

**A ti mamá, y a ti hermana, que  
juntas somos el equipo perfecto.  
Las tres mosqueteras.**

## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la BUAP. Institución que me brindó la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, para realizar mis estudios de licenciatura y de la cual siempre he recibido ayuda.

A la Dra. María de los Ángeles Velasco.

Por su dirección, paciencia y valiosos consejos que me permitieron alcanzar los objetivos de esta tesis.

A mis sinodales por su cotutoría en esta investigación y brindarme su valioso tiempo.

A mi madre, mi primera maestra y mi más ferviente admiradora. Gracias por inculcar en mí el amor por el aprendizaje y por estar siempre dispuesta a escuchar mis ideas, incluso las más locas. Su confianza en mí ha sido mi mayor motivación.

A mi hermana, por sus palabras de aliento, por animarme y compartir conmigo la emoción.

A mi padre por incursionarme en el mundo ingenieril y enamorarme de esta profesión.

A mi esposo, por brindarme un hogar lleno de cariño y comprensión, que me permitió dedicar tiempo a este proyecto.



**Benemérita  
Universidad Autónoma de Puebla**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“CARACTERIZACIÓN DE LA ZEOLITA EN UN  
YACIMIENTO DE GUANAJUATO, MÉXICO, Y SUS  
POSIBLES APLICACIONES”**

**Tesis profesional presentada para obtener el  
grado de: Licenciatura en Ingeniería Química**

**Presenta:**

**SALMA MALDONADO OCAMPO**

**Director de Tesis:**

**Dra. María de los Ángeles Velasco Hernández**

**Co-Director de Tesis:**

**Dr. Miguel Ángel Hernández Espinosa**

**Puebla, Pue. Noviembre, 2024.**

## Índice

INTRODUCCIÓN.....	4
Justificación.....	4
Objetivos .....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Hipótesis .....	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....	6
1.1. 9	
1.1.1 Aluminosilicatos .....	6
1.1.2 Tipos de zeolitas .....	6
1.1.4 Propiedades fisicoquímicas de las zeolitas .....	12
1.2 Yacimientos de Zeolitas .....	13
1.2.1 Yacimientos Internacionales .....	15
1.2.2 Yacimientos en México .....	17
1.3 Caracterización de las zeolitas .....	19
1.3.1 Difracción de rayos X (DRX) .....	20
1.3.2 Microscopía de barrido electrónico (SEM).....	22
1.3.3 Tamaño de poro.....	23
1.3.4 Cromatografía de gases.....	24
1.4 Principales aplicaciones .....	25
1.4.1 Salud .....	26
1.4.2 Agricultura.....	27
1.4.3 Descontaminación del aire .....	28
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....	29
2.1 Reactivos .....	29
2.2 Materiales.....	29
2.3 Activación de zeolita.....	29
2.4 Caracterización de la zeolita.....	31
2.4.1 Difracción de rayos X.....	31
2.4.2 Caracterización por Espectroscopía de energía dispersiva (EDS) .....	32
2.4.3 Propiedades texturales .....	32
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	33
3.1 DRX .....	33
3.2 Espectroscopia por energía dispersiva, EDS.....	36

3.3 Estudios de textura, adsorción de N <sub>2</sub> a 77 K.....	37
3.4 Aplicaciones de la zeolita caracterizada .....	40
3.4.1 Aplicaciones Industriales.....	40
3.4.2 Aplicaciones en la agricultura.....	41
3.4.3 Aplicaciones en la salud.....	42
3.4.4 Otras aplicaciones: .....	42
CONCLUSIONES .....	42
REFERENCIAS .....	43

## INTRODUCCIÓN

Las formaciones geológicas, como lo son los yacimientos minerales, son una parte de la corteza terrestre que, debido a procesos geológicos, se forman acumulaciones de materia prima mineral, la cual, por sus características, se aprovechan las propiedades físicas o químicas para su explotación mineral (Servicio Geológico Mexicano, 2017). En la actualidad se realizan distintos procesos de caracterización de materiales, que nos ayudan a obtener información y la valoración de un mineral.

A menudo, el estudio que se lleva a cabo para la valoración de un depósito mineral involucra tan sólo el estudio genérico de las leyes de los elementos para así determinar si es de interés en el tipo de depósito, comprobando notoriamente el estudio mineralógico detallado de las asociaciones minerales (Melgarejo et al., 2010).

Sin embargo, examinar en profundidad la mineralogía no solo tiene implicaciones académicas, como se suele creer a veces, sino que también puede contribuir a aumentar el valor agregado de la explotación. Además, por sí mismo, puede ser útil para descartar o confirmar el potencial del yacimiento. (Melgarejo et al., 2010).

La zeolita natural puede ser empleada como un medio inerte para el cultivo de plantas destinadas a la exportación. Al utilizar la zeolita como único sustrato de cultivo, se obtienen diversos beneficios, tales como la reducción en la cantidad de fertilizantes necesarios y el consumo de agua. Además, se ha comprobado que la zeolita mejora la salud de las plantas, aumenta su productividad y acelera el tiempo de producción. En el ámbito agrícola, la zeolita también se utiliza en la preparación de fertilizantes químicos que, al ser aplicados en el suelo, proveen nutrientes fundamentales para el crecimiento de las plantas. (Cárdenas et al., 2011).

Las zeolitas son fertilizantes de liberación lenta que se encuentran de forma natural. Poseen una estructura con carga negativa que contiene nutrientes como el potasio y el nitrógeno. Antes de utilizarse como medio de cultivo, las zeolitas pueden cargarse con estos iones para luego liberar los nutrientes en las proximidades del sistema de raíces, donde son necesarios para el crecimiento de las plantas. Esta

acción ayuda a prevenir la pérdida de nutrientes en el agua, reduce los niveles de contaminación del acuífero y disminuye la cantidad de fertilizante requerida. (Cárdenas et al., 2011).

Con lo descrito anteriormente se puede observar, cómo los estudios indican que la caracterización exhaustiva de las zeolitas juega un papel importante en distintas aplicaciones como en la agricultura como absorbente de humedad y captador de contaminantes, tratamiento de agua, filtración, entre otras.

En respuesta a lo anterior, en esta tesis se realizarán tres métodos de caracterización, para conocer una zeolita de un yacimiento en Guanajuato, México cuya importancia se da al aumentar nuestro conocimiento de este material poco estudiado y así, proponer sus posibles aplicaciones.

### **Justificación**

El interés por saber las posibles aplicaciones y realizar estudios específicos para conocer las características de la zeolita, tales como comprender cuál es el ordenamiento atómico del mineral, conocer cómo un mineral cristaliza, entender cómo se determina el tamaño de las celdas de una estructura cristalina, entre otras. Todos estos hallazgos son conocidos y descubiertos gracias a las diversas formas de caracterización de minerales.

Estos estudios (DRX, EDS y análisis de textura) ofrecen una ventaja al proporcionar información sobre los resultados, lo cual ayuda a resolver desafíos que algunas empresas enfrentan al determinar la duración de vida útil de sus activos industriales. (Palacio, 2019).

Con base a los resultados de varias investigaciones, se tienen opciones de aplicaciones en algunas zeolitas como por ejemplo la caracterización de la zeolita clinoptilolita se ha reportado que el incremento de la concentración de iones  $Ca^{++}$  en ésta, aumenta la capacidad de adsorción de  $N_2$ , para así poder ser usada como fertilizante (Montes et al., 2015).

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Caracterizar una zeolita de un yacimiento de Guanajuato, por medio de tres técnicas analíticas, y a partir de los resultados obtenidos, investigar las posibles aplicaciones.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar la zeolita presente en el yacimiento de Guanajuato, México, mediante un análisis detallado de su composición química y mineralógica, propiedades físicas y distribución elemental.
- Evaluar el aporte de la zeolita en la catálisis ambiental, para minimizar la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.
- Explorar las posibles aplicaciones de la zeolita en áreas como la adsorción de contaminantes, la separación de gases.

### **Hipótesis**

La caracterización de una zeolita por DRX, EDS y análisis de textura, proporciona información para poder aplicar dicha zeolita en la descontaminación de gases y en la agricultura.



## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1. Zeolitas**

#### **1.1.1 Aluminosilicatos**

La zeolita es un aluminosilicato cristalino (arcilla), que se caracteriza por sus estructuras tridimensionales. Algunas de las principales características de este mineral son su capacidad de retener y liberar agua, así como su capacidad de intercambiar iones sin modificar su estructura atómica. Además, la zeolita es capaz de intercambiar una variedad de mezclas de fosfatos y componentes de materia orgánica. Los cationes como  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  se encuentran entre los iones que se pueden intercambiar. (Chica toro et al., 2008).

La transformación física y química de un grupo diverso de zeolitas se debe a la influencia de altas temperaturas y presiones a lo largo de millones de años sobre las capas sedimentadas de cenizas volcánicas. "Marlow, V. S. L." (s. f.). Las zeolitas naturales se originan debido a la precipitación de fluidos presentes en los poros, como ocurre en fenómenos hidrotermales, o mediante la alteración de vidrios volcánicos. La formación de las diversas especies de zeolitas depende de factores clave, como la presión, la temperatura, la actividad de las especies iónicas y la presión parcial de agua. (Curi et al., 2006).

#### **1.1.2 Tipos de zeolitas**

Se encuentran alrededor de 50 tipos distintos de zeolita, entre ellos se destacan la Clinoptilolita, Mordenita, Chabazita, Fillipsita, Haulandita, entre otros. Cada una de estas variedades exhibe propiedades físicas y químicas únicas, lo que resulta en diferentes densidades, selectividad catiónica y tamaño de los poros. Esta diversidad de aluminosilicatos da lugar a distintos grupos con distintas estructuras y características específicas. Por ejemplo, se puede mencionar la Clinoptilolita, una de las zeolitas más ampliamente utilizadas, que cuenta con un 16% más de volumen de poros en comparación con la Analcima. Estas propiedades hacen que no todos los tratamientos previstos con zeolitas procedan a ser acertados y suficientes sin conocer el tipo de material utilizado para cada operación específico (Chica Toro et al., 2006).

Además de los mencionados anteriormente, existen otros tipos de zeolitas como la Ferrierita, que destaca por su alta estabilidad térmica y selectividad hacia ciertos iones. La Natrolita, por su parte, es reconocida por su estructura en forma de agujas y sus propiedades hidrofílicas. La Heulandita se caracteriza por ser un excelente absorbente de agua y amoníaco. La amplia variedad de zeolitas disponibles en el mundo ofrece un potencial significativo para diversas aplicaciones industriales, incluyendo el tratamiento de aguas, purificación de gases y catálisis (Ramón, B. E., 1998).

### Principales tipos de zeolitas más conocidas:

**Clinoptilolita:** Es ampliamente utilizada en diversas aplicaciones industriales, como la adsorción de iones y moléculas, así como en la purificación de agua y aire (Ay, A. N. et al., 2019).

**Mordenita:** Destaca por su capacidad de intercambio catiónico y su uso en procesos de separación y purificación de gases (García et al., 2018).

**Chabazita:** Se utiliza principalmente en la industria petroquímica y en la catálisis, debido a su alta selectividad y estabilidad térmica (Li et al., 2021).

**Fillipsita:** Es conocida por su capacidad para adsorber amonio, lo que la hace útil en la eliminación de contaminantes en aguas residuales (López-Ramón et al., 2016).

**Haulandita:** Se destaca por su capacidad para retener moléculas grandes, lo que la hace útil en aplicaciones de separación y purificación (Delgado et al., 2019).

Zeolita	Fórmula Química
Afghanita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{32}(\text{Si}, \text{Al})_{48}\text{O}_{96}(\text{SO}_4)_5 \cdot 3\text{CO}_3 \text{Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Analcima	$\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}$
Amicita	$\text{K}_2 \text{Na}_2 \text{Al}_4 \text{Si}_4 \text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Barretita	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}) \text{Al}_2 \text{Si}_7 \text{O}_{18} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Bellbergita	$(\text{K}, \text{Ba}, \text{Sr})_2 \text{Sr}_2 \text{Ca}_2 (\text{Ca}, \text{Na})_4 \text{Al}_{18}\text{Si}_{18}\text{O}_{72}$
Bikitaita	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Boggsita	$\text{Ca}_8 \text{Na}_3 (\text{Si}, \text{Al})_{96} \text{O}_{192} \cdot 70\text{H}_2\text{O}$
Brewsterita	$(\text{Sr}, \text{Ba}, \text{Ca})_2 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Cancrinita	$\text{Na}_6 \text{Ca}_2 (\text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{24}) (\text{CO}_3)_2$
Clinoptilolita	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_{2-3} \text{Al}_3 (\text{Al}, \text{Si})_2 \text{Si}_{13} \text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Cowlesita	$\text{CaAl}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10} \cdot 5-6\text{H}_2\text{O}$
Chabazita	$(\text{Ca}, \text{Na})_2 (\text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Deschiardita	$(\text{Ca}, \text{Na}_2, \text{K}_2)_5 \text{Al}_{10} \text{Si}_{38} \text{O}_{96} \cdot 35\text{H}_2\text{O}$
Edingtonita	$\text{BaAl}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Epistilbita	$\text{CaAl}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Erionita	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{K})_{4,5} (\text{AlSi}_{27} \text{O}_{72}) \cdot 27\text{H}_2\text{O}$
Estilbita	$\text{NaCa}_2 \text{Al}_5 \text{Si}_{13} \text{O}_{36} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
Escolecita	$\text{CaAl}_2 \text{Si}_7 \text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Faujasita	$\text{Na}_{58} \text{Al}_{58} \text{Si}_{134} \text{O}_{384} \cdot 240\text{H}_2\text{O}$
Ferrierita	$(\text{Na}, \text{K})_2 \text{Mg} (\text{Si}, \text{Al})_{18} \text{O}_{36} (\text{OH}) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Garronita	$\text{Na}_2 \text{Ca}_5 \text{Al}_{12} \text{Si}_{20} \text{O}_{64} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$
Gismondina	$\text{Ca}_2 \text{Al}_4 \text{Si}_4 \text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Gmelinita	$(\text{Na}_2, \text{Ca}) \text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Gobbinsita	$\text{Na}_4 (\text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}_2) \text{Al}_6 \text{Si}_{10} \text{O}_{32} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Gonnardita	$\text{Na}_2 \text{CaAl}_4 \text{Si}_6 \text{O}_{20} \cdot 7\text{H}_2 \text{O}$
Goosecreekita	$\text{CaAl}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2 \text{O}$
Harmotoma	$(\text{Ba}, \text{K})_{1-2} (\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2 \text{O}$
Heroinita	$(\text{K}_2, \text{Ca}, \text{Na}_2) 2\text{Al}_4 \text{Si}_{14} \text{O}_{36} \cdot 15\text{H}_2 \text{O}$
Herschelita	$(\text{Ba}, \text{K})_{1-2} (\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{16} (\text{OH}) \cdot 6\text{H}_2 \text{O}$
Heulandita	$\text{Ca} (\text{Al}_2 \text{Si}_7 \text{O}_{18}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Laumontita	$\text{Ca} (\text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Leucita	$\text{K}_{16} (\text{Al}_{16} \text{Si}_{32} \text{O}_{96})$
Levynita	$(\text{Ca}, \text{Na}_2, \text{K}_2) \text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Li-ABW	$\text{LiAlSiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Linde tipo A	$\text{Na}_{12} (\text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}) \cdot 27\text{H}_2\text{O}$
Linde tipo X	$\text{Na}_{86} (\text{Al}_{86} \text{Si}_{106} \text{O}_{384}) \cdot 264\text{H}_2\text{O}$
Linde tipo Y	$\text{Na}_{56} (\text{Al}_{56} \text{Si}_{136} \text{O}_{384}) \cdot 264\text{H}_2\text{O}$

