacado de la columna con la muestra.



Figura 11. Válvula de 6 vías.



Figura 12. Columna insertada dentro del cromatógrafo.



Figura 13. Cromatógrafo y tanques de trabajo.



Figura 14. Válvulas de flujo externas

Condiciones de trabajo

Temperaturas; 350°C, 335°C, 280°C, 245°C, 210°C.

Flujo: 30 mL por min.

Pasos a seguir en la realización del experimento y proceso de trabajo en el equipo:

- I. Selección de muestra.
- II. Tamizado de muestra.
- III. Modificación química de la muestra.
- IV. Tratamiento térmico (deshidratación de la muestra para eliminar humedad).
- V. Relleno o empacado de la columna.
- VI. Colocación de la columna dentro del equipo.

- VII. Verificación de fugas de gases (He y CO₂) previo a su uso (1 día antes).
- VIII. Calibración de las válvulas de gas del equipo previo a su uso (1 día antes).
- IX. Encendido del equipo 3 hrs. antes de su uso para una mejor respuesta.
- X. Verificación de flujo a 30 mL por minuto (gas de arrastre).
- XI. Verificación de temperaturas del equipo (Horno 350°C) (Inyector 350°C) (Detector 350°C).
Eventualmente disminución de 5 temperaturas para el experimento.
- XII. Verificación de presión del equipo (unidades KPa y mmHg).
- XIII. Verificación de la señal del equipo (programa de computadora).
- XIV. Verificación de señal positiva en el cromatógrafo.

Métodos de cálculo

A partir de datos de adsorción de gases a bajas presiones, es posible evaluar la constante de Freundlich en su forma lineal con el fin de determinar los parámetros de adsorción pertinentes
Ecuación:

$$a = Kf p^{\frac{-1}{n}} \quad \boxed{1}$$

$$\ln a = \ln Kf + \frac{1}{n} \ln p \quad \boxed{2}$$

A es la capacidad de adsorción en equilibrio con el adsorbente, Kf se define como la capacidad de adsorción y la afinidad del adsorbato por el adsorbente y por último la velocidad de saturación del adsorbato como 1/n.

La isoterma se obtiene a partir de la ecuación logarítmica:

$$\log a = \log Kf + 1/n \log p \quad \boxed{3}$$

La cinética de adsorción y desorción se estudia con la Isoterma de Langmuir, esto por la relación que existe entre las variables de presión del reactivo y la fracción de recubrimiento, esto a temperatura constante, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$P/a = 1/Kam + P/am$$

4

Donde a representa la cantidad adsorbida a la presión p y am es la constante de Langmuir y kp es la capacidad de adsorción en monocapa:

$$\theta = \frac{a}{am} = \frac{kp}{1 + kp}$$

Donde: $a_m K = K H$, algo que se puede comprobar gráficamente trazando $1/a$ versus $1/p$:

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{am} + \frac{1}{amkp}$$

En esta zona se evaluaron las constantes de Henry (KH), Esta constante dice que la cantidad de gas disuelta en un líquido a temperatura constante es proporcional a la presión parcial del gas sobre el líquido. Esta ley sigue la siguiente ecuación.

$$P = K_h \cdot c$$

5

Los parámetros termodinámicos en la adsorción estándar ($-\Delta U_0$) fueron evaluados a partir de la dependencia de la temperatura de las constantes de Henry, una relación que supone ser consistente con una forma tradicional de la ecuación de Van'tHoff utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\Delta G = -R \cdot T \cdot \ln \frac{P^0}{P}$$

6

7

$$\Delta H = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Delta S = \left(\frac{\Delta H - \Delta G}{T} \right)$$

8

$$\Delta u_o = \left(\frac{\ln kH - \ln K_o}{\frac{1}{T}} \right) R$$

9

donde la variación de energía interna estándar ΔU_0 se relaciona con la entalpía de adsorción estándar ΔH_0 mediante la siguiente expresión: $\Delta U_0 = \Delta H_0 + RT$; ΔH_0 . En esta ecuación, R es la constante universal de los gases, y K_0 es el factor pre-exponencial de la ecuación Van't Hoff. Por otra parte, el calor isostérico de adsorción (q_{st} , KJ/ mol) a diferentes cantidades de sustancia adsorbida puede determinarse a partir de los datos experimentales de las isothermas de adsorción a través de la ecuación de Clausius-Clapeyron ecuación (7).

Tabla 1. Constante física de los gases adsorbidos

| Gas | Presión arterial (°C) | Temperatura crítica (°C) | Cuadrupolo (Å³) | Polarizabilidad (Å³) | Potencial de ionización (eV) | Longitud (Å) | Ancho (Å) | Diámetro cinético σ (Å) |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|--------------|-----------|--------------------------------|
| O ₂ | -183 | -118.8 | 0.10 | 1.2 | 12.5 | 2.0 | 1.4 | 3.46 |
| CO ₂ | -140 | 31 | 4.3 | 2.65 | 13.8 | 2.32 | 1.05 | 3.87 |

Fuente: (Informatics, 2023)

Nombre: Oxígeno u Oxígeno molecular el O₂ tiene una temperatura de ebullición y crítica más bajas, lo que indica que es más volátil y difícil de licuar que el CO₂. Su molécula es menos polarizable (1.2 Å³) y tiene un valor de cuadrupolo muy bajo (0.10 Å³), lo que sugiere una distribución de carga más simétrica. Su potencial de ionización es ligeramente menor (12.5 eV).

En cuanto a tamaño, es más corto y ancho que el CO₂ (Longitud: 2.0 Å, Ancho: 1.4 Å), resultando en un diámetro cinético de 3.46 Å.

Nombre: Dióxido de carbono, el CO_2 , en contraste, tiene una temperatura crítica considerablemente más alta ($31\text{ }^\circ\text{C}$), lo que facilita su licuefacción a temperatura ambiente a presiones elevadas. Su molécula es más polarizable (2.65 \AA) y tiene un cuadrupolo significativamente mayor (4.3 \AA), lo que indica una distribución de carga más asimétrica y la presencia de un momento cuadrupolar. Su potencial de ionización es un poco más alto (13.8 eV). Molecularmente, es un poco más largo, pero más delgado que el O_2 (Longitud: 2.32 \AA , Ancho: 1.05 \AA), con un diámetro cinético ligeramente mayor de 3.87 \AA .

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Difracción de rayos X

Se observa en la Figura 15 los resultados de la difracción de rayos X de las muestras de NMOR, HMOR y AgMOR, en las cuales se observa presencia de Na-Mordenita (04-017-1315), Na-Clinoptilolita (01-086-4509) y contenidos mínimos de cuarzo (00-0050490). También se puede observar la presencia de plata en la muestra AgMOR en las zonas $2\theta = 6.5^\circ$, 14.8° , 22.3° , 28° y 32° , las cuales fueron evaluadas por la ecuación de Debye-Scherrer estimándose un tamaño de cristal promedio del orden de 49.99 nm que se atribuye a Ag y a la misma zeolita los cuales se forman en el área externa de esta.

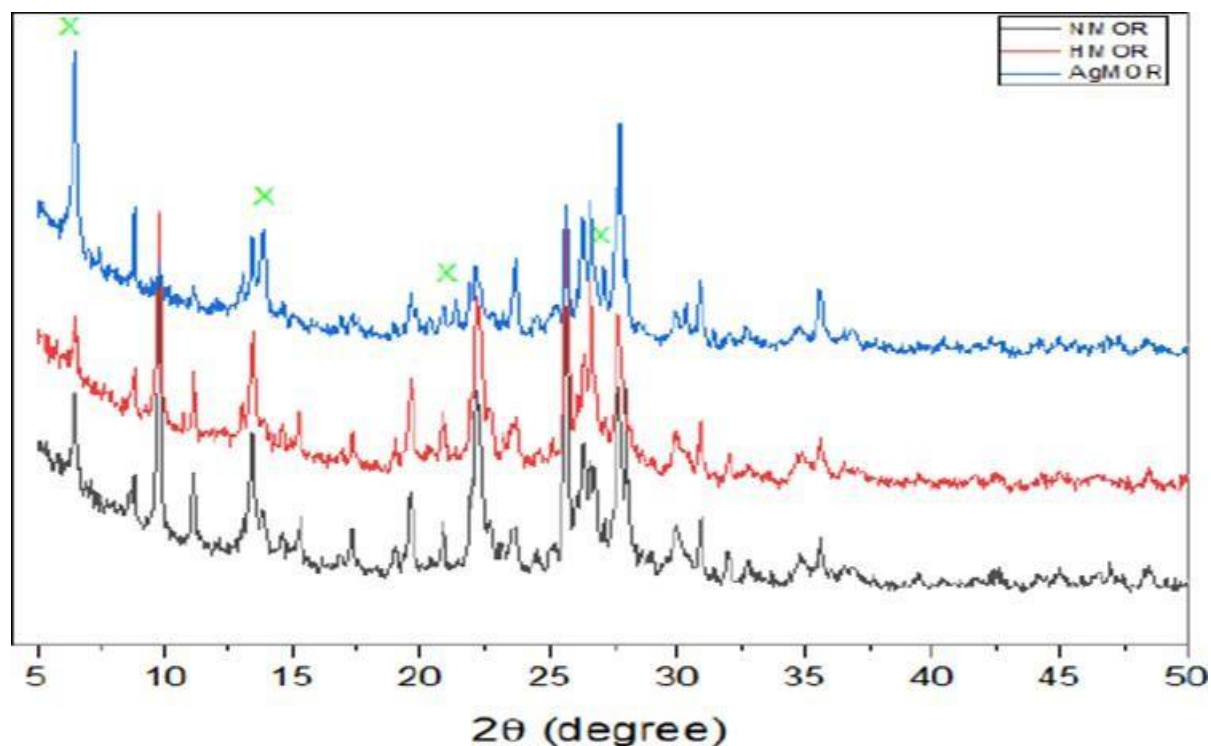


Figura 15. DRX Muestra en estudio, patrones de difracción de las muestras NMOR, HMOR y AgMOR.

Microscopía electrónica de barrido

Como se muestra en la figura 16, que muestra la micrografía de la zeolita como agregados irregulares de cristales, presentando una morfología variada con formas laminares o fibrosas. Se observa una textura superficial compleja con diferentes morfologías.

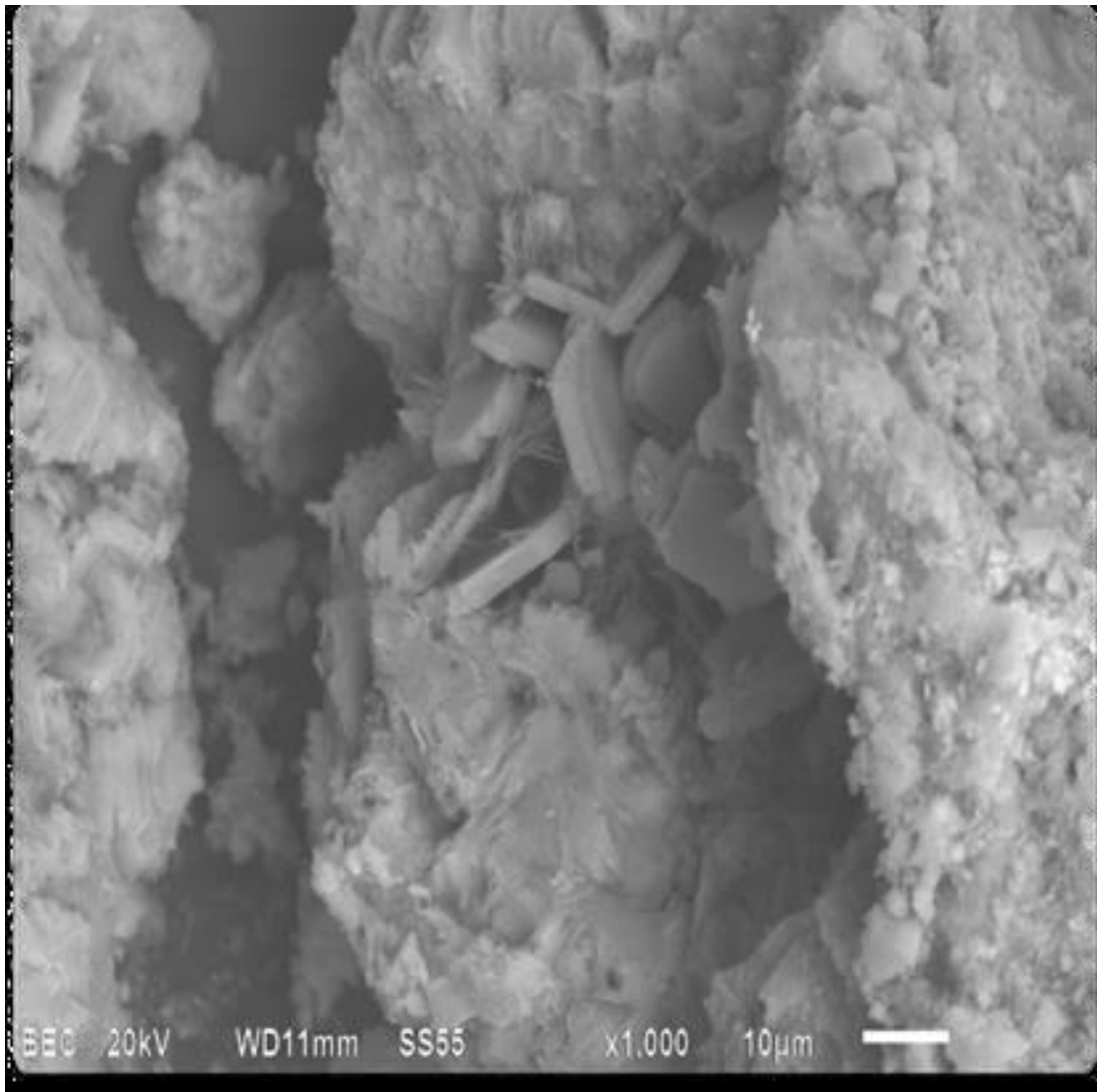


Figura 16. Micrografía de la zeolita Mordenita, se muestran como fibras muy finas, también se puede apreciar cuarzo y cristobalita.

EDS

En la tabla 2 se observan los resultados de la composición química (EDS) de la zeolita Mordenita. Se observa un orden en función del tratamiento que se sometió la muestra, NMOR: K> Na> Fe> Ca> Mg> Ti con una relación de silicio aluminio de 5.014 siendo el más alto, mientras que en HMOR: K> Fe> Ca> Na> Mg y para AgMOR: Fe> K> Ca> Mg> Na. En la muestra de AgMOR se nota la presencia del catión de Ag en su composición química. Estos resultados fueron evaluados por energía dispersiva (Hernández et al.)

Tabla 2. Composición química de las muestras NMOR, HMOR y AgMOR, EDS (% en masa)

| Zeolita | O | Na | Mg | Al | Si | K | Ca | Ti | Fe | Ag | Cl | Si/Al | Total |
|---------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| NMOR | 54.73 | 2.50 | 0.31 | 6.22 | 31.19 | 2.94 | 0.60 | 0.13 | 1.38 | --- | ---- | 5.014 | 100 |
| HMOR | 55.05 | 0.51 | 0.27 | 6.48 | 32.47 | 2.86 | 0.81 | --- | 1.55 | --- | ----- | 5.010 | 100 |
| AgMOR | 52.88 | 0.21 | 0.29 | 5.89 | 28.29 | 2.04 | 0.52 | --- | 2.13 | 8.17 | 0.08 | 4.803 | 100 |

Isotermas de adsorción

Las Figuras 17, 18 y 19 muestran las isotermas de adsorción de CO₂ en zeolita mordenita a diferentes temperaturas, determinadas mediante cromatografía de gases inversa (CGI). El proceso experimental consistió en la inyección controlada del adsorbato CO₂ desde un cilindro presurizado, su paso a través del sistema de análisis y el registro de las curvas de elución. A partir de estos perfiles de salida, se calcularon los puntos experimentales que conforman las isotermas correspondientes.

Adsorción de CO₂ sobre mordenita; Las isotermas de adsorción experimentales obtenidas por el método cromatografía de gases inversa a distintas temperaturas se observan consecutivamente en las siguientes Figuras 17-25

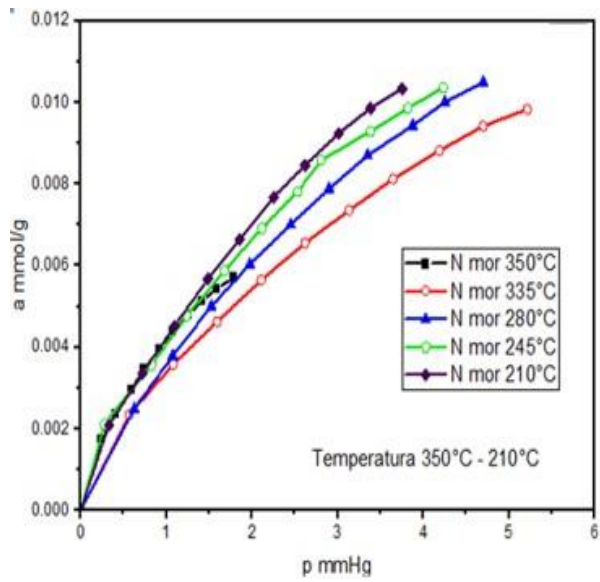


Figura 17. Isotherma de la ecuación de Langmuir para la Isotherma de adsorción de CO₂ en NMOR.