Liotita	$(\text{Na, K})_{16}\text{Ca}_8 (\text{Si}_{18}\text{Al}_{18}\text{O}_{72}) (\text{SO}_4)_5 \text{Cl}_4$
Maricopaita	$\text{Pb}_7 \text{Ca}_2 \text{Al}_{12}\text{Si}_{36}\text{O}_{100} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
Mazzita	$\text{K}_2 \text{CaMg}_2 (\text{Al, Si})_{36}\text{O}_{72} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$
Merlionita	$(\text{K, Ca, Na, Ba})_7 \text{Si}_{23}\text{Al}_9 \text{O}_{64} \cdot 23\text{H}_2\text{O}$
Mesolita	$\text{Na}_2 \text{Ca}_2 (\text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Montesommaita	$(\text{K, Na})_9 \text{Al}_9 \text{Si}_{23}\text{O}_{64} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Mordenita	$\text{Na}_8 \text{Al}_8 \text{Si}_{40}\text{O}_{96} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
Natrolita	$\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Ofrerita	$(\text{K}_2\text{Ca})_5 \text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72} \cdot 30\text{H}_2\text{O}$
Paranatrolita	$\text{Na}_2 \text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Paulingita	$(\text{K, Na})_2 \text{Ca} (\text{Si}_{13}\text{Al}_4) \text{O}_{34} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$
Perllialita	$\text{K}_9 \text{Na} (\text{Ca, Sr}) \text{Al}_{12}\text{Si}_{24}\text{O}_{72} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Phillipsita	$(\text{K, Na, Ca})_{1-2}(\text{Si, Al})_8\text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Pollucita	$(\text{Cs, Na})_2 \text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12} \cdot \text{H}_2\text{O}$
Ro ()	$\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{36}\text{O}_{96} \cdot 44\text{H}_2\text{O}$
Sodalita	$\text{Na}_6 \text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{24} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Sodio dachiardita	$(\text{Na}_2, \text{Ca, K}_2)_{4-5}\text{Al}_8 \text{Si}_{40}\text{O}_{96} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
Stellerita	$\text{Ca}_4 (\text{Si}_{28}\text{Al}_8) \text{O}_{72} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$
Stilbita	$\text{Ca} (\text{Al}_2 \text{Si}_7\text{O}_{18}) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Tetranatrolita	$\text{Na}_2 \text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Thompsonita	$\text{NaCa}_2 (\text{Al, Si})_{10} \text{O}_{20} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Tschernichita	$(\text{Ca, Na}) (\text{Si}_6 \text{Al}_6) \text{O}_{16} \cdot 4-8\text{H}_2\text{O}$
Wairakita	$\text{CaAl}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Wellsita	$(\text{Ba, Ca, K}_2) \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Willhendersonita	$\text{KCaAl}_3 \text{Si}_3 \text{O}_{12} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Yugawaralita	$\text{CaAl}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

*Tabla 1. Variedad de tipos de zeolitas y su fórmula química (Cortés, 2009).*

### 1.1.3 Estructuras de las zeolitas

La zeolita es ampliamente reconocida como un aluminosilicato debido a su composición química y estructura cristalina única, que al deshidratarse desarrolla, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimos o sea de 3 a 10 angstroms (Å). Esta estructura cristalina la cual está compuesta principalmente por aluminio, silicio y oxígeno. Este mineral es una clase de aluminosilicatos microporosos con una red tridimensional de tetraedros de aluminio y tetraedros de silicio. Los átomos de aluminio (Al) y silicio (Si) se unen mediante enlaces covalentes formando una estructura tipo jaula o tamiz molecular. Los enlaces covalentes en la red cristalina de zeolita son responsables de sus propiedades de intercambio iónico; además, la presencia de canales y cavidades en su estructura les otorga su capacidad para adsorber moléculas en sus poros (Davis, R. et al., 2018).

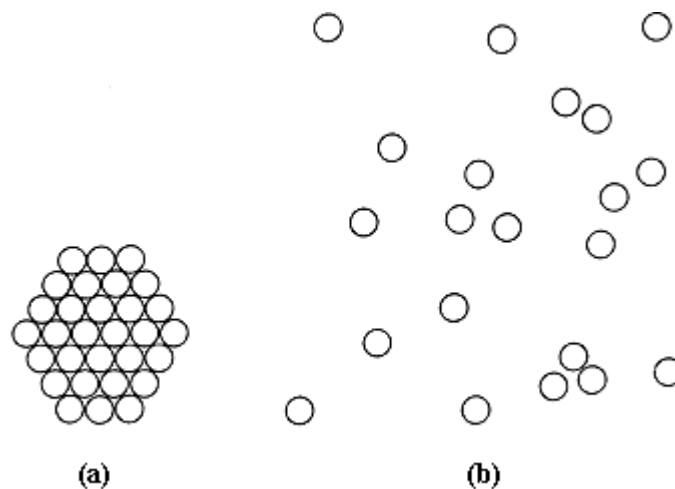
La denominación de aluminosilicato se refiere a la presencia dominante de átomos de aluminio y silicio en su estructura, lo que le confiere sus características únicas como absorbente y catalizador. Según estudios las zeolitas son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones industriales y medioambientales debido a estas propiedades únicas por lo que la estructura de la zeolita es fundamental para su amplio espectro de aplicaciones en campos como la agricultura, la industria petroquímica y la catálisis. (Davis, R., & Noble, R., 2018; Shabgard, H. et al., 2020).

La estructura está formada por redes cristalinas tridimensionales formadas por moléculas de tetraedro tipo  $TO_4$  (T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co) unidas en el vértice por un átomo de oxígeno (Curi et al, 2006). En otras palabras, los mismos grupos de átomos se repiten en el espacio a intervalos iguales en estos materiales, lo que los convierte en cristales

Para determinar cómo está formada la estructura de una zeolita es necesario no solamente conocer su composición química constituida por átomos de aluminio (Al), silicio (Si), sodio (Na), oxígeno (O) e hidrógeno (H) (que son los elementos presentes en algunas zeolitas) sino que es preciso saber cómo sus partículas están

relacionadas entre sí, su dispersión en el espacio, así como el orden de sus átomos, ya que, debido a estas características, pueden formarse distintos compuestos.

Para determinar si la disposición de los grupos de átomos es adecuada y si se trata de una red cristalina, podemos comparar la estructura regular característica de los cristales con la típica desorganización presente en los gases. De hecho, el concepto de "cristal ideal" o "cristal perfecto" se emplea de manera similar al término "gas ideal". Un gas ideal consta de partículas idénticas infinitesimalmente pequeñas entre las que no hay fuerzas ni una posición fija en el espacio. Por otro lado, un cristal ideal contiene grupos de átomos del mismo tamaño finito, sus posiciones fijas en el espacio se mantienen por fuerzas mutuas y estos átomos están en reposo. La energía de un gas ideal es completamente cinética y la energía de un cristal ideal es completamente potencial (I. ¿Qué es una zeolita? s. f.).



*Figura 1. Orden de un cristal (a) desorden de un gas (b)*

En la figura 1 se compara el orden de un cristal y un gas constituidos por el mismo tipo de átomos. La representación es en un plano, así que hay que imaginársela en el espacio.

Un gas ideal cumple las leyes correspondientes de una disposición aleatoria de partículas en movimiento y geometría que no interfiere. En cambio, un cristal ideal obedece las leyes de la geometría que rigen un acomodamiento periódico de las partículas en reposo, por lo tanto, la aleatoriedad no existe en su orden de acomodamiento, sino que las posiciones de los átomos o moléculas se determinan con exactitud. Todos los gases son similares (exceptuando la masa de sus partículas), los cristales ideales muestran muchos arreglos periódicos, la complejidad o la alteración de un grupo de átomos no importa solo si se repite exactamente igual con ciclos perfectos (l. ¿Qué es una zeolita? s. f.).

La zeolita posee una estructura tridimensional rígida (similar a un panal de abejas) conformado por una red de túneles interconectados creando una amplia área superficial para realizar el intercambio catiónico y la adsorción de humedad (Chica Toro, 2008). Esta última puede entrar y salir del arsenal tridimensional sin cambiar la integridad estructural de la arcilla.

A continuación, se reportan algunos ejemplos de unidades estructurales de las principales zeolitas que son usadas en la descontaminación de suelos.

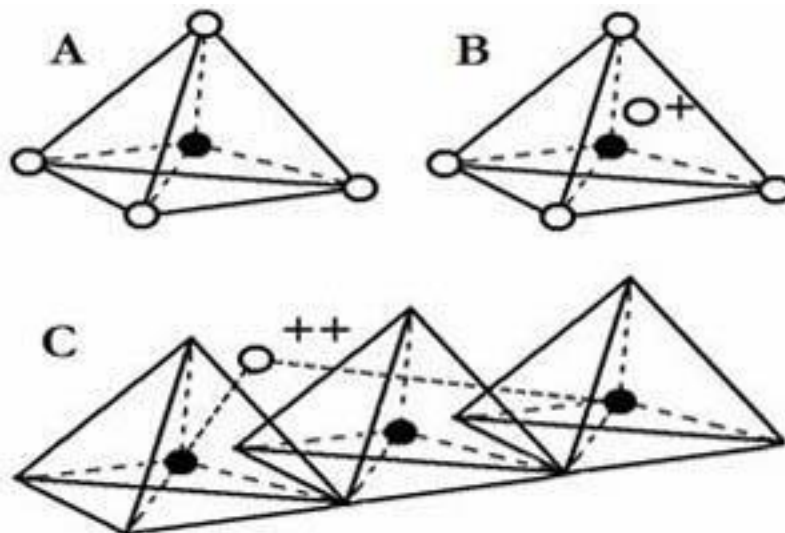


Figura 2. A) Un tetraedro con un átomo de silicio (Si), (círculo lleno) en el centro y átomos de oxígeno (O) en los vértices; B) Un tetraedro con un átomo de aluminio (Al) sustituyendo el silicio (Si) y unido a un catión monovalente para compensar la diferencia de carga entre el silicio (Si) y el (Al); y C) Una cadena de múltiples

*tetraedros con átomos de silicio (Si) y aluminio (Al) unidos a un catión bivalente para balancear las cargas (Curi et al, 2006).*

La capacidad de la transferencia de materia entre el espacio intercrystalino de estos minerales y su medio circundante se debe a su microporosidad y a sus cualidades estructurales. Este proceso está influenciado por el tamaño de los poros, ya que solo las moléculas con dimensiones más pequeñas que un umbral crítico específico, que varía según el tipo de zeolita, pueden desplazarse (Costafreda, 2018).

Según el tamaño de sus poros pueden clasificarse en:

- Zeolita de poro extragrande ( $\theta > 9 \text{ \AA}$ ).
- Zeolita de poro grande ( $6 \text{ \AA} < \theta < 9 \text{ \AA}$ )
- Zeolita de poro mediano ( $5 \text{ \AA} < \theta < 6 \text{ \AA}$ )
- Zeolita de poro pequeño ( $3 \text{ \AA} < \theta < 5 \text{ \AA}$ )

Entre las características generales destacan:

- Diámetro de poro: 2 a 12 angstroms.
- Diámetro de cavidades: 6 a 12 angstroms
- Superficie interna: varios cientos de m<sup>2</sup>/g.
- Capacidad de intercambio catiónico: 0 a 650 meq/100g.
- Capacidad de adsorción: < 0,35 cm<sup>3</sup>/g
- Estabilidad térmica: desde 200 °C hasta más de 1.000 °C.