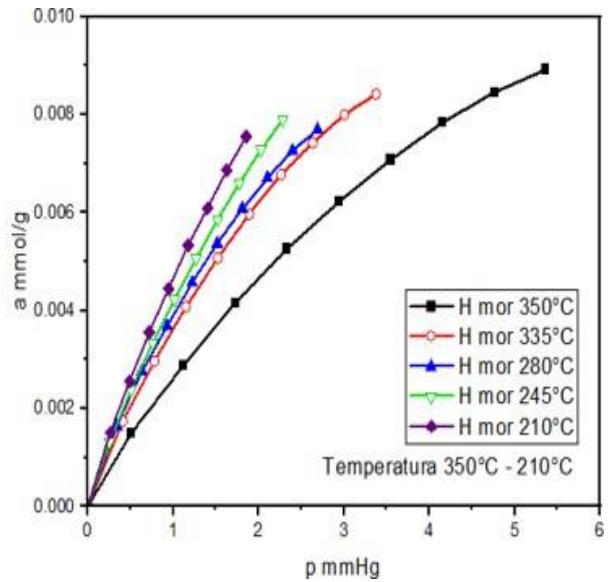


Figura 18. Isotherma de la ecuación de Langmuir para la Isotherma de adsorción de CO₂ en HMOR.

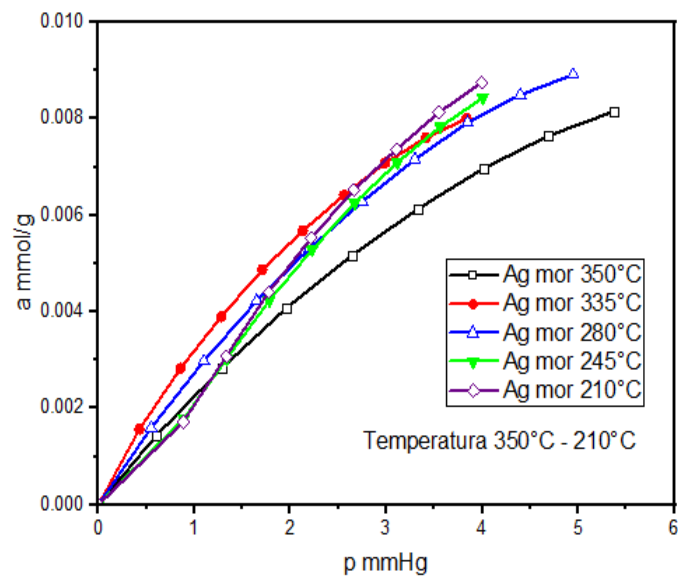


Figura 19. Isotherma de la ecuación de Langmuir para la adsorción de CO₂ en AgMOR.

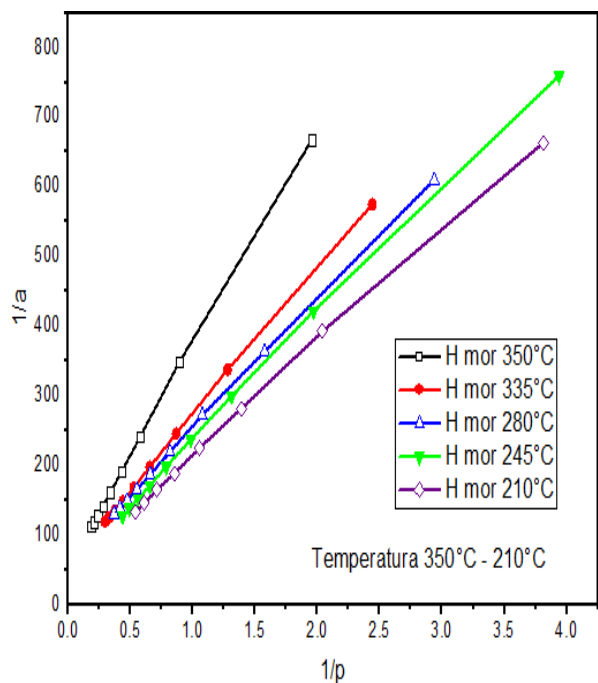


Figura 20. Isotherma linealizada de la ecuación Langmuir para la adsorción de CO₂ en HMOR.

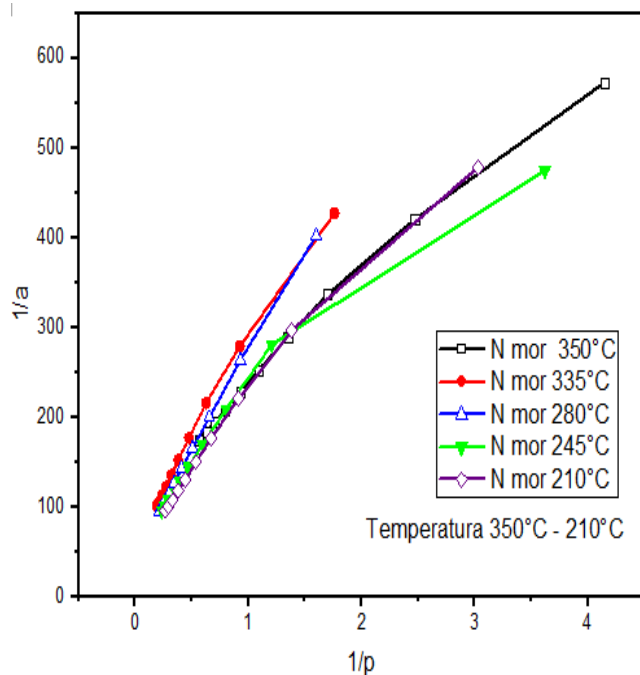


Figura 21. Isotherma linealizada de la ecuación Langmuir para la adsorción de CO₂ en NMOR.

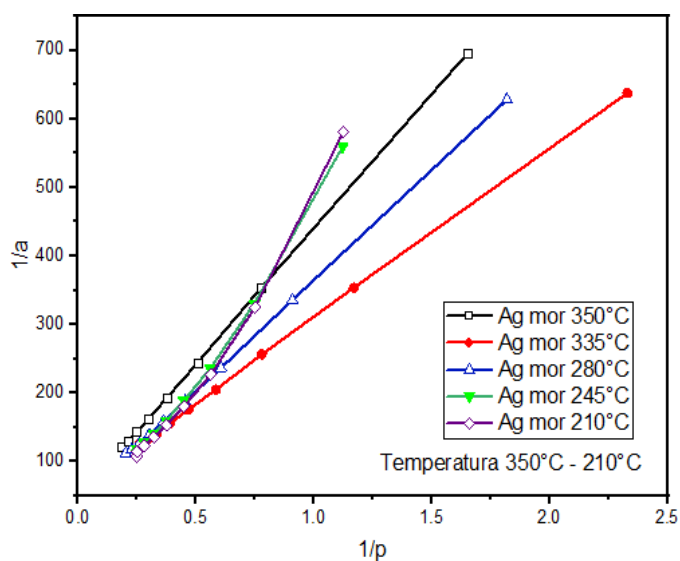


Figura 22. Isotherma linealizada de la ecuación Langmuir para la adsorción de CO₂ en AgMOR.

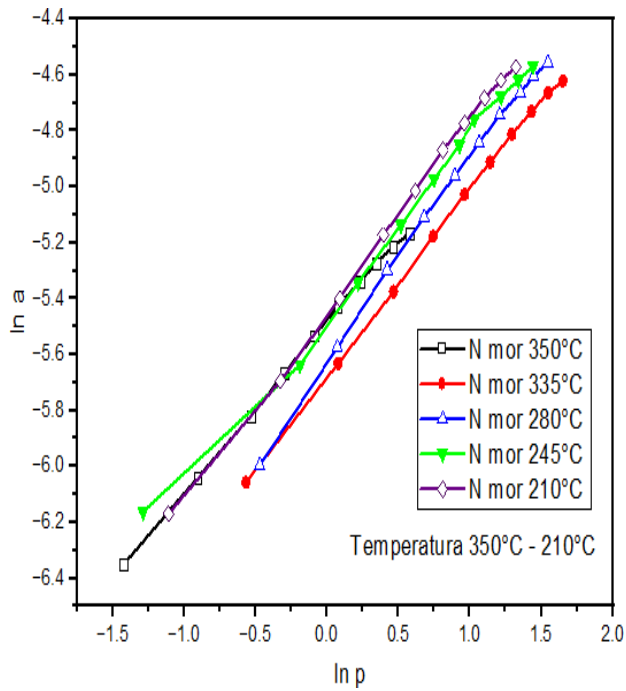


Figura 23. Isotherma linealizada de la ecuación Freundlich para la adsorción de CO₂ en NMOR.