#### **1.1.4 Propiedades fisicoquímicas de las zeolitas**

Cada sustancia, ya sea orgánica o inorgánica, posee atributos únicos que la distinguen de otras. En el caso particular de las zeolitas naturales, destacan diversas propiedades fisicoquímicas que las hacen especialmente interesantes para diversas aplicaciones industriales y medioambientales.



Una de las características más sobresalientes de las zeolitas es su porosidad, la cual se debe a su estructura cristalina tridimensional formada por tetraedros de aluminio, silicio y oxígeno. Estos tetraedros se unen entre sí, creando cavidades y canales de diferentes tamaños, lo que permite que las zeolitas actúen como tamices moleculares (Scerlia, 2014). Este tipo de granulometría es ideal para filtros de agua ya sea en potabilizadoras, albercas, cisternas o cualquier filtro que necesite eliminar metales pesados. Gracias a esta porosidad, las zeolitas son excelentes absorbentes y catalizadores, lo que las convierte en materiales ideales para la purificación de gases y líquidos, así como para la remoción de impurezas y contaminantes en diversos procesos industriales.

Otra propiedad clave es su capacidad de adsorción. Las zeolitas pueden retener moléculas de diferentes tamaños y polaridades en su estructura porosa debido a las fuerzas de atracción y repulsión que se generan en sus poros. Esto es especialmente útil en aplicaciones como la deshidratación de gases y líquidos, así como en la eliminación de olores y sustancias nocivas en entornos como filtros de aire y aguas residuales (Curi et al, 2006).

Además de su porosidad y capacidad de adsorción, las zeolitas destacan por su habilidad para realizar intercambios iónicos. Los iones presentes en la estructura cristalina de las zeolitas pueden ser sustituidos por otros iones presentes en el medio circundante. Este fenómeno resulta fundamental en procesos de ablandamiento de agua, donde los iones calcio y magnesio son intercambiados por iones sodio presentes en la zeolita, mejorando la calidad del agua y previniendo problemas de incrustaciones en tuberías y equipos.

En las zeolitas, diversos factores influyen en su comportamiento de I.I. y su selectividad hacia ciertos cationes, como la naturaleza de los cationes en solución, la temperatura, la concentración de cationes en solución, los aniones asociados, el solvente utilizado (agua u orgánico), la estructura de la zeolita y la densidad de la carga de red (Flores et al, 2006).

Adicionalmente, las zeolitas se han vuelto cruciales en la industria petroquímica, siendo usadas como catalizadores en la conversión de moléculas complejas en productos de alto valor añadido, como combustibles y productos químicos.

En resumen, las zeolitas naturales presentan una combinación de propiedades fisicoquímicas únicas de porosidad, adsorción e intercambio iónico, lo que les otorga un amplio rango de aplicaciones en diversos campos. Su versatilidad y su capacidad para contribuir a la protección del medio ambiente y el mejoramiento de procesos industriales las convierten en materiales de gran relevancia en la ciencia y la tecnología actual. Continuar investigando y comprendiendo estas fascinantes propiedades fisicoquímicas es fundamental para seguir aprovechando su potencial en beneficio de la sociedad y el entorno que nos rodea.

## **1.2 Yacimientos de Zeolitas**

Los yacimientos de zeolitas que provienen de rocas sedimentarias con origen piroclástico se generan debido a la interacción entre cenizas volcánicas de naturaleza vítrea y aguas meteóricas o salinas-alcálinas. A través de experimentos en laboratorio, se ha demostrado que diversas zeolitas pueden ser sintetizadas a partir de vidrio volcánico y soluciones de carbonatos alcalinos, utilizando presiones y temperaturas relativamente moderadas, lo que confirma el mecanismo y las condiciones propicias para su formación (Ríos García et al., s. f.).

Según Mumpton (1976) citado por Ríos García (s.f.), cimentándose en su ubicación geológica, composición mineral y génesis, las zeolitas se agrupan generalmente de la siguiente manera:

- a) Depósitos originados a partir de material volcánico en sistemas lacustres "cerrados" con contenido salino.
- b) Depósitos formados en entornos "abierto", presentes en lagos de agua dulce o acuíferos subterráneos.
- c) Depósitos desarrollados en ambientes marinos.

- d) Depósitos generados por un proceso de metamorfismo de bajo grado a raíz de un enterramiento.
- e) Depósitos formados por actividad hidrotermal o en zonas de manantiales termales.
- f) Depósitos que surgen a partir de restos volcánicos o minerales arcillosos presentes en suelos alcalinos.
- g) Depósitos cuyo origen carece de pruebas directas de precursores volcánicos.

Sólo los tres primeros tipos de yacimiento son considerados de interés comercial, debido a su gran tamaño.

Las zeolitas naturales se han originado en una variedad de contextos geológicos, y su presencia en distintas ubicaciones ha establecido los fundamentos para definir los criterios contemporáneos de clasificación. Sin embargo, persisten ciertos dilemas al hacer una determinación precisa de los límites entre un ambiente u otro, particularmente en los depósitos formados a través de procesos hidrotermales (Costafreda et al., 2018).

A pesar de la diversidad de modelos y criterios de tipología utilizados para clasificar los depósitos de zeolitas naturales, es relevante resaltar que múltiples autores coinciden en la identificación de cuatro ambientes o tipos genéticos principales: diagenéticos, metamórficos, hidrotermales y magmáticos. Cada uno de estos ambientes se subdivide a su vez en categorías más específicas, que se describen de manera concisa en los siguientes párrafos.

**Yacimientos diagenéticos:** Las zeolitas originadas en este tipo de entorno están sujetas a las mismas fuerzas naturales que impactan en los minerales de neoformación, a través de la modificación de protominerales de génesis sedimentaria en condiciones de temperaturas moderadas, generalmente por debajo de los 200 °C. En este sentido, la formación de los minerales zeolíticos se ve controlada por el nivel del manto freático y los intervalos en los que experimenta cambios, similar a lo que pasa en los depósitos de minerales metálicos.

Cuando la diagénesis ocurre en suelos de áreas áridas, es posible que se generen acumulaciones inusuales de bicarbonato de sodio, altamente propenso a reaccionar con minerales arcillosos como la montmorillonita. Como resultado de esta interacción, es factible que se formen zeolitas del tipo analcima.

Según Utada (1980) citado por Costafreda (2018), en sistemas hidrológicos abiertos, este proceso que da formación a rocas sedimentarias, la diagénesis, facilita el desplazamiento de aguas meteóricas que se infiltran a través de estratos compuestos por materiales piroclásticos ricos en vidrio volcánico, interactuando con dicho componente. Como resultado de este proceso, el agua experimenta un cambio hacia niveles más alcalinos y salinos, lo que resulta en un aumento del pH y en la creación de minerales como clinoptilolita, chabacita, philipsita y analcima.

**Yacimientos Metamórficos:** Estos depósitos de naturaleza metamórfica, es decir, aquellos originados por la diagénesis de enterramiento y/o metamorfismo en grados extremadamente bajos, albergan minerales como clinoptilolita, heulandita, analcima y laumontita. Estos minerales resultan de un proceso de zeolitización atribuido por el aumento de las temperaturas y la presencia de capas significativas de grauvacas, materiales piroclásticos y lavas en la formación rocosa (Costafreda et al., 2018).

#### **Yacimientos hidrotermales:**

Los depósitos de zeolitas de origen hidrotermal se diferencian de los diagenéticos debido a las variaciones en dos factores fundamentales: temperatura y la presencia de un fluido mineralizante químicamente activo, generalmente con una concentración anómala de iones alcalinos (Costafreda et al., 2018).

En los procesos hidrotermales que ocurren en entornos submarinos, las zeolitas se generan en áreas de alteración vinculadas a concentraciones de plomo (Pb), zinc (Zn) y cobre (Cu), conocidas como tipo kuroco. En estas condiciones, la formación de analcima puede surgir debido a la reacción de la clinoptilolita y la merlinoíta con una solución rica en calcio, lo que también puede dar lugar a la aparición de mordenita (Costafreda et al., 2018).

Es importante destacar que los depósitos hidrotermales se originan por la interacción de aguas subterráneas con rocas calientes en la corteza terrestre. Este proceso conlleva a la liberación de elementos disueltos de las rocas, que luego pueden precipitar como minerales, incluyendo zeolitas, en las zonas de alteración hidrotermal (Costafreda et al., 2018).

**Yacimientos magmáticos:** Dentro de los procesos de origen magmático, la analcima es el único mineral que se origina directamente a partir de un magma. Los cristales visibles de esta especie se forman en ciertas rocas intrusivas básicas alcalinas, en un rango de temperaturas entre 600 y 640°C, acompañadas de presiones que oscilan entre 5 y 13 Kbar. En la mayoría de los casos, la analcima se genera como resultado de la transformación de la leucita, a través de la influencia de soluciones ricas en sodio (Costafreda et al., 2018).

### **1.2.1 Yacimientos Internacionales**

Robert Virta, un especialista en minerales asociado a la Encuesta Geológica de los Estados Unidos, proporcionó la siguiente información sobre la industria de las zeolitas. Durante más de mil años, las rocas volcánicas que contienen zeolitas naturales han sido extraídas en muchas partes del mundo para su uso en la fabricación de cemento y en la construcción. Durante un período considerable, prevaleció la creencia de que las zeolitas naturales solo se hallaban en cantidades limitadas en las cavidades de las formaciones volcánicas. Sin embargo, durante las décadas de 1950 y principios de los años 60, se descubrieron extensos depósitos de zeolitas en tobas volcánicas en el oeste de los Estados Unidos, así como en tobas marinas localizadas en Italia y Japón. Desde entonces, se han encontrado depósitos similares en diversas partes del mundo, desde Hungría hasta Cuba y Nueva Zelanda (Costafreda et al., 2018). El reconocimiento de estos amplios yacimientos impulsó el desarrollo comercial de las zeolitas naturales.

Existen alrededor de 30 países que se dedican a la producción de zeolitas naturales. Sin embargo, de este conjunto, los informes proporcionados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos resaltan aproximadamente 9 países notables.

Entre estos se incluyen los propios Estados Unidos de América, China, Japón, Jordania, Corea, Eslovaquia, Turquía, Cuba y Nueva Zelanda (Costafreda et al., 2018). Es importante resaltar que Cuba y Nueva Zelanda han emergido en las estadísticas globales en el año 2014 y 2015, respectivamente, marcando su entrada en la industria de zeolitas. Estos países, aunque relativamente nuevos en este aspecto, han logrado consolidar su posición en la producción y comercio de zeolitas a nivel internacional (Costafreda et al., 2018).

Producción	Países
170,000	China
380,000 – 430,000	Jordania
235,000	República Corea
150,000	Turquía
130,000 – 150,000	Japón
80,000	Eslovaquia
61,000	EEUU
27,000	Cuba
20,000 – 25,000	Hungría
15,000 – 35,000	Ucrania
22,000	Nueva Zelanda
17,000	Bulgaria
10,000 – 15,000	Sudáfrica
5,000 – 10,000	Australia
5,000 – 10,000	Rusia
5,000 – 10,000	España
3,000 – 5,000	Canadá
3,000 – 5,000	Grecia
3,000 – 5,000	Italia
3,000 – 5,000	Filipinas
1,000	México
400 - 500	Indonesia
<1,000	Argentina
<1,000	Armenia
<1,000	Georgia
<1,000	Alemania
<1,000	Serbia
<1,000	Eslovenia



*Tabla 2. Relación de los principales países productores tradicionales de zeolitas naturales (Fuente USGS citado por Costafreda, 2018).*

### 1.2.2 Yacimientos en México

México, un país rico en recursos naturales, alberga yacimientos significativos de zeolitas que han despertado el interés tanto a nivel nacional como internacional. En esta sección, se explorará la presencia de zeolitas en México.

Los principales países con potencial por zeolitas, según distintas fuentes documentales, son Japón, Italia, Rusia, Alemania, Bulgaria, Hungría, Francia, Estados Unidos y Sudáfrica. En cuanto a los recursos de estas materias primas en México; Ostrooumov (2003) citado por Novo y Costafreda (2018), menciona que en México fueron descubiertas las primeras manifestaciones de zeolitas en los años setenta, específicamente en el estado de Oaxaca. México cuenta con una amplia distribución de yacimientos de zeolitas en varias regiones del país. Los principales depósitos se encuentran en estados como Jalisco, Nuevo León, Sonora, Chihuahua y Baja California. Posteriormente se ubicaron grandes volúmenes de reservas en Puebla y San Luis Potosí.

Es importante mencionar que los depósitos de Oaxaca y Sonora son probablemente los más analizados y de mayor importancia en México. Si apelamos a un ejemplo los datos registrados nos dicen lo siguiente:

- Oaxaca, Municipio Laollaga -15.120.000 toneladas (clinoptilolita, mordenita).
- Sonora, El Cajón – 10.000.000 toneladas (clinoptilolita).
- Sonora, Agua Prieta – 3.000.000 toneladas (erionita) (Nova y Cosafreda, 2018).

Hay grandes yacimientos en México que se han formado a partir de depósitos de rocas y/o cenizas volcánicas, y lleva a la interacción de éstas con las sales del agua de los lagos, agua fluvial, etc., altera las cenizas y rocas produciendo distintos tipos de zeolita. Las zeolitas fueron encontradas en rocas sedimentarias en el país, por F. A. Mumpton en el estado de Oaxaca (Flores, J. L., 2012). Existen notablemente importantes yacimientos de tres de las cinco zeolitas naturales más abundantes en el planeta, no obstante, carece de atención en su explotación como lo hay en otros países como Cuba y Japón (Cosafreda et al., 2018).

Según el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, Puebla tiene una producción de 2.070 toneladas, que la posicionan en un lugar destacado a nivel nacional; en este informe, sólo se encuentra contabilizada la producción de zeolitas de este Estado, si bien las reservas son muy abundantes (Costafreda et al., 2018).

En el período comprendido entre el 2013, 2014 y 2015 la producción experimentó discretos incrementos de 1.828, 2.150 y 2.250 toneladas, respectivamente, con un valor global de unos 4.016.986 pesos mexicanos (Costafreda et al., 2018).

La información contenida en la Tabla 3 se detalla la distribución de los hallazgos de zeolitas en diferentes estados de México, algunos de los cuales están relacionados con los yacimientos potencialmente ricos en estas menas.

<b>DISTRIBUCIÓN DE LOS HALLAZGOS DE ZEOLITAS EN DIFERENTES ESTADOS DE MÉXICO</b>		
<b>YACIMIENTO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>TIPO DE ZEOLITA</b>
<b>Agua prieta</b>	Sonora	Erionita
<b>San Luis Potosí</b>	San Luis Potosí	Clinoptilolita
<b>Tlalco</b>	Guerrero	Clinoptilolita
<b>Cruillas</b>	Tamaulipas	Mordenita
<b>Tepatitlán, Atzinco, Tehuacán</b>	Puebla	Clinoptilolita
<b>La Olla</b>	Guanajuato	Clinoptilolita
<b>Etla, La Magdalena, Hierve el Agua</b>	Oaxaca	Clinoptilolita, mordenita
<b>Zacatecas</b>	Zacatecas	Clinoptilolita- heulandita
<b>Vizcaíno</b>	Baja California Sur	Clinoptilolita



*Tabla 3. Distribución de los hallazgos de zeolitas en diferentes estados de México  
(Fuente: Las zeolitas naturales de México, Universidad Autónoma de San Luis  
Potosí, 2018)*

Desafortunadamente, no se han realizado cálculos precisos de las reservas disponibles; sin embargo, las observaciones directas durante las actividades de exploración geológica han validado que en Oaxaca existen depósitos de mineral de zeolita igualmente significativos que los de Sonora. Esta información corrobora la presencia de considerables reservas de zeolita que pueden ser aprovechadas en beneficio del país. Además, en algunos casos, los análisis indican que se trata de variedades de zeolita con una pureza excepcional, lo que reduce al mínimo los requisitos de procesamiento (Costafreda et al., 2018). Ahora bien, más adelante fueron encontrados otros yacimientos en diferentes estados del país tal es el caso de San Luis Potosí, Guanajuato, Puebla, Guerrero, Tamaulipas e Hidalgo.

En México, se pueden encontrar zeolitas de forma natural en diversas áreas que se localizan en alteraciones de tres tipos de rocas volcánicas en todo el territorio nacional. Para ser más específicos, lugares como Agua Prieta, El Cajón, Tetuachi, Arizpe y San Pedro albergan estos yacimientos. En esta zona, se encuentran depósitos de clinoptilolita-heulandita. Todos estos yacimientos se encuentran en el estado de Sonora. También pueden encontrarse en Oaxaca, San Luis Potosí, Puebla y Guanajuato (Servin, L., 2005, como se citó en Costafreda et al., 2018).

Olguín (1999) citado por Costafreda (2018) afirma que, en 1972, como lo ya mencionado anteriormente en este trabajo, Mumpton, F. realizó En México, se realizó el primer hallazgo de un depósito de zeolitas de tipo sedimentario, que incluye clinoptilolita y mordenita. Este descubrimiento tuvo lugar en el Valle del río Atoyac, ubicado a una distancia de 15 kilómetros al noroeste de la ciudad de Oaxaca y a unos 3 kilómetros al norte del pueblo de Etlá.

En el estado de Oaxaca, expertos han llevado a cabo investigaciones petrográficas y químicas, y a partir de los resultados obtenidos de las muestras analizadas, se deduce que las zeolitas se formaron como resultado de la sustitución de los

minerales presentes en las riolitas y andesitas. Este proceso tuvo lugar en un entorno hidrológico cerrado, como un lago alcalino. Tras evaluar cuatro áreas específicas, se ha llegado a la conclusión de que todas las zonas en el estado de Oaxaca donde se encuentran rocas volcánicas terciarias son de gran importancia geológica y representan áreas prometedoras para la exploración de yacimientos de zeolitas (Calderón, M., 2004, citado por Costafreda, 2018).

### **1.3 Caracterización de las zeolitas**

La caracterización de minerales es un proceso fundamental en geología, mineralogía, geoquímica y otras ciencias relacionadas. Permite identificar y describir las propiedades físicas y químicas de los minerales, lo que es esencial para comprender su formación, ocurrencia y aplicaciones. Se basa en diferentes técnicas que son complementadas con la petrografía que permite el estudio textural de los materiales (Pozo, M., 2019).

En el caso de las zeolitas, la caracterización es especialmente importante debido a sus propiedades únicas, que incluyen:

- Estructura cristalina tridimensional con poros y canales
- Alta capacidad de intercambio iónico
- Capacidad de adsorción y catálisis

Para caracterizar las zeolitas, se utilizan una variedad de técnicas, incluyendo:

Difracción de rayos X

Microscopía óptica

Microscopía de barrido electrónico

Análisis elemental

Tamaño de poro

Cromatografía de gases

La combinación de algunas técnicas permite obtener una caracterización completa de cualquier cristal, en este caso de las zeolitas, que es esencial para comprender

su comportamiento y aplicaciones. En el presente trabajo se explicarán las técnicas de DRX, microscopía de barrido electrónico, caracterización por tamaño de poro y por cromatografía de gases; por las cuales está caracterizada la zeolita del yacimiento de Guanajuato.

La caracterización de las zeolitas es un proceso fundamental para el estudio de estos minerales conocer sus propiedades únicas y su amplia gama de aplicaciones.

### **1.3.1 Difracción de rayos X (DRX)**

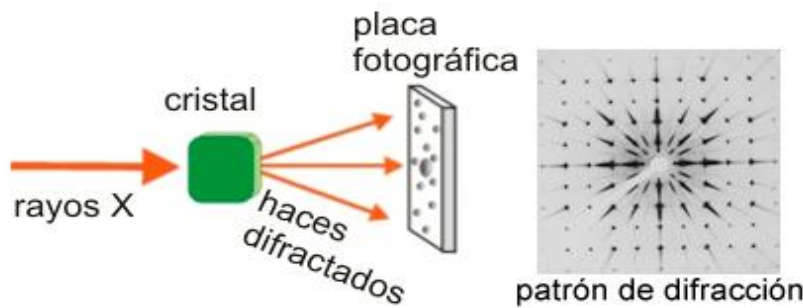
La difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica no destructiva que se utiliza para determinar la estructura cristalina de los materiales. En el caso de los minerales, la DRX se utiliza para identificar y cuantificar las fases cristalinas presentes en una muestra (Aparicio et. al., 2010).

En 1895, Wilhelm Conrad Roentgen descubrió los rayos x. Al principio, los rayos x tuvieron aplicaciones en el campo de la medicina. La noticia más antigua sobre los rayos x en la República mexicana data del 19 de febrero de 1896 y fue publicada en el diario El Estandarte de San Luis Potosí (Aparicio et. al., 2010). Los rayos X son radiación de tipo electromagnética con una longitud de onda mucho más corta que la luz visible, los más usados poseen longitudes entre 0.5 y 0.25 Å. Una de las aplicaciones de la DRX en las nanociencias consiste en determinar las estructuras de nuevos compuestos a partir de sus patrones de difracción (Petrick et. al., 2005) para posteriormente asociar la estructura del compuesto con sus propiedades.

La difracción es un fenómeno que se produce cuando las ondas se desvían al encontrar un obstáculo o atravesar una rendija. Esto ocurre con todo tipo de ondas, como las sonoras, las electromagnéticas y las ondas en la superficie de un fluido. Por lo que da paso a que las ondas que en un principio parecían ser impenetrables a cierta zona puedan ser propagadas (Alonso, P. et. al., 2020).

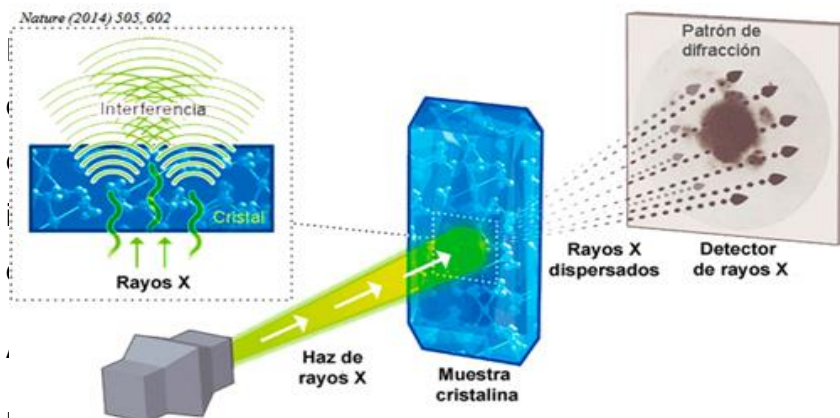
En consecuencia, la difracción de rayos X se refiere al proceso físico mencionado previamente que ocurre al utilizar rayos X. Para la cristalografía, se centra en los rayos X que tienen una longitud de onda cercana a 1 Ångstrom ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ). Esta longitud de onda es comparable a las distancias entre los átomos, lo que

permite que los rayos X interactúen con los átomos y proporcionen información sobre su estructura (Alonso, P. et al., 2020).



sustancia cristalina y se  
el patrón resultante proporciona

información de rayos X en una  
placa (Alonso, P. et al., 2020).



El fenómeno de la difracción  
es una forma de radiación  
electromagnética. Cuando los rayos X  
interactúan con las estructuras cristalinas, se producen interferencias constructivas y destructivas, dando lugar al patrón de difracción de rayos X, s. f.).

La DRX es una técnica muy versátil y se utiliza en una amplia gama de aplicaciones en la caracterización de minerales. Las principales aplicaciones son las siguientes:

Identificación de minerales: la DRX es una técnica muy eficaz para identificar minerales. El patrón de difracción de una muestra es único para cada mineral, lo que permite identificarlo de forma inequívoca.

Cuantificación de fases cristalinas: la DRX se puede utilizar para determinar la proporción de cada fase cristalina presente en una muestra. Esto es importante para comprender la composición de un mineral o para controlar la pureza de un producto.

Estudio de la estructura cristalina: la DRX se puede utilizar para estudiar la estructura cristalina de los minerales. Esto permite comprender las propiedades físicas y químicas de los minerales.

Existen algunas limitaciones que la DRX que es importante tenerse en cuenta. Una limitación es que la DRX solo se puede utilizar para analizar materiales cristalinos. Los materiales amorfos no producen un patrón de difracción. Otra limitación es que

la DRX puede ser susceptible a interferencias de otros materiales presentes en la muestra (Difracción de rayos X, s. f.).

La XRD es una técnica analítica esencial para la caracterización de minerales. Es una técnica no destructiva que proporciona información valiosa sobre la identidad, composición y estructura cristalina de los minerales.

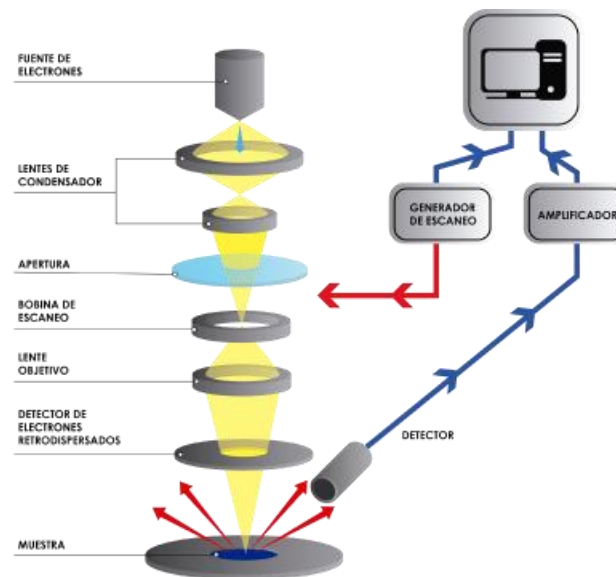
### **1.3.2 Microscopía de barrido electrónico (SEM)**

Por sus siglas en inglés SEM (Scanning Electron Microscope), es una técnica de microscopía que utiliza un haz de electrones en lugar de luz, para crear imágenes de la superficie de una muestra. El haz de electrones se escanea sobre la superficie de la muestra, y los electrones secundarios, emitidos por la muestra, se recogen y se utilizan para crear una imagen que proyectará algunas características aparentes de la muestra para facilitar información sobre las formas, texturas y composición química (Microscopía Electrónica de Barrido. s.f.).

La Microscopía Electrónica de Barrido depende de un microscopio especializado donde la imagen se obtiene a partir de las señales emitidas por la muestra y se va formando a medida que el haz de electrones se desplaza sobre una porción de su superficie. Este barrido (scanning) se realiza línea por línea sobre una pequeña zona de forma rectangular (raster).

Esta zona es la que se visualiza amplificada en la imagen final. A medida que el haz explora la muestra de esta manera la intensidad de la señal generada varía según el punto particular analizado en cada instante. La señal detectada puede ser entonces analizada y amplificada, tanto en su forma analógica como digital, y finalmente procesada convenientemente. A diferencia de una imagen óptica, el microscopio electrónico de barrido no forma una imagen real del objeto, sino que construye una imagen virtual a partir de alguna de las señales emitidas por la muestra. La imagen se visualiza en un tubo de rayos catódicos donde las bobinas de deflexión del haz están sincronizadas con el barrido del haz de electrones en el microscopio (Ipohorski et. al. 2008).