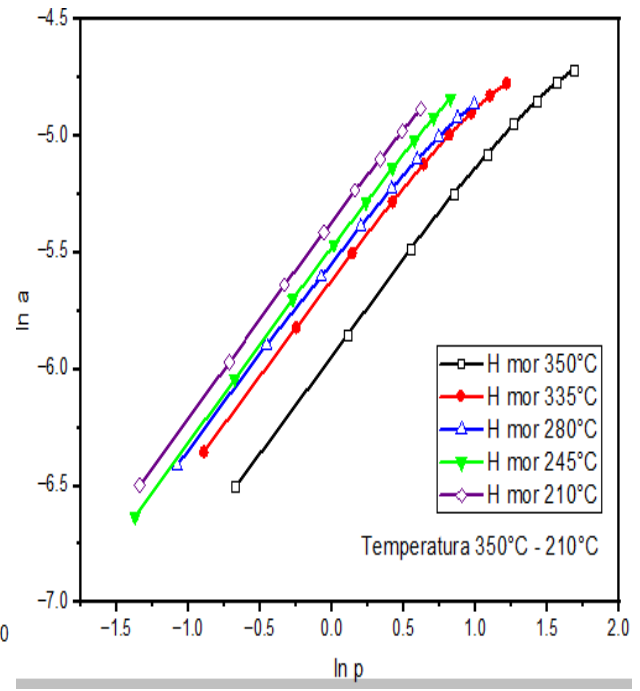


Figura24. Isotherma linealizada de la ecuación Freundlich para la adsorción de CO₂ en HMOR.

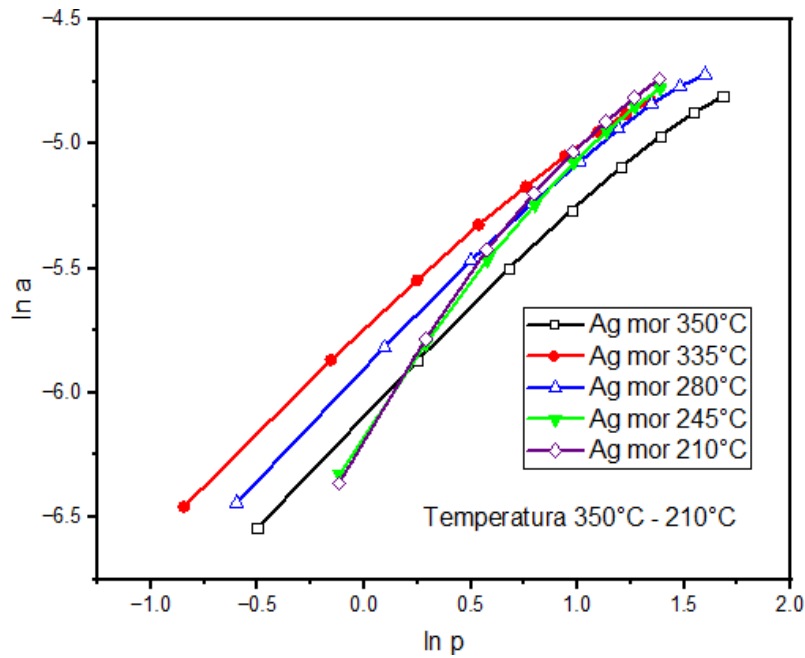


Figura 25. Isotherma linealizada de la ecuación Freundlich para la adsorción de CO₂ en AgMOR.

Las figuras 20, 21 y 22 muestran la isoterma linealizada de la ecuación de Langmuir para la adsorción de CO₂ en HMOR, NMOR y AgMOR; lo que confirma que el modelo de Langmuir describe adecuadamente la isoterma de adsorción. Se nota que, al aumentar la temperatura, la pendiente de las líneas tiende a aumentar, lo que indica una menor capacidad de adsorción a temperaturas más altas. Esto es consistente con un proceso de adsorción exotérmico, en el cual temperaturas elevadas desfavorecen la adsorción de CO₂. En general, la AgMOR presentó el mejor acoplamiento en la adsorción de CO₂ a la mayoría de las temperaturas, mientras que la HMOR mostró un comportamiento más favorable en condiciones de menor temperatura. La NMOR, por su parte, registró los valores más bajos de ajuste, confirmando que las modificaciones iónicas mejoran la interacción con el CO₂. Estos resultados permiten concluir que la incorporación de cationes específicos puede optimizar la selectividad y eficiencia de la zeolita en función de la temperatura de operación.

Las figuras 23, 24 y 25 presentan la isoterma linealizada de la ecuación de Freundlich para la adsorción de CO₂ en NMOR, HMOR y AgMOR, respectivamente; describen adecuadamente el comportamiento de adsorción. Se observa que, al igual que con el modelo de Langmuir, la pendiente de las líneas varía con la temperatura, sugiriendo que la capacidad de adsorción disminuye a mayores temperaturas. Esto refuerza que la adsorción de CO₂ en estos materiales es un proceso dependiente de la temperatura, coherente con una naturaleza exotérmica.

En la Tabla 3. Se presentan los parámetros de adsorción de CO₂ para mordenita natural (NMOR), mordenita ácida (HMOR) y mordenita intercambiada con plata (AgMOR), obtenidos a distintas temperaturas. El parámetro a_m representa la capacidad máxima teórica de adsorción en monocapa, mientras que K_L y K_H reflejan la afinidad del adsorbente hacia el CO₂, y K_f describe la heterogeneidad superficial. En general, se observa que un aumento en la temperatura tiende a disminuir tanto la capacidad como la afinidad, lo que indica un proceso de adsorción física y exotérmica. Sin embargo, AgMOR presenta un valor de a_m notablemente mayor a 245 °C, lo que sugiere la presencia de interacciones específicas entre los sitios activos de plata y el CO₂.

En el análisis de las isotermas linealizadas de Freundlich (Fig. 23–25) y Langmuir (Fig. 20–22) observé que la adsorción de CO₂ aumenta conforme disminuye la temperatura. A 210–245 °C las curvas presentan mayor concavidad y pendiente, lo que refleja una alta afinidad y capacidad de

captura, mientras que a temperaturas más elevadas (335–350 °C) las isoterms se aplanan, indicando una reducción en la adsorción, lo cual es consistente con el carácter exotérmico del proceso.

De acuerdo con los coeficientes de correlación que obtuve (Tabla 4), el modelo de Freundlich muestra un buen ajuste en la mayoría de los casos, sobre todo en las muestras HMOR y AgMOR ($R \approx 0.99$), mientras que en NMOR se aprecian menores valores de R. No obstante, al comparar ambos modelos, noté que el modelo de Langmuir presentó el mejor alineamiento global (R ligeramente superior), lo que sugiere que en las condiciones de este estudio la adsorción ocurre principalmente en monocapa sobre sitios relativamente uniformes, particularmente en HMOR y AgMOR.

Tabla 3. Constantes de adsorción

| Simp | T/K | a_m | K_L | K_H | K_F |
|-------|-----|----------|----------------------------------|-----------------|-------------------------|
| | | (mmol/g) | (a_m , mmol g ⁻¹) | (mmol g x mmHg) | (mmol g ⁻¹) |
| NMOR | 623 | 0.010 | 0.775 | 0.008 | 0.004 |
| | 608 | 0.017 | 0.251 | 0.004 | 0.003 |
| | 553 | 0.025 | 0.166 | 0.008 | 0.004 |
| | 518 | 0.012 | 0.654 | 0.008 | 0.004 |
| | 483 | 0.016 | 0.405 | 0.006 | 0.004 |
| HMOR | 623 | 0.022 | 0.135 | 0.008 | 0.002 |
| | 608 | 0.023 | 0.193 | 0.004 | 0.003 |
| | 553 | 0.020 | 0.247 | 0.005 | 0.003 |
| | 518 | 0.023 | 0.228 | 0.005 | 0.004 |
| | 483 | 0.026 | 0.221 | 0.005 | 0.004 |
| AgMOR | 623 | 0.027 | 0.089 | 0.002 | 0.003 |
| | 608 | 0.021 | 0.182 | 0.003 | 0.003 |
| | 553 | 0.028 | 0.104 | 0.003 | 0.002 |
| | 518 | 0.068 | 0.030 | 0.002 | 0.002 |
| | 483 | 0.040 | 0.049 | 0.001 | 0.002 |

Tabla 4. Coeficiente de correlación R a sus diferentes Temperaturas

| Temperatura | R (NMOR) | R (HMOR) | R (AgMOR) |
|-----------------|----------|----------|-----------|
| 350°C | 0.9371 | 0.9916 | 0.9947 |
| 335°C | 0.9614 | 0.9887 | 0.9895 |
| 280°C | 0.9812 | 0.9872 | 0.9943 |
| 245°C | 0.9173 | 0.9934 | 0.9892 |
| 210°C | 0.9586 | 0.9928 | 0.9794 |
| Promedio | 0.9511 | 0.9907 | 0.9894 |

El análisis estadístico promedio de los coeficientes de correlación (R) muestra que la mordenita ácida (HMOR) presenta el promedio más alto (0.9907) lo que refleja un ajuste altamente consistente del modelo en todo el rango de temperaturas. La mordenita intercambiada con plata (AgMOR) obtiene un promedio similar (0.9894) pero con una desviación ligeramente mayor, indicando un comportamiento muy bueno, aunque con más variabilidad. Por su parte, la mordenita natural (NMOR) presenta el menor promedio (0.9511) y la mayor dispersión, evidenciando un ajuste menos confiable. Estos resultados sugieren que el modelo se acopla mejor para HMOR, seguido muy de cerca por AgMOR. El modelo de Langmuir se apega mejor a los datos experimentales, lo que implica que; La adsorción de CO₂ en mordenita ocurre principalmente en sitios homogéneos y específicos.