El haz de electrones se genera en un cañón electrónico, que está formado por un filamento calentado y un ánodo, éste se acelera a una energía que suele ser de entre 1 y 30 kiloelectronvoltios (keV). Así se enfoca sobre la superficie de la muestra mediante una serie de lentes electromagnéticas. Después los electrones secundarios se recogen mediante un detector y la imagen se crea mediante un ordenador (Microscopía Electrónica de Barrido. s.f.).



*Figura 4. Esquema del funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido (¿Qué es y cómo funciona un microscopio electrónico de barrido? s.f.).*

La proyección de esta técnica permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra, incluso de muestras que son conductoras, aislantes o transparentes a la luz visible.

Puede utilizarse para estudiar una amplia gama de materiales, desde metales y plásticos hasta tejidos biológicos y minerales.

Es una técnica no destructiva, lo que significa que la muestra no se altera al realizar la observación.

Las aplicaciones de la SEM son muy variadas, incluyendo:

- Investigación científica en campos como la ciencia de los materiales, la biología y la medicina.
- Control de calidad en la industria.
- Diagnóstico médico.

En resumen, la SEM es una técnica versátil y poderosa que se utiliza para estudiar una amplia gama de materiales y aplicaciones.

### **1.3.3 Tamaño de poro**

Los cristales son materiales sólidos formados por átomos, moléculas o iones que se ordenan de manera regular y periódica. Esta estructura ordenada confiere a los cristales una serie de propiedades únicas, como su dureza, resistencia y conductividad.

Una de las propiedades de los cristales que más interesa para su uso y aplicación es el tamaño de poro. Los poros son espacios vacíos que se forman en la estructura cristalina. Su tamaño puede variar desde unos pocos nanómetros hasta varios micrómetros. El tamaño de poro es un factor importante en las propiedades de los cristales. Por ejemplo, los cristales con poros pequeños son más impermeables que los que tienen poros grandes. Además, los poros pueden servir como sitios para la adsorción de moléculas o iones, lo que puede modificar las propiedades químicas y físicas del cristal.

La importancia de conocer el tamaño de poro puede influir en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los cristales. A continuación, se mencionan algunos factores que pueden afectar dichas propiedades:

Permeabilidad: Los cristales con poros pequeños son más impermeables que los que tienen poros grandes. Esto se debe a que los poros pequeños dificultan el paso de las moléculas o iones a través de la estructura cristalina.

Adsorción: Los poros pueden servir como sitios para la adsorción de moléculas o iones. Esto puede modificar las propiedades químicas y físicas del cristal.

Resistencia: Los poros pueden debilitar la resistencia de los cristales. Esto se debe a que los poros pueden crear puntos de estrés en la estructura cristalina.

Conductividad: Los poros pueden aumentar la conductividad de los cristales. Esto se debe a que los poros proporcionan caminos para que las cargas eléctricas fluyan a través de la estructura cristalina.

Al realizar un estudio de tamaño de poro se puede identificar y clasificar los cristales: El tamaño de poro puede utilizarse para distinguir entre diferentes tipos de cristales, como lo es determinar la pureza de los cristales, ya que los poros pueden ser un indicador de impurezas en los cristales. También evaluar las propiedades de los cristales como el tamaño de poro y utilizarse para predecir las propiedades de los cristales (Horacio, R., 2004).

#### **1.3.4 Cromatografía de gases**

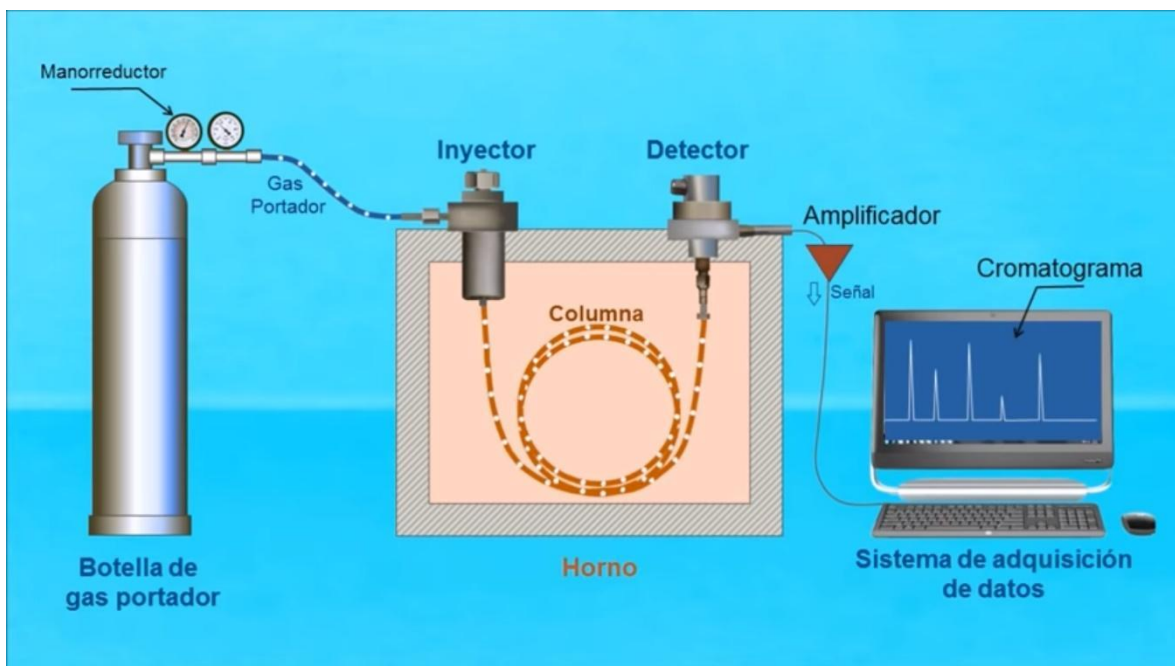
La técnica de cromatografía de gases vio su desarrollo hace aproximadamente cinco décadas. Inicialmente, se utilizaba para analizar compuestos volátiles que resistieran la exposición al calor. Sin embargo, su aplicación se ha expandido a polímeros que generan monómeros volátiles al calentarse (Barquero, M., 2006).

Esta metodología, reconocida por su velocidad y alta resolución, ha demostrado ser eficaz en el análisis de complejas mezclas de hidrocarburos, pesticidas en suelos y vegetales, drogas en muestras sanguíneas, así como solventes industriales y sustancias ecotóxicas derivadas de pesticidas que son consideradas contaminantes ambientales. Además, se aplica en la identificación de aromas y sabores utilizados en la industria alimentaria, así como en la caracterización de fragancias de la industria de perfumes y en investigaciones forenses para detectar las sustancias implicadas en las posibles causas de un incendio (Barquero, M., 2006).



Para utilizar esta técnica cromatográfica de manera efectiva, es crucial elegir cuidadosamente las columnas cromatográficas apropiadas. Existe una amplia variedad de fases estacionarias que fueron diseñadas especialmente para ciertas aplicaciones, por lo tanto, a continuación, podremos ver algunas formas de selección. Además, se brinda información práctica sobre el manejo de cilindros y columnas, trampas de gases y la utilización de diferentes detectores (Barquero, M., 2006).

Para lograr una separación eficiente en un tiempo mínimo, es esencial seleccionar cuidadosamente la columna. Sin embargo, esta columna debe ser capaz de realizar



la misma separación en múltiples ocasiones, lo que significa que debe ser almacenada y manejada con pleno conocimiento de sus restricciones, incluyendo la capacidad de carga de la fase estacionaria, los límites de temperatura y la selección y preparación adecuada de las muestras que se van a separar en ella.

*Figura 5. Proceso del funcionamiento de un cromatógrafo de gases.*

## 1.4 Principales aplicaciones

Las zeolitas naturales representan un medio de filtración altamente eficaz y novedoso para purificar el agua. Su desempeño supera a los filtros convencionales de arena y carbón, brindando una pureza superior y un rendimiento más elevado sin requerir mantenimiento intensivo. Presenta múltiples ventajas frente a la arena y puede sustituirse directamente por esta en un filtro convencional de arena (Zeolita, s. f.).

En la industria, las zeolitas tienen tres aplicaciones principales: catálisis, separación de gases por medio de la absorción e intercambio iónico.

En el ámbito de la catálisis, las zeolitas desempeñan un papel fundamental al actuar como catalizadores en diversas reacciones cruciales involucrando moléculas orgánicas. Entre las más destacadas se encuentran el craqueo, isomerización y síntesis de hidrocarburos. Estas estructuras cristalinas pueden facilitar varias reacciones catalíticas, como reacciones ácido-base y aquellas inducidas por metales. Asimismo, tienen la capacidad de actuar como catalizadores de ácidos y ayuda a los metales activos o reactivos a tener soporte (Zeolita, s. f.).

Un aspecto relevante es que las zeolitas pueden actuar de forma selectiva en la catálisis, ya sea por la selectividad en el estado de transición o al excluir reactivos competidores en función del diámetro de la molécula. Incluso se han utilizado como catalizadores en procesos de oxidación. Estas reacciones se llevan a cabo en los poros de la zeolita, lo que brinda un mayor grado de control sobre los productos resultantes.

En la industria, las aplicaciones principales se centran en el refinamiento del petróleo, la producción de combustibles y la industria petroquímica en general. Es esencial destacar que las zeolitas sintéticas se posicionan como los catalizadores más significativos en las refinerías petroquímicas (Machado, 2014).

Otra de las principales aplicaciones de las zeolitas es la absorción, porque tienen utilidades variadas en diversos materiales. Esto abarca su empleo en procesos de

desecado, purificación y separación. Poseen la capacidad de eliminar agua a presiones parciales extremadamente bajas y actúan como eficaces agentes desinfectantes, siendo capaces de absorber más de un 25% de su peso en agua. Asimismo, la extracción de compuestos químicos orgánicos volátiles en el aire, logrando separar isómeros y mezclar gases (Zeolita, s. f.).

Además, otra característica distintiva de las zeolitas es su habilidad para la separación de gases. La estructura porosa de estas zeolitas puede utilizarse como un filtro para moléculas de un tamaño específico, permitiendo su ingreso a los poros. Este atributo es modificable al variar la estructura, lo que incide en el tamaño y la cantidad de cationes que rodean los poros. También, dentro de los poros, se pueden llevar a cabo otras aplicaciones, como la polimerización de materiales semiconductores y polímeros conductores para generar materiales con propiedades físicas y eléctricas que tienen resultados muy favorables (Zeolita, s. f.).

En el intercambio iónico los cationes hidratados que se encuentran en los poros de las zeolitas están unidos de manera débil y son susceptibles de ser sustituidos por otros cationes cuando se encuentran en un entorno acuoso. Esta característica les confiere utilidad en aplicaciones como el ablandamiento del agua, y su incorporación en detergentes y jabones. Debido a que la zeolita se caracteriza por la capacidad de desprenderse de sus propios iones y captar los mismos disueltos en el agua, es decir actúa como un elemento filtrante, por eso es utilizado en las piscinas o estanques para absorber los iones del agua contaminada que se degenera. (Applications of Zeolites, 2013). Por lo que uno de los usos más comunes de las zeolitas es en la fabricación de detergentes, donde reemplazan a los fosfatos como agentes ablandadores del agua. Este reemplazo se logra al intercambiar los iones de sodio presentes en la zeolita por los iones de calcio y magnesio que se encuentran en el agua. Incluso es posible eliminar iones reactivos del agua contaminada mediante este proceso (Zeolita, s. f.).

#### **1.4.1 Salud**

Específicamente, la clinoptilolita, una variante de zeolita, se valora por su capacidad sobresaliente de filtrado y adsorción de sustancias contaminantes.

La zeolita contribuye al fortalecimiento de la barrera intestinal y facilita el proceso de desintoxicación al atrapar amonio y metales pesados en el tracto gastrointestinal (Biogena, s. f.).

En cuanto a su impacto en el organismo, la zeolita de clinoptilolita atraviesa nuestro sistema digestivo como si fuera una esponja especial. Su acción desintoxicante deriva de sus características físicas: su elaborado sistema de microcanales captura los contaminantes presentes en el entorno y los intercambia por los minerales de su estructura superficial. La zeolita y los contaminantes no son absorbidos por el intestino, sino que la zeolita abandona el cuerpo de manera completa y segura junto con la carga de sustancias contaminantes, asegurando así una protección contra la posible reingestión de dichos contaminantes (Biogena, s. f.).

También se ha empleado en el cuerpo humano para estabilizar la presión arterial al actuar como retenedor y distribuidor del óxido nítrico (NO). Se utiliza como agente antibiótico en el tratamiento de la trombosis (coagulación en los vasos sanguíneos) y en el control de enfermedades renales (Benvindo da Luz, A. 1995 citado por Costafreda, 2014). Este compuesto también encuentra aplicación en la industria de cosméticos y en la fabricación de fármacos, donde actúa como sustancia portadora y liberadora de principios activos (Febles, J. et al. 2007 citado por Costafreda, 2014).

#### **1.4.2 Agricultura**

El uso de zeolita de origen natural en la agricultura ha experimentado un aumento en los últimos dos décadas. Es esencial llevar a cabo un monitoreo continuo de los suelos donde se emplea para comprender sus impactos a largo plazo. Se aplican diversas técnicas para aumentar la productividad en estas áreas, como la incorporación de zeolitas, que optimizan las características del suelo y fomentan la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios. (Jordan et al., 2013, citado por Soca et al., 2016).

El estudio del comportamiento de las zeolitas en distintos tipos de suelos ayuda a la mejora en las propiedades químicas que existen, especialmente en lo que respecta a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la región cercana a las raíces. Además, posibilita la reducción en la aplicación de fertilizantes,

disminuyendo así las pérdidas ocasionadas por volatilización y lixiviación (Zahedi et al., 2012; Gholamhoseini et al., 2013, citado por Soca et al., 2016). Al ser un aluminosilicato poroso y cristalino, la zeolita, accede al intercambio iónico molecular de sus componentes, sin modificar su estructura cristalina (López et al., 2010, citado por Soca et al., 2016). Su capacidad para retener iones como el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y retrasar el proceso de nitrificación las convierte en una opción idónea, contribuyendo a disminuir la lixiviación de amonios y nitratos hacia las aguas subterráneas, gracias a su elevada CIC que oscila entre 120 y 200  $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$  (Jha et al. 2009, citado por Soca et al., 2016). Las zeolitas tratadas al ser utilizadas como fertilizante de liberación lenta pueden aumentar la capacidad de retención de amonio en el suelo hasta 11 veces (Zwingmann et al., 2009, citado por Soca et al., 2016). Además, mejoran la capacidad de conservación de humedad, el movimiento del agua y reduce la densidad del suelo, logrando así un aumento de la producción en las cosechas y una reducción del impacto ambiental (Colombani et al., 2014, citado por Soca et al., 2016).

Costafreda (2014) menciona que la zeolita no funciona como un fertilizante en sí, pero permite recuperar la eficacia de los fertilizantes y asegurar la disponibilidad controlada de los cationes esenciales para las plantas. Diferentes estudios mencionan el potencial de utilizar zeolitas junto con estiércol de cerdo usándose como abonos de liberación lenta que reducen la pérdida de nutrientes por lixiviación.

Se ha verificado que al reemplazar el 20% de los fertilizantes convencionales, se han logrado disminuciones de hasta un 11% en los gastos de fertilización, al mismo tiempo que se ha incrementado la productividad y se ha mejorado la calidad del producto final. Asimismo, se ha investigado el uso de zeolita como sustrato de siembra, demostrando productividades óptimas sin pérdida de plantas debido a problemas fitosanitarios, un sustrato sin hierbas no deseadas y una reducción en los requerimientos de riego gracias a la capacidad de retención de agua de la zeolita (Bowen, 2008). La zeolita es considerada un excelente abono porque puede

mezclarse con urea ( $\text{NH}_2$ ) para mejorar la eficiencia del suelo agrícola. Además, su capacidad de absorción de la humedad ayuda a prevenir el derrumbe de las raíces.

### **1.4.3 Descontaminación del aire**

La zeolita, un mineral microporoso con propiedades únicas, se ha destacado como una herramienta efectiva en la descontaminación del aire. Uno de los métodos para producir zeolitas hidrofóbicas implica controlar la proporción de silicio a aluminio, un proceso conocido como "dealuminización". Estas zeolitas presentan diferentes tamaños de ventana, generalmente entre 0.3 y 3.0 nanómetros, variando según el tipo específico. La relación Si/Al y el intercambio de iones pueden influir en el tamaño de la ventana de la zeolita (Cox, L. et al., 1999).

En la actualidad, las zeolitas hidrofóbicas se utilizan para concentrar compuestos orgánicos volátiles (COV) antes de su destrucción. Estos concentradores, esquematizados en la Figura 2, operan como adsorbedores de oscilaciones de temperatura, con el lecho montado en un rotor que se regenera periódicamente. Este enfoque reduce drásticamente el flujo de aire que pasa al incinerador, disminuyendo la cantidad de combustible requerido para elevar la temperatura del flujo de aire (Cox, L. et al., 1999).

La concentración de COV se incrementa alrededor de diez veces mediante este proceso, junto con el "valor de calentamiento" de los COV. Esto permite reducir tanto el tamaño como el costo del incinerador necesario para eliminar los COV, así como la cantidad de combustible requerida. Se debe garantizar que la concentración de COV concentrada esté por debajo de una cuarta parte del Límite Inferior de Explosividad (LIE) por motivos de seguridad, lo que generalmente implica una concentración de entrada no mayor a aproximadamente 500 partes por millón (ppm) (Cox, L. et al., 1999).

Las zeolitas hidrofóbicas demuestran eficiencia en la adsorción y desorción de COV, brindando ventajas sobre el carbón en términos de rango de temperatura y capacidad de adsorción. Además, se aplican en convertidores catalíticos para capturar COV en motores que utilizan gasolina, liberando los COV posteriormente durante la desorción y catalizando su oxidación (Cox, L. et al., 1999).

En el caso de motores diésel que emiten óxidos de nitrógeno (NOx), las zeolitas con intercambio de cerio y el uso de urea o amoníaco como agentes reductores pueden catalizar la reducción de NOx a nitrógeno y oxígeno. Estos hallazgos son esenciales para abordar la problemática del cambio climático, ya que también se ha investigado la separación de dióxido de carbono de los gases de escape utilizando zeolita 13X, una alternativa efectiva al "carbón absorbente" (Cox, L. et al., 1999). Asimismo, la zeolita Chabazite se ha utilizado para eliminar bióxido de azufre de los gases de escape, contribuyendo a la reducción de emisiones nocivas y a la mitigación de la lluvia ácida. Además, se ha demostrado que la zeolita natural Clinoptilolite es eficaz para eliminar amoníaco de aguas residuales, además de controlar olores indeseados y humedad causados por COV, especialmente en alfombras y entornos específicos. Cabe destacar su capacidad para catalizar la oxidación de hidrocarburos en presencia de luz (Cox, L. et al., 1999).

En conclusión, la zeolita se presenta como una herramienta versátil y efectiva en la descontaminación del aire, abriendo posibilidades para abordar problemáticas ambientales y mejorar la calidad del aire que respiramos. Su potencial en diversas aplicaciones, desde la eliminación de COV hasta la reducción de gases de efecto invernadero, la convierte en un recurso valioso en la lucha por un entorno más limpio y sostenible.

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

La siguiente información fue tomada de los experimentos realizados en el laboratorio del departamento de Zeolitas de la BUAP.

### **2.1 Reactivos**

Se utilizó urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) para la activación de la zeolita.

### **2.2 Materiales**

La muestra de zeolita que se tomó fue proporcionada por el Departamento de Investigación en Zeolitas de la BUAP.

Urea

Agua destilada

Recipiente resistente al calor

Batidora industrial de 20 L de capacidad.

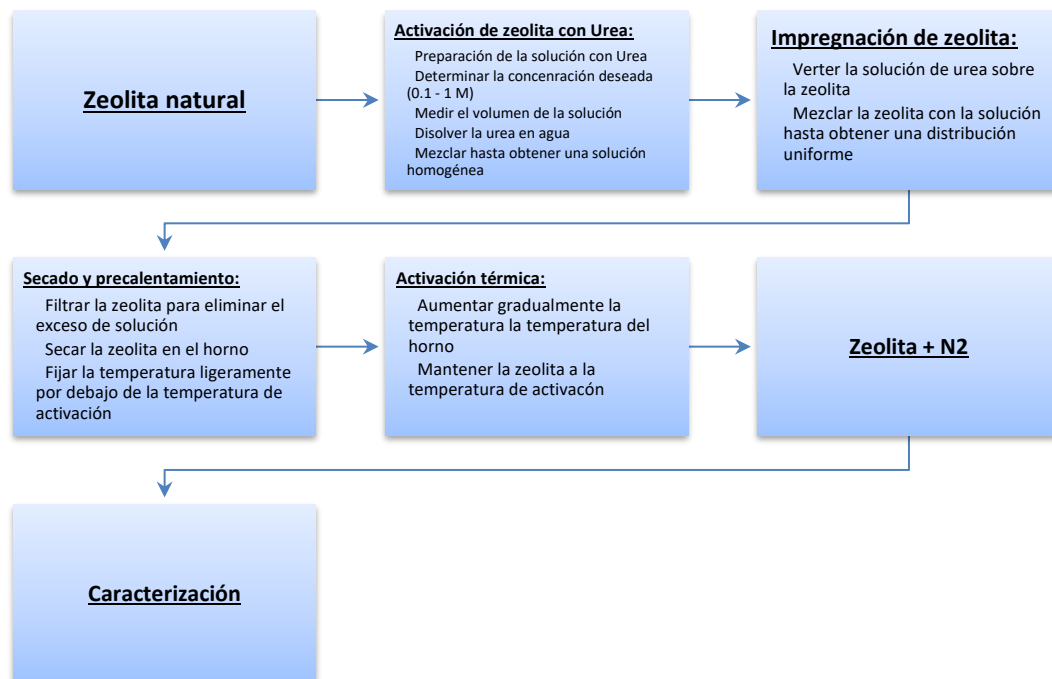
Horno de secado

Termómetro

Equipo de protección personal (guantes, gafas de seguridad, bata de laboratorio)

### 2.3 Activación de zeolita

Las partículas de zeolita son aluminosilicatos acuosos de calcio, sodio y otros metales con una estructura de marco que consta de ventanas, canales y cavidades al nivel de la red cristalina. Debido a esta estructura especial, la sustancia con la cual la zeolita será activada se distingue por un alto nivel de selectividad para la adsorción a nivel molecular. La activación de la zeolita permite incrementar sus propiedades de adsorción e intercambio iónico. Se requiere de cuatro etapas principales que se esquematizan en la siguiente figura.





*Figura 6. Etapas del proceso de activación de la zeolita para ser llevada a la caracterización mineral.*

Procedimiento:

1. Preparación de la solución con urea

- a. Calcular la cantidad de urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) necesaria para preparar una solución con la concentración deseada. La concentración típica de urea utilizada para la activación de zeolita es de 0.1 a 1 M.

En este caso buscamos se desea preparar 500 ml (0.5 L) de solución de urea con una concentración de 0.5 M para la activación de zeolita. Por lo que, para obtener la cantidad de urea necesaria en gramos, se realiza el siguiente cálculo:

$$\begin{aligned} & \text{gr de } \text{CH}_4\text{N}_2\text{O} \\ &= \{(\text{Litros de la solución})(\text{Moles de la concentración})\}(\text{Masa molar de la urea}) \\ & \text{gr de } \text{CH}_4\text{N}_2\text{O} = \{(0.5 \text{ L})(0.5 \text{ M})\}(64 \text{ g/mol}) = 15 \text{ gr} \end{aligned}$$

- b. Disolver la cantidad calculada de urea en agua destilada hasta obtener una solución homogénea.

2. Impregnación de la zeolita

- a. Colocar 1kg de zeolita sin activar en la batidora.
- b. Verter la solución de urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) sobre la zeolita, asegurándose de que toda la zeolita quede completamente impregnada.
- c. Mezclar la zeolita con la solución de urea para garantizar una distribución uniforme.

3. Secado y precalentado

- a. Eliminar el exceso de solución de urea filtrando la zeolita.
- b. Colocar la zeolita en el recipiente resistente al calor.
- c. Meter la zeolita impregnada en un horno a una temperatura de 80-100 °C durante 2-4 horas, para su secado.
- d. Precalentar la zeolita seca en el horno a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de activación deseada durante 1 hora.

#### 4. Activación térmica

- a. Aumentar la temperatura del horno gradualmente hasta alcanzar la temperatura de activación deseada (típicamente entre 300 y 500 °C).
- b. Mantener la zeolita a la temperatura de activación de 3 a 4 horas.
- c. Apagar el horno y dejar que la zeolita se enfríe lentamente a temperatura ambiente dentro del horno.

#### 5. Enjuague y secado final

- a. Enjuagar la zeolita activada con agua destilada para eliminar cualquier resto de urea.
- b. Secar la zeolita activada en el horno a una temperatura de 80-100 °C durante 2-4 horas.

## **2.4 Caracterización de la zeolita**

La siguiente información de las técnicas experimentales fue tomada de los análisis realizados en el Centro Universitario de Vinculación y Transferencia de Tecnología (CUVITT) en Guanajuato, México.

### **2.4.1 Difracción de rayos X**

La cristalinidad de los sólidos fue determinada por difracción de rayos X usando un difractómetro DRX BRUKER D8 DISCOVER, acoplado a un tubo de rayos X, utilizando como blanco un ánodo de cobre. La monocromatización a  $K\lambda$  se logra mediante un monocromador de haz difractado con un tamaño de paso de 0.02. Se

realizó un barrido de las muestras a estudiar con ángulos  $\theta = 3-90^\circ$  empleando una radiación de cobre (Cu) a 20KV Spot size 48 y 1 min de barrido y 30 mA. Los compuestos presentes en las muestras sometidas a estudio se identificaron con ayuda de tarjetas del Comité Conjunto de Estándares de Difracción (JCPDS por sus siglas en inglés, Joint Committee of Powder Diffraction Standards).

#### **2.4.2 Caracterización por Espectroscopía de energía dispersiva (EDS)**

Esta técnica proporciona información acerca de la composición química de las partículas ya que cuando la muestra es irradiada por el haz de electrones se generan rayos X que pueden ser detectados. El espectro EDS se obtiene tras recoger los fotones emitidos por la muestra durante un determinado periodo (minutos) y permite identificar y cuantificar los diferentes elementos presentes en el material. Esta técnica se emplea acoplada a microscopios electrónicos de transmisión o de barrido y a microscopio de rayos X. El equipo empleado es un JEOL JSM-6610 LV, WD 10 MM, KV 20 Spot size 48, 1 min de barrido. Todas las muestras estándares y problema fueron analizadas por triplicado y los valores obtenidos en este reporte corresponden al promedio de las 3 repeticiones.