Tabla 5. Constantes de Henry (KH, mmol g⁻¹ x mmHg⁻¹), Freundlich (KF, mmol g⁻¹ x mmHg⁻¹) y Langmuir (am, mmol g⁻¹) en Mordenita Natural (NMOR) y modificada (HMOR y AgMOR).

| T/K | | K _F 10 ³ | N | R _F | K _H 10 ³ | am | K _L | R _L |
|-----|-------|--------------------------------|-------|----------------|--------------------------------|-------|----------------|----------------|
| 623 | NMOR | 4.12 | 1.657 | 0.999 | 8.003 | 0.010 | 0.775 | 0.937 |
| | HMOR | 2.62 | 1.304 | 0.995 | 3.069 | 0.022 | 0.135 | 0.991 |
| | AgMOR | 2.26 | 1.247 | 0.994 | 2.475 | 0.027 | 0.089 | 0.994 |

| | | | | | | | | |
|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 608 | NMOR | 3.42 | 1.519 | 0.999 | 4.459 | 0.017 | 0.251 | 0.961 |
| | HMOR | 3.56 | 1.323 | 0.995 | 4.472 | 0.023 | 0.193 | 0.988 |
| | AgMOR | 3.12 | 1.338 | 0.994 | 3.867 | 0.021 | 0.182 | 0.989 |
| 553 | NMOR | 3.60 | 1.395 | 0.997 | 4.239 | 0.025 | 0.166 | 0.981 |
| | HMOR | 3.82 | 1.330 | 0.997 | 5.089 | 0.020 | 0.247 | 0.982 |
| | AgMOR | 2.72 | 1.265 | 0.993 | 3.030 | 0.028 | 0.104 | 0.994 |
| 518 | NMOR | 4.35 | 1.640 | 0.993 | 8.445 | 0.012 | 0.654 | 0.917 |
| | HMOR | 4.11 | 1.222 | 0.999 | 5.369 | 0.023 | 0.228 | 0.993 |
| | AgMOR | 2.19 | 0.978 | 0.989 | 2.052 | 0.068 | 0.030 | 0.989 |
| 483 | NMOR | 4.33 | 1.478 | 0.998 | 6.767 | 0.016 | 0.405 | 0.958 |
| | HMOR | 4.60 | 1.210 | 0.999 | 5.934 | 0.026 | 0.221 | 0.992 |
| | AgMOR | 2.19 | 0.943 | 0.983 | 1.991 | 0.040 | 0.049 | 0.979 |

Los valores de las constantes de Freundlich, Henry y Langmuir son mostrados en la Tabla 5. Los resultados obtenidos mediante las 3 constantes se muestran favorables en la interacción de los picos y las isothermas de adsorción, posteriormente , el grado de interacción de este compuesto fue analizado a partir de la evolución del calor isostérico de adsorción, q_{st} , Figura 26.

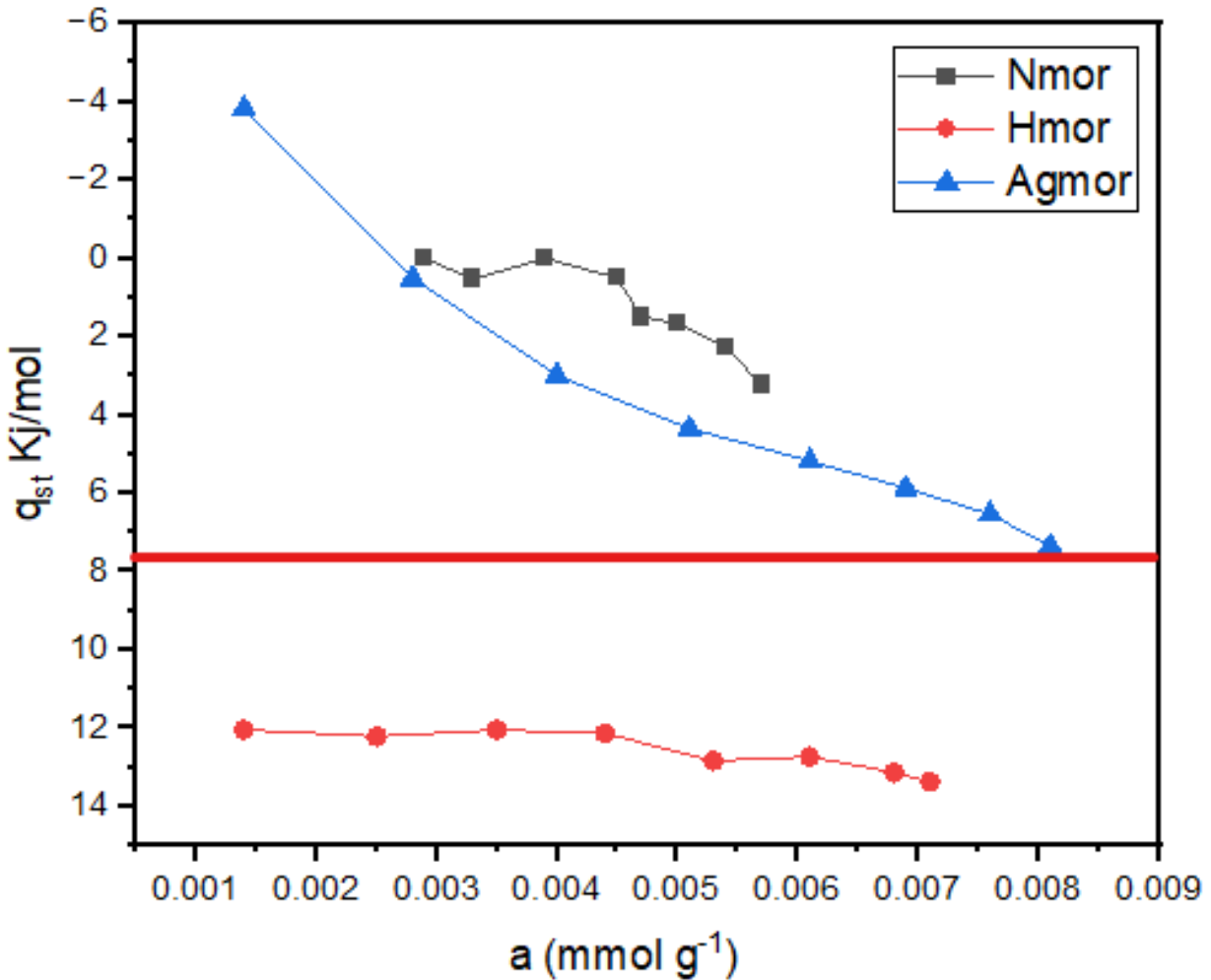


Figura 26. Calor isostérico de adsorción de CO₂ en mordenita.

La variación del calor isostérico de adsorción (q_{st}) en función de la cantidad adsorbida (a) revela diferencias en la homogeneidad energética de los sitios activos. HMOR presenta un q_{st} alto y prácticamente constante (~ 12 kJ/mol), lo que indica interacciones homogéneas y de alta afinidad con el CO₂. En contraste, NMOR y AgMOR muestran una disminución progresiva, lo que sugiere la ocupación inicial de sitios de mayor energía seguida por sitios menos favorables, reflejando heterogeneidad superficial. El valor de referencia (licuefacción) es $\sim 17-19$ kJ/mol, que los valores estén por debajo significa que predomina la fisorción. Si estuvieran por arriba, implicaría sitios de muy alta energía; potencial quimisorción o interacciones más fuertes.

Tabla 6. Datos termodinámicos para la adsorción de CO₂ en NMOR, HMOR y AgMOR.

| SIMP | T/K | $-\Delta H$ (KJ·MOL ⁻¹) | $-\Delta G$ (KJ·MOL ⁻¹) | $-\Delta U$ (KJ·MOL ⁻¹) | $-\Delta S$ (J·K ⁻¹ ·MOL ⁻¹) |
|-------|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| NMOR | 623 | | 1.316 | | 306.7236 |
| | 608 | | 6.978 | | -775.247 |
| | 553 | -1.830 | 8.237 | -25.932 | -1187.056 |
| | 518 | | 1.823 | | -63.935 |
| | 483 | | 3.630 | | -648.424 |
| HMOR | 623 | | -0.367 | | 482.126 |
| | 608 | | 8.295 | | 794.494 |
| | 553 | -12.839 | 6.429 | -26.803 | 1139.321 |
| | 518 | | 6.366 | | 1247.257 |
| | 483 | | 6.062 | | 1257.66 |
| AgMOR | 623 | | 12.524 | | -829.659 |
| | 608 | | 8.586 | | -336.969 |
| | 553 | -5.420 | 10.372 | -30.355 | -813.608 |
| | 518 | | 15.081 | | -1911.442 |
| | 483 | | 12.112 | | -1607.85 |

ΔG : En casi todos los casos el valor indica un proceso espontáneo de adsorción de CO₂, siendo más favorable en AgMOR por sus valores más altos de $-\Delta G$.

ΔH : Magnitudes bajas y negativas confirman que es fisisorción y exotérmica, con HMOR mostrando interacciones algo más fuertes.

ΔS : HMOR presenta valores positivos (mayor desorden), mientras que AgMOR tiene valores muy negativos (ordenamiento significativo de CO₂ en la superficie).

HMOR ofrece una adsorción estable y energéticamente homogénea, NMOR es moderado en afinidad, y AgMOR es termodinámicamente favorable, pero implica un ordenamiento notable de las moléculas adsorbidas. La variación de ΔH , ΔG y ΔS respalda que el rendimiento de adsorción disminuye al aumentar la temperatura, especialmente en materiales con mayor liberación de calor, como HMOR.

CONCLUSIONES

Las tres formas de mordenita (NMOR, HMOR, AgMOR) muestran un comportamiento de adsorción de CO₂ consistente con el llenado de microporos (Isoterma Tipo I) y son adecuadamente descritas por los modelos de Langmuir y Freundlich a las bajas presiones y altas temperaturas estudiadas. Como respuesta general todas las muestras exhiben isothermas de Tipo I, característico de la adsorción en materiales microporosos por llenado de poros. A una temperatura dada (ej. 210°C) y presiones bajas a (2-3 mmHg), la NMOR muestra la mayor cantidad adsorbida de CO₂, seguida por la AgMOR, y finalmente la HMOR con la menor capacidad en este rango. La cantidad máxima de CO₂ adsorbida fue mayor en la AgMOR (0.068 mmol/g a 245°C), superando ampliamente a la HMOR (0.026 mmol/g) y la NMOR (0.025 mmol/g). Esto confirma que la incorporación de plata mejora significativamente la capacidad de captura, posicionando a la AgMOR como el material más eficiente. Para estos cálculos se utilizaron las ecuaciones de Langmuir, Freundlich, Henry y Van'tHoff. Las gráficas muestran un comportamiento lineal por lo que se puede interpretar en la ecuación de Langmuir como una adsorción de CO₂ en monocapa lo cual es consistente con el llenado de microporos. La pendiente y forma de las isothermas confirman este comportamiento, mostrando una adsorción favorable en bajas presiones. Los datos termodinámicos indican que la adsorción de CO₂ en HMOR y AgMOR es un proceso exotérmico y espontáneo a temperaturas moderadas, como lo confirma la ecuación de Van't Hoff. En cambio, NMOR muestra una adsorción menos eficiente y poco favorecida térmicamente. Por tanto, la mordenita es un material eficaz para la captura de gases en condiciones moderadas, combinando buena capacidad de adsorción con facilidad de desorción. Sí, el hecho de que el proceso sea predominantemente fisisorción, a valores de calor isostérico que se observan, indica que estas muestras de mordenita (particularmente la HMOR y AgMOR, y en menor medida NMOR por su menor capacidad observada en las isothermas) son materiales prometedores y buenos candidatos para la captura de CO₂ mediante procesos de adsorción

De acuerdo a los resultados obtenidos se estima que las muestras de HMOR y AgMOR presentan la mayor capacidad de adsorción de CO₂ seguido por la muestra de NMOR a bajas temperaturas y el mejor ajuste a los modelos teóricos (Langmuir > Freundlich), mientras que la NMOR mostró

un comportamiento menos favorable y con mayor heterogeneidad en los sitios activos. Después de un exhaustivo análisis demostrando que la mordenita es excelente para la adsorción de CO₂ los resultados son cruciales para la selección y modificación de mordenitas para aplicaciones de captura de CO₂, destacando el potencial de la mordenita natural y la necesidad de optimizar las modificaciones para superar su rendimiento base.

BIBLIOGRAFÍA

- Breck DW. Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use. New York: John Wiley & Sons; 1974.
- Ruthven DM. Principles of Adsorption and Adsorption Processes. New York: John Wiley & Sons; 1984.
- Curi A, Granda WJ, Lima HM, Sousa WT. Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Inf Tecnol 2006;17(6). Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642006000600017>
- Hernández MA, Rojas F, Lara VH, Portillo R, Castelán R, Pérez G, Salas R. Estructura porosa y propiedades estructurales de mordenita y clinoptilolita. Superf Vacío 2010;23:51–56. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94248264011>
- Yang RT. Adsorbents: Fundamentals and Applications. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2003.
- García Franco R, Ángel Hernández M, Portillo Reyes R, Petranovskii V, Rubio E, Quiroz Estrada K F. ADSORCIÓN DE CO₂, H₂ Y CH₄ EN ZEOLITAS NATURALES DE PORO ANGOSTO. Rev Int Contam Ambient 2018;34(4):685-696. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.04.10>
- Hernández, J. M. A. (2019). El ABC DE LAS ZEOLITAS NATURALES EN MEXICO. Sextil Online, S.A. de C.V./In kit ®2020. ISBN: 978-607-8738-00-7.
- Quiroz K, Hernandez MA, Mendoza CF, Santamaría D, Petranovskii V. Critical pore admission temperature through nanopores of exchanged ERI zeolites at low levels of coverage.1 Nanomaterials 2019;9(2):160. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/nano9020160>
- Hernández Espinosa, M. A. et al. (Patente/Registro Sanitario 2018-2019). Materiales híbridos en ulceraciones de pie diabético: Nanoderma. (Información obtenida de notas de prensa y reportes de proyectos del ICUAP-BUAP).

- Quiroz-Estrada K, Pacella A, Ballirano P, Hernández-Espinosa MA, Felipe C, Esparza-Schulz M. Crystal chemical and structural characterization of natural and cation-exchanged Mexican erionite. *Minerals* 2020;10(9):772. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min10090772>
- Blanco VH, Hernández MA, Hernández R, Portillo R, Salgado MA, Hernández GI, Petranovskii V, Rubio E, Felipe C. Sorption of hexane and nitrogen on exchanged LTA zeolite: external surface area and micropore volume. *Mex J Mat Sci Eng* 2021;8:1-11.
- Hernández MA, Hernández GI, Salgado MA, Santamaria D, Portillo R, Rubio E. Nanoparticles of γ -Sitoesterol and Ag on Clinoptilolite Zeolites. *J Nanomaterials* 2021;2021:Article ID 9959552, 11 pages. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2021/9959552>
- Armando, G. A. (2021). Estudio de la modificación estructural de la zeolita ZSM-5 mediante el proceso de despolimerización-recristalización. Repositorio Institucional de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Recuperado de <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/83d609ec-9bf2-4131-aeb5-248854df6113>
- Hernández Espinosa, M. A. et al. (2021). (Registrado/Aceptado). Zeolita Erionita para adsorber dióxido de carbono. (Información obtenida de registros de investigación y publicaciones sobre líneas de investigación.
- Zvereva IA, Shelyapina MG, Chislov M, Novakowski V, Malygina E, RodríguezIznaga I, Hernández MA, Petranovskii V. A comparative analysis of natural zeolites from various Cuban and Mexican deposits: structure, composition, thermal properties and hierarchical porosity. *J Therm Anal Calorim* 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10947-4>
- Sánchez E, En Z, De Adsorción P, De S, De H, Corta C, Yelitza L, Dirigida S, Fernando R, García D, Susana V, Valencia. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA INSTITUTO DE TECNOLOGÍA QUÍMICA (UPV-CSIC). [Tesis doctoral]. Valencia: Universitat Politècnica de València; [fecha de recuperación: 31 de mayo de 2023]. Disponible en:

<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/107362/S%C3%81NCHEZ%20-%20Empleo%20de%20zeolitas%20en%20procesos%20de%20adsorci%C3%B3n%20y%20separaci%C3%B3n%20de%20hidrocarburos%20de%20cadena%20corta.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