#### **2.4.3 Propiedades texturales**

Todas las isotermas de adsorción de  $N_2$  se determinaron a la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido (77 K en la Ciudad de Puebla, México), usando un sistema de adsorción volumétrico totalmente automatizado (ASAP 2000 de MICROMERITICS). Este sistema fue calibrado previamente con muestras de referencia. Las isotermas de adsorción fueron determinadas en el intervalo de presiones relativas,  $p/p_0 = [10^{-5}, 1]$ ;  $p$  siendo la presión de vapor del  $N_2$  y  $p_0$  la presión de saturación del mismo adsorbible, la cual será registrada continuamente durante todo el intervalo de las mediciones de adsorción-desorción. Se usa un tamaño de malla específico (malla 60-80) para el tamaño de granulo de todas las muestras. De manera previa a las corridas experimentales de sorción de  $N_2$ , cada muestra se desgasificará por medio de un tratamiento térmico a  $350^\circ\text{C}$  durante 20 horas bajo un vacío de  $10^{-6}$  Torr.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 DRX

Los análisis de los difractogramas de DRX para las muestras en estudio indican la presencia fundamentalmente de Heulandita, Ca, Arcilla y  $\alpha$ -cuarzo. En las Tablas 1,2 están citadas la fuente y la mineralogía de las fases cristalinas presentes en las muestras problema, las cuales fueron llamadas Tritón 1 y Tritón 2.

Los resultados de EDS confirman la presencia de cationes mayoritarios y la presencia, a la par de las zeolitas, de Montmorillonita y  $\alpha$ -cuarzo.

Los análisis de textura confirmaron el tipo de isoterma acorde a las zeolitas, además de la forma y tamaño de los poros relacionados a la zeolita y materiales acompañantes.

Fase	Num de tarjeta	Nombre
$\text{Rb}_{0.72}\text{K}_{0.12}\text{Sr}_{0.05}\text{Ca}_{1.66}\text{Al}_{4.26}\text{Si}_{13.74}\text{O}_{36}(\text{H}_2\text{O})_{10.25}$	04-016-1826	Heulandita-Ca
$\alpha\text{-SiO}_2$	01-085-0795	$\alpha$ -cuarzo
$(\text{Na, Ca})_{0.3}(\text{Al, Mg})_2(\text{SiO}_2)_{10}(\text{OH})_2 n\text{H}_2\text{O}$	00-007-0051	Montmorillonita-Ca

*Tabla 4. Fases cristalinas, Difracción de Rayos X, Tritón 1.*

Fase	Num de tarjeta	Nombre
$\text{Rb}_{0.72}\text{K}_{0.12}\text{Sr}_{0.05}\text{Ca}_{1.66}\text{Al}_{4.26}\text{Si}_{13.74}\text{O}_{36}(\text{H}_2\text{O})_{10.25}$	04-016-1826	Heulandita-Ca
$\alpha\text{-SiO}_2$	01-085-0795	$\alpha$ -cuarzo
$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{SiO}_2)_{10}(\text{OH})_2 n\text{H}_2\text{O}$	00-007-0051	Montmorillonita-Ca

*Tabla 5. Fases cristalinas, Difracción de Rayos X, Tritón 2.*

Los resultados de difracción de rayos X en las muestras de zeolitas se muestran en la Figura 7 se observa que se tiene un arreglo cristalino, debido a la presencia de picos que indican la difracción en algunas posiciones angulares; así mismo estos picos corresponden a diferentes posiciones donde la muestra está difractando. Además, las características de la celda unitaria y de manera global, se observan condiciones de difracción distintas entre las muestras, lo que significa y confirma la presencia de los distintos cristales. Estos difractogramas indican la presencia de Heulandita - Ca (04-016-1826), Montmorillonita-Ca (00-007-0051) y cuarzo (01-085-0795).

(Coupled TwoTheta/Theta)

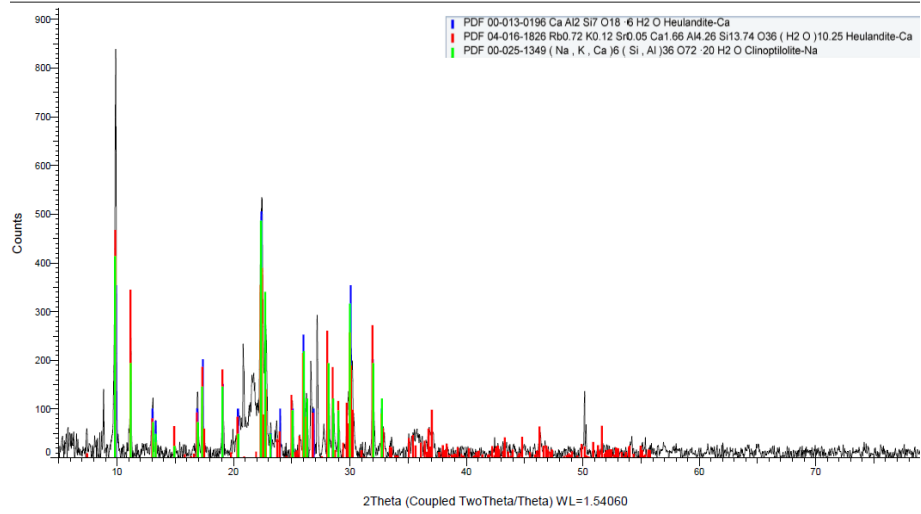


Figura 7. Patrón de difracción de Rayos X en muestra Triton1

Triton

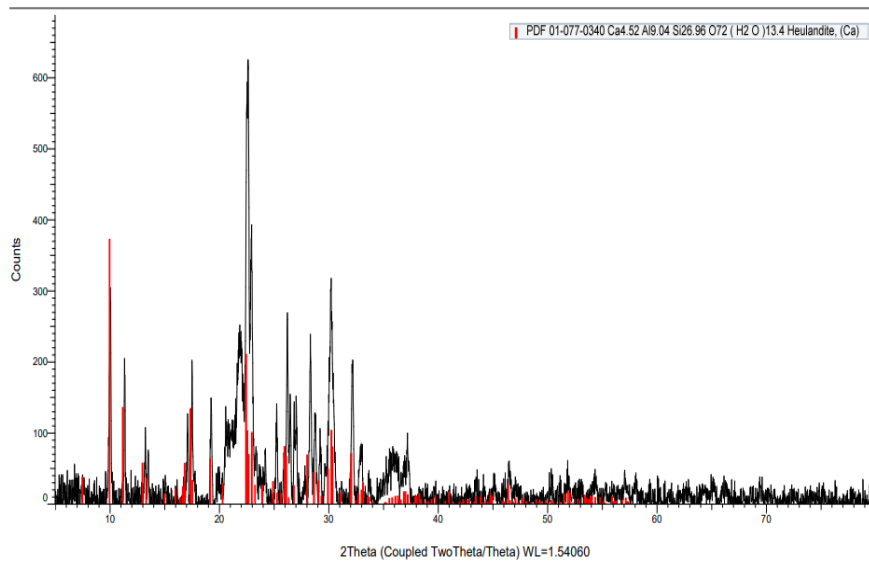


Figura 8. Patrón de difracción de Rayos X en muestra Tritón 2.

### Clinoptilolita

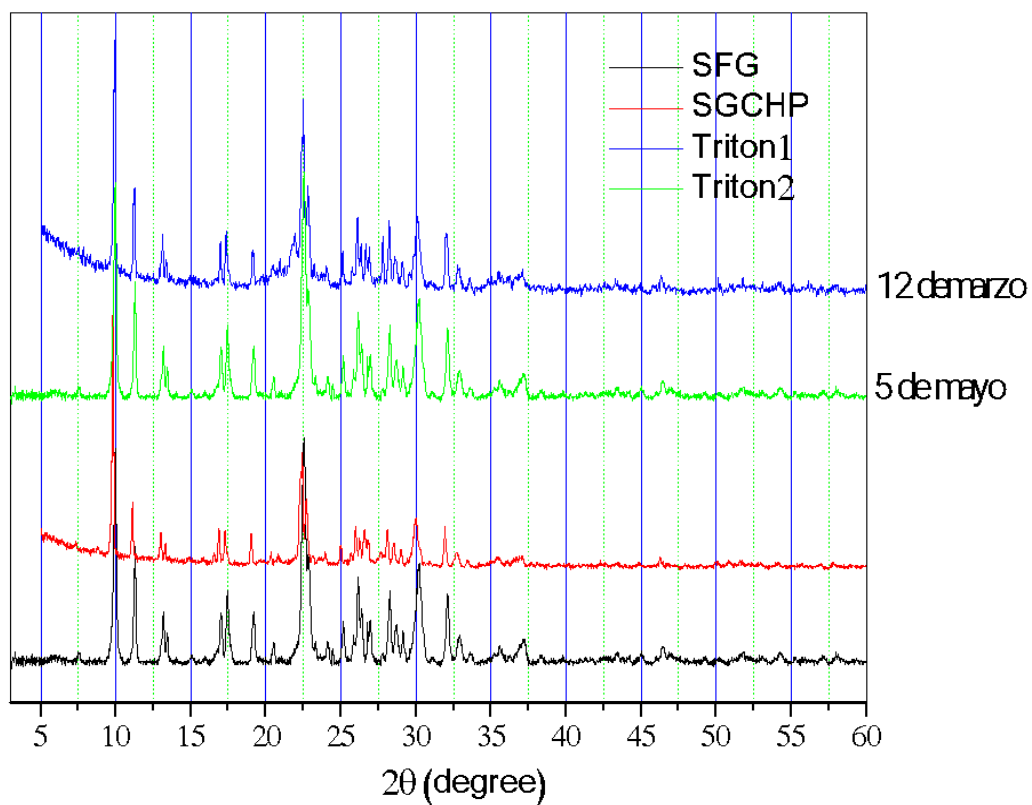


Figura 9. Patrón de difracción de Rayos X en muestras Triton1 y Triton2

### 3.2 Espectroscopia por energía dispersiva, EDS.

Los resultados del análisis de EDS nos muestran un análisis semicuantitativo de la tova zeolítica, Tabla 6. De esta tabla se observa que existe una relación molar (RM) Si/Al = 5.277, se observa de esta tabla que existe una secuencia en la concentración de cationes predominantes: K>Fe>Ca>Mg>Na. La cantidad de C es muy importante. Con base en esta composición química y con los resultados de DRX se puede concluir que estamos hablando de una tova constituida mayoritariamente por la zeolita Clinoptilolita-K, de arcilla Montmorillonita y SiO<sub>2</sub>.

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Total	Si/Al
Spectrum 1	Yes	59.4 2	0.3 6	0.6 1	5.5 5	29.2 9	2.6 1	1.0 7	1.0 9	100. 00	5.277
Spectrum 2	Yes	60.0 7	0.4 4	0.5 2	5.3 7	29.2 1	2.4 7	1.0 5	0.8 8	100. 00	
Spectrum 3	Yes	58.9 1	0.6 3	0.8 2	5.4 6	29.4 6	2.7 9	1.1 0	0.8 5	100. 00	
Mean		59.4 6	0.4 8	0.6 5	5.4 6	29.3 2	2.6 2	1.0 7	0.9 4	100. 00	
Std. deviation		0.58	0.1 4	0.1 5	0.0 9	0.13	0.1 6	0.0 2	0.1 3		
Max.		60.0 7	0.6 3	0.8 2	5.5 5	29.4 6	2.7 9	1.1 0	1.0 9		
Min.		58.9 1	0.3 6	0.5 2	5.3 7	29.2 1	2.4 7	1.0 5	0.8 5		

Tabla 6. Composición química de la zeolita Tritón 1.



Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Nb	Total	Si/Al
Spectrum 1	Yes	22.56	49.90	0.40	3.09	19.74	1.12	1.18	0.98	1.02	100.00	6.388
Spectrum 2	Yes	18.91	51.97	0.46	3.51	21.14	1.17	1.25	0.57	1.01	100.00	
Spectrum 3	Yes	21.25	50.87	0.44	3.32	19.87	1.21	1.19	0.75	1.09	100.00	
Mean		20.91	50.92	0.43	3.31	20.25	1.17	1.20	0.77	1.04	100.00	
Std. deviation		1.85	1.03	0.03	0.21	0.77	0.05	0.04	0.21	0.04		
Max.		22.56	51.97	0.46	3.51	21.14	1.21	1.25	0.98	1.09		
Min.		18.91	49.90	0.40	3.09	19.74	1.12	1.18	0.57	1.01		

Tabla 7. Composición química de la zeolita Tritón 2.

### 3.3 Estudios de textura, adsorción de N<sub>2</sub> a 77 K

En la figura 10 y 11 se puede observar un aumento en el volumen de N<sub>2</sub> en la zeolita a medida que la presión fue incrementando, tanto para la muestra Tritón 1 como para Tritón 2. Las dos isotermas de adsorción de N<sub>2</sub> en la zeolita muestran la cantidad de N<sub>2</sub> adsorbida (eje y) en función de la presión relativa (eje x). La presión relativa se define como la relación entre la presión de gas (P) y la presión de saturación (P<sub>0</sub>).

Se puede decir que la forma de ambas gráficas sugiere que la adsorción ocurrió principalmente en la superficie externa de la zeolita y en los microporos más pequeños, debido al incremento de volumen conforme la presión incrementaba.

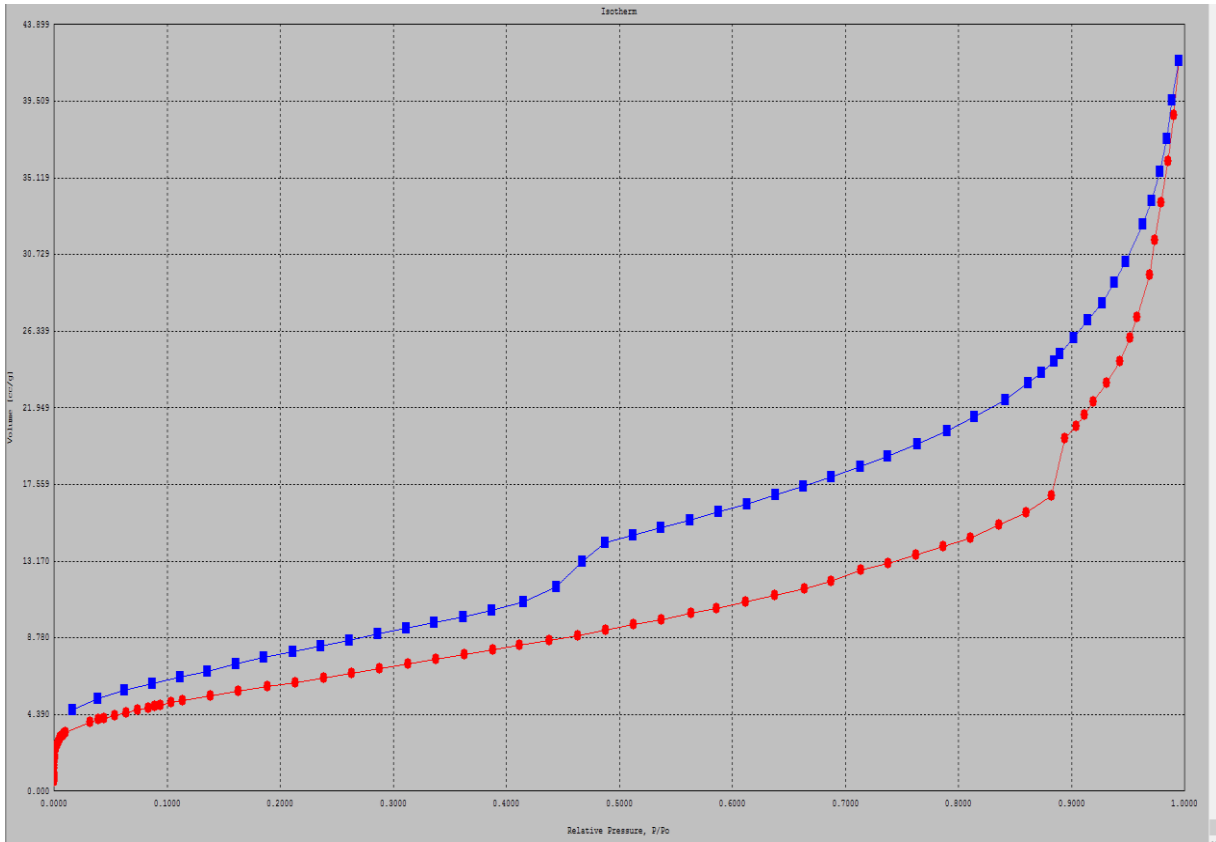


Figura 10. Isotherma de adsorción de  $N_2$  en zeolita Triton1.

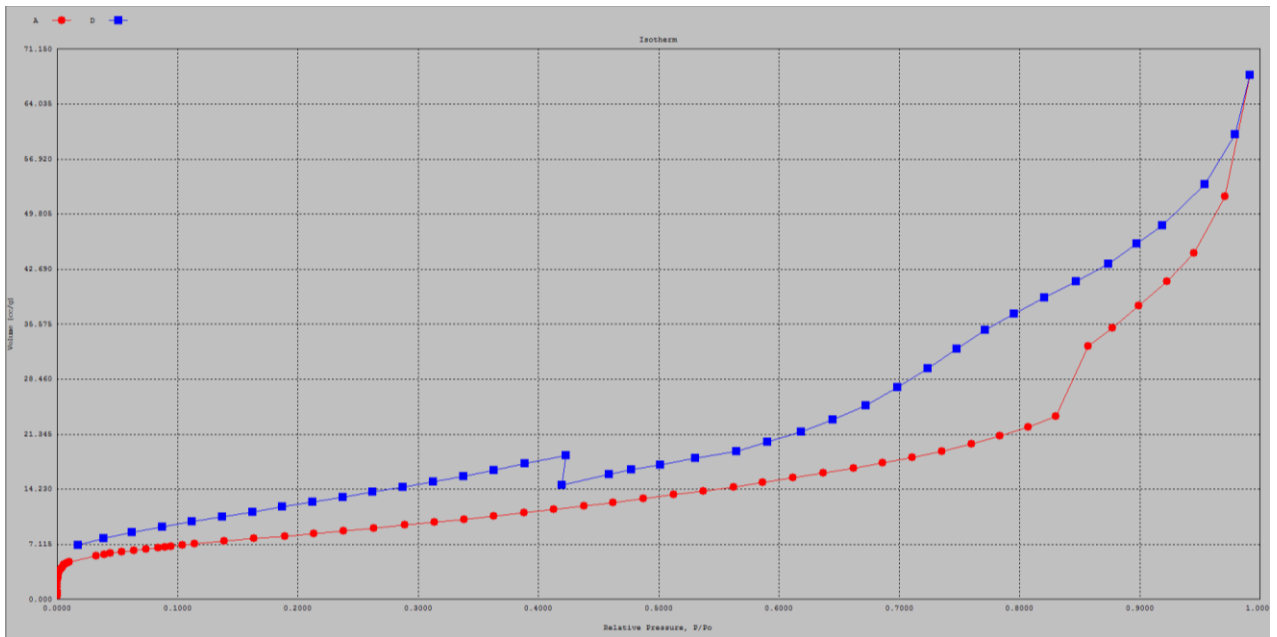


Figura 11. Isotherma de adsorción de  $N_2$  en zeolita Triton2.

En la Figura 12 y 13 se observa la interpretación de la Gráfica de Desorción en Función del Tamaño de Poro. La gráfica muestra la relación entre la cantidad de gas desorbido y el tamaño de poro de la zeolita. El eje x representa el diámetro de los poros en angstroms (Å), mientras que el eje y representa la cantidad de gas desorbido (no se especifica la unidad). Se puede notar que la curva muestra una tendencia general de desorción a mayor tamaño de poro, lo que significa que se desorbe más gas a medida que los poros son más grandes.

Se pueden observar tres etapas principales en la curva de desorción:

1. Desorción rápida a bajos tamaños de poro: En esta región, la desorción ocurre rápidamente debido a que el gas que se encuentra en los poros más pequeños se libera fácilmente.
2. Desorción gradual a tamaños de poro intermedios: A medida que aumenta el tamaño de los poros, la desorción se vuelve más lenta, ya que el gas en estos poros requiere más energía para escapar.
3. Desorción lenta a grandes tamaños de poro: En esta región, la desorción se vuelve aún más lenta, ya que el gas se difunde más fácilmente a través de los poros grandes y se desorbe a una velocidad menor.

La forma de la curva de desorción proporciona información sobre la distribución del tamaño de poro del material adsorbente. Un material con una distribución uniforme de tamaños de poro mostrará una curva de desorción suave y continua. Por otro lado, un material con una distribución de tamaños de poro no uniforme mostrará una curva con escalones o inflexiones, lo que indica la presencia de poros de diferentes tamaños.

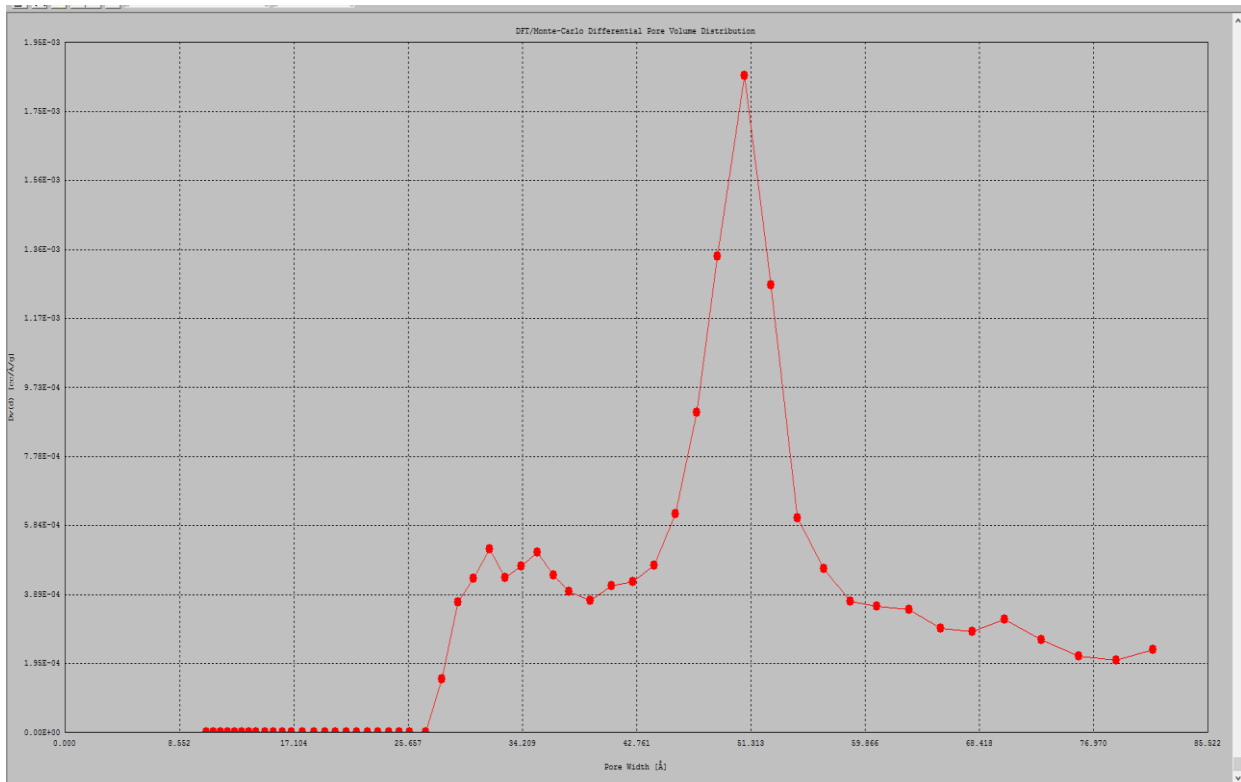


Figura 12. Distribución de tamaño de poros en zeolita Triton1

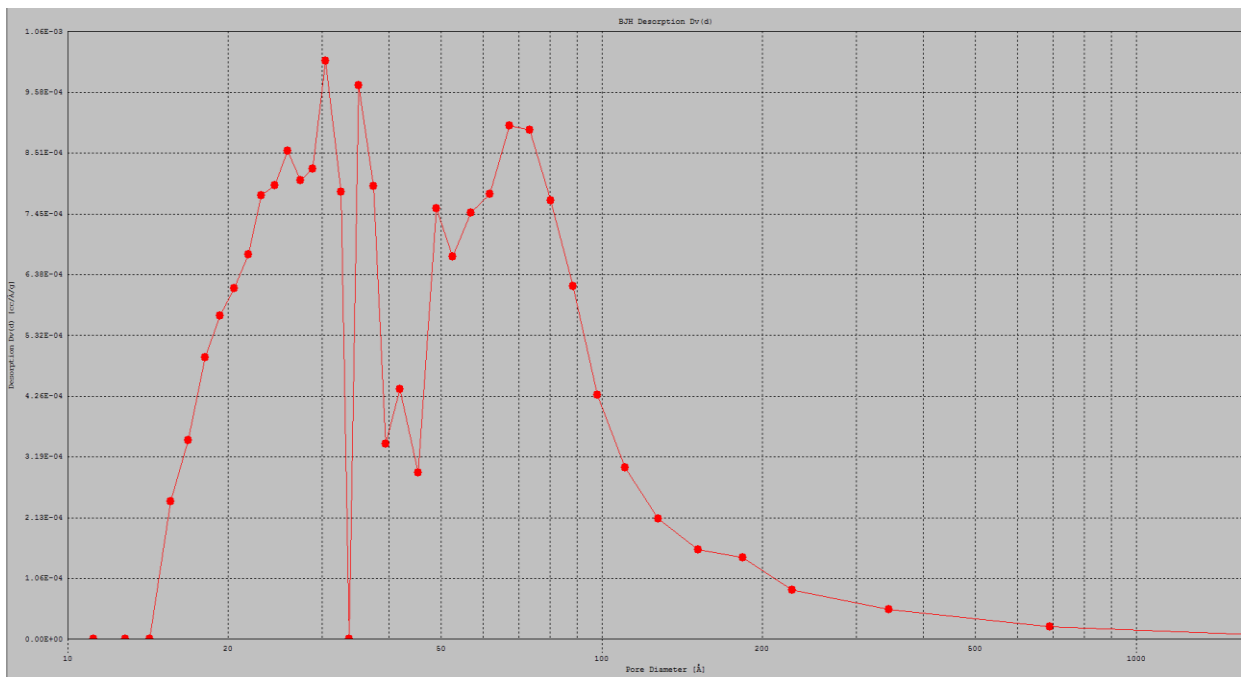


Figura 13. Distribución de tamaño de poros en zeolita Tritón 2

Los resultados de la adsorción de N<sub>2</sub> a 77 K nos indican que se presenta una isoterma II-IV donde sus características distintivas son un contenido alto de microporos (zeolita), un efecto de histéresis a baja presión y una presencia de mesoporos atribuido a la presencia de montmorillonita. La distribución de poros indica la presencia de una distribución bimodal, con un grupo predominante en 3 nm seguido de un grupo minoritario 7 nm.

### **3.4 Aplicaciones de la zeolita caracterizada**

La zeolita Heulandita-Ca, también conocida como heulandita cálcica, es un mineral natural con propiedades únicas que la hacen atractiva para una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores. A continuación, se detallan algunas de sus aplicaciones más importantes