- Datosmacro.com. Emisiones de CO₂ 2019. [Consultado el 14 de junio de 2025]. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2>
- Higieneambiental.com. ¿Cuáles son los principales contaminantes del aire interior en edificios y hogares? [Consultado el 14 de junio de 2025]. Disponible en: <https://higieneambiental.com/aire-agua-legionela/cuales-son-los-principales-contaminantes-del-aire-interior-en-edificios-y-hogares>
- Insst.es. NTP 289: Síndrome del edificio enfermo: factores de riesgo. [Consultado el 14 de junio de 2025]. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_289.pdf/7299d03d-aba7-4b06-8adb-5d5732fb5eb9
- Asia.iza-Structure.org. MOR: 3D Drawing. [Consultado el 31 de mayo de 2023]. Disponible en: https://asia.iza-structure.org/IZA-SC/framework_3d.php?STC=MOR
- Acrlatinoamerica.com. La contaminación del aire en espacios interiores | ACR Latinoamérica. [Consultado el 31 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.acrlatinoamerica.com/202108279998/articulos/aire-acondicionado-y-ventilacion/la-contaminacion-del-aire-en-espacios-interiores.html>
- Oa.upm.es. LAS ZEOLITAS NATURALES DE MÉXICO. [Consultado el 14 de junio de 2025]. Disponible en: https://oa.upm.es/50786/1/zeolitas_Mexico.pdf
- Www.dicyt.com. Los secretos que esconden los materiales porosos. [Consultado el 31 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.google.com/search?q=https://www.dicyt.com/noticias/los-secretos-que-esconden-los-materiales-porosos%23::~:~:text=3DLos%2520materiales%2520porosos%2520son%2520%25E2%2580%259Clos>

- Es.wikipedia.org. Mordenita. [Consultado el 28 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Mordenita>
- Www.paho.org. Determinantes Ambientales de Salud - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. [Consultado el 14 de junio de 2025]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/determinantes-ambientales-salud>.

ANEXOS



Figura 27. Cromatógrafo de gases.



Figura 28. Mantenimiento preventivo del equipo.

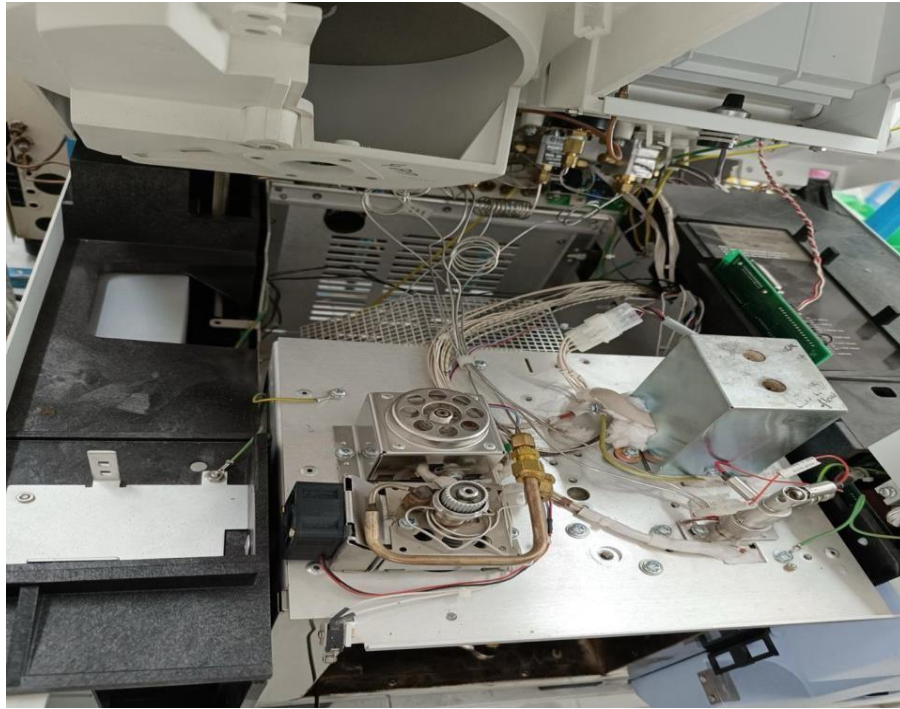


Figura 29. Equipo interno.

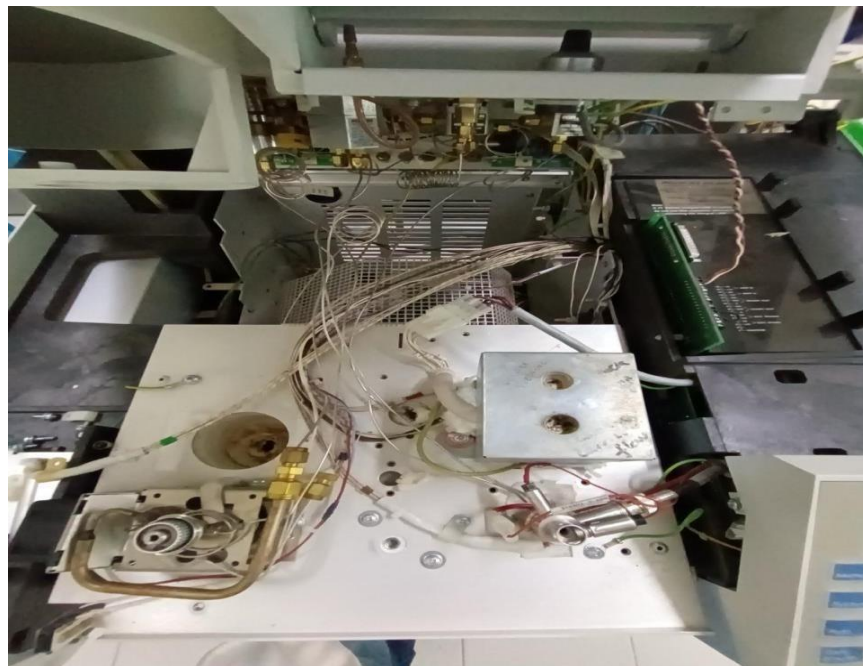


Figura 30. Limpieza del inyector.



Figura 31. Mantenimiento preventivo del equipo.

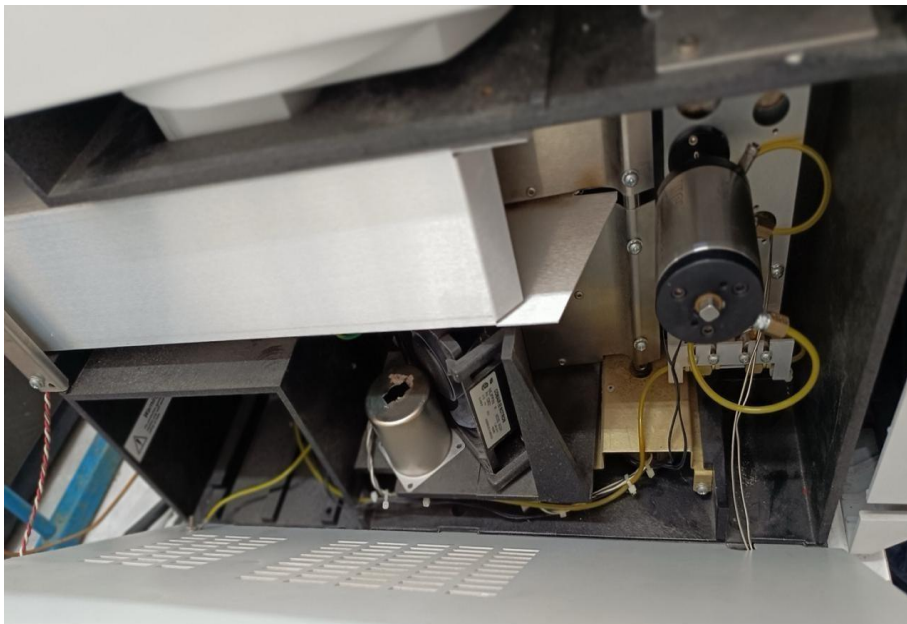


Figura 32. Válvula de gas ON/OFF

Nombre: Mordenita Natural con CO₂ Fecha: 16/01/2023
 Especie: Mordenita Natural con CO₂ Solvente / gas: CO₂ Presión: 110 KPa = 16 Psi

| | T. Retención | Whc, mL/min | T. Horno | T. Inyector | T. Detector |
|----|-------------------------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| 1 | 17.32 seg. 17.20 seg At2 | 30 | 350 °C | 350 °C | 350 °C At2 |
| 2 | 17.83 seg. 16.12 seg. " | " | " | " | " |
| 3 | 16.68 seg. 17.00 seg. " | " | " | " | " |
| 4 | 17.50 seg. " | " | 335 °C | 335 °C | 335 °C At2 |
| 5 | 17.58 seg. " | " | " | " | " |
| 6 | 16.64 seg. " | " | " | " | " |
| 7 | 16.91 seg At2 16.27 seg At6 | " | 280 °C | 280 °C | 300 °C At4 |
| 8 | 16.20 seg. At4 16.67 seg. At6 | " | " | " | " |
| 9 | 17.46 seg At6 17.19 seg At4 ✓ | " | " | " | " |
| 10 | 17.45 seg At4 | " | 245 °C | 245 °C | 305 °C At6 |
| 11 | 17.43 seg At2 | " | " | " | " |
| 12 | 17.03 seg. At6 ✓ 17.50 At2 | " | " | " | " |
| 13 | 18.00 seg At6 ✓ At2 17.50 ✓ | " | 210 °C | 210 °C | 230 °C At6 |
| 14 | 16.28 seg At4 ✓ At6 16.96 x | " | " | " | " |
| 15 | 17.07 seg At4 ✓ At6 16.88 ✓ | " | " | " | " |
| | 17.43 At6 ✓ | | | | |
| | 16.91 At6 ✓ | | | | |
| | 16.55 At6 ✓ | | | | |

Nombre: Miguel Minto Dr. Angel Dr. Karim y alumnos Fecha: 19/06/202
 Especie: Mordenita con Plata Solvente / gas: CO₂ Presión: 160 KPa o 24 Psi

| | T. Retención | Whc, mL/min | T. Horno | T. Inyector | T. Detector |
|----|-----------------------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| 1 | 25.22 seg. 25.80 seg. At6 ✓ | 30 mL/min | 350 °C | 350 °C | 350 °C |
| 2 | 25.77 seg. | " | " | " | " |
| 3 | 25.50 seg. | " | " | " | " |
| 4 | 25.94 seg. At6 ✓ | " | 335 °C | 335 °C | 350 °C |
| 5 | 26.42 seg. | " | " | " | " |
| 6 | 26.17 seg. | " | " | " | " |
| 7 | 23.13 seg. At6 ✓ | " | 280 °C | 280 °C | 300 °C |
| 8 | 23.30 seg. | " | " | " | " |
| 9 | 23.16 seg. | " | " | " | " |
| 10 | 22.56 seg. At6 ✓ | " | 245 °C | 245 °C | 265 °C |
| 11 | 22.28 seg. | " | " | " | " |
| 12 | 22.07 seg. | " | " | " | " |
| 13 | 22.17 seg. At6 ✓ | " | 210 °C | 210 °C | 230 °C |
| 14 | 22.73 seg. | " | " | " | " |
| 15 | 22.33 seg. | " | " | " | " |
| | Rango 1 en todas | | | | |

Nombre: Miguel Angel Minto Rojas Fecha: 16/07/2024
 Especie: Mordenita Pretanada Solvente / gas: CO₂ Presión: 120 KPa o 18 Psi

| | T. Retención | Whc, mL/min | T. Horno | T. Inyector | T. Detector |
|----|------------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| 1 | 20.19 seg. At6 ✓ | 30 | 350 °C | 350 °C | 350 °C |
| 2 | 20.72 seg. | " | " | " | " |
| 3 | 20.16 seg. | " | " | " | " |
| 4 | 21.47 seg. | " | 335 °C | 335 °C | 335 °C |
| 5 | 21.43 seg. | " | " | " | " |
| 6 | 21.82 seg. | " | " | " | " |
| 7 | 24.55 seg. | " | 280 °C | 280 °C | 300 °C |
| 8 | 25.13 seg. | " | " | " | " |
| 9 | 26.05 seg. | " | " | " | " |
| 10 | 41.70 seg. | " | 245 °C | 245 °C | 275 °C |
| 11 | 40.82 seg. | " | " | " | " |
| 12 | 40.57 seg. | " | " | " | " |
| 13 | 01.14.22 seg. | " | 210 °C | 210 °C | 230 °C |
| 14 | 01.13.12 seg. | " | " | " | " |
| 15 | 01.12.80 seg. | " | " | " | " |

Figuras 34, 35, 36. tiempos de retención a diferentes temperaturas.

| Mordenita Nt (CO ₂) | | | | |
|---------------------------------|--------------|----------|------------|--------|
| | Horno | Inyector | Detector | |
| Temperatura °C | 350 | 350 | 350 | 623.15 |
| Presión | 16 | PSI | 829.015544 | mmHg |
| Velocidad de flujo | 30 ml/min | | | |
| Velocidad de la carta | 0.016666667 | cm/seg | 1 | cm/min |
| Tr 1 | 17 | Tr2 | 0 | |
| Atenuación | 1002.914 | | | |
| Wc1 | 0.2833333333 | wc2 | 0 | |
| Altura del pico | 18.5 | Divide | 1.85 | |
| Peso del cuadrado 3x3 | 0.07 | g | Area | 9 |
| S adsorción | | | | |
| 1 | 47.44285714 | | | |
| 2 | 45.25714286 | | | |
| 3 | 42.68571429 | | | |
| 4 | 39.98571429 | | | |
| 5 | 36.51428571 | | | |
| 6 | 32.91428571 | | | |
| 7 | 28.8 | | | |
| 8 | 24.68571429 | | | |
| 9 | 19.8 | | | |
| 10 | 14.52857143 | | | |
| Tabla de pesos en gramos | | | | |
| | Peso (g) | | | |
| 1 | 0.369 | | | |

| | |
|---------------|-------------|
| 2 | 0.352 |
| 3 | 0.332 |
| 4 | 0.311 |
| 5 | 0.284 |
| 6 | 0.256 |
| 7 | 0.224 |
| 8 | 0.192 |
| 9 | 0.154 |
| 10 | 0.113 |
| Peso del pico | 0.369 |
| Area pico | 47.44285714 |
| ma | 4.28E-03 |
| gcolumna | 0.75 |
| a mmol/g | |
| 1 | 5.70E-03 |
| 2 | 5.44E-03 |
| 3 | 5.13E-03 |
| 4 | 4.81E-03 |
| 5 | 4.39E-03 |
| 6 | 3.96E-03 |
| 7 | 3.46E-03 |
| 8 | 2.97E-03 |
| 9 | 2.38E-03 |
| 10 | 1.75E-03 |
| h cm | |
| 1 | 18.5 |
| 2 | 16.5 |
| 3 | 14.7 |

| | | |
|----------------|-------------|--------|
| 4 | 13.1 | |
| 5 | 11.2 | |
| 6 | 9.5 | |
| 7 | 7.7 | |
| 8 | 6.1 | |
| 9 | 4.2 | |
| 10 | 2.5 | |
| WeHe exp | 30 | ml/min |
| Po a 25°C | 623.15 | mmHg |
| Pi | 1424.015544 | mmHg |
| ΔP | 1075.800 | |
| T° C corregida | 298.15 | K |
| WeHe | 36.31951513 | ml/min |
| K | 2.48E-06 | |
| C mmol/ml | | |
| 1 | 4.59E-05 | |
| 2 | 4.09E-05 | |
| 3 | 3.65E-05 | |
| 4 | 3.25E-05 | |
| 5 | 2.78E-05 | |
| 6 | 2.36E-05 | |
| 7 | 1.91E-05 | |
| 8 | 1.51E-05 | |
| 9 | 1.04E-05 | |
| 10 | 6.20E-06 | |
| Valor de R | 3.88E+04 | |
| P mmHg | | |
| 1 | 1.78E+00 | |

| | |
|----|----------|
| 2 | 1.59E+00 |
| 3 | 1.42E+00 |
| 4 | 1.26E+00 |
| 5 | 1.08E+00 |
| 6 | 9.16E-01 |
| 7 | 7.42E-01 |
| 8 | 5.88E-01 |
| 9 | 4.05E-01 |
| 10 | 2.41E-01 |

| ln a | |
|------|--------------|
| 1 | -5.1670786 |
| 2 | -5.214244068 |
| 3 | -5.272740275 |
| 4 | -5.338082332 |
| 5 | -5.428901006 |
| 6 | -5.5326978 |
| 7 | -5.666229192 |
| 8 | -5.820379872 |
| 9 | -6.040922642 |
| 10 | -6.350487425 |

| ln p | |
|------|--------------|
| 1 | 0.578198539 |
| 2 | 0.463788187 |
| 3 | 0.3482753 |
| 4 | 0.233040037 |
| 5 | 0.076341585 |
| 6 | -0.088280395 |

| | |
|----|--------------|
| 7 | -0.298351865 |
| 8 | -0.531283422 |
| 9 | -0.904487668 |
| 10 | -1.423281462 |

| 1/a | |
|-----|----------|
| 1 | 1.75E+02 |
| 2 | 1.84E+02 |
| 3 | 1.95E+02 |
| 4 | 2.08E+02 |
| 5 | 2.28E+02 |
| 6 | 2.53E+02 |
| 7 | 2.89E+02 |
| 8 | 3.37E+02 |
| 9 | 4.20E+02 |
| 10 | 5.73E+02 |

| 1/p | |
|-----|----------|
| 1 | 5.61E-01 |
| 2 | 6.29E-01 |
| 3 | 7.06E-01 |
| 4 | 7.92E-01 |
| 5 | 9.26E-01 |
| 6 | 1.09E+00 |
| 7 | 1.35E+00 |
| 8 | 1.70E+00 |
| 9 | 2.47E+00 |
| 10 | 4.15E+00 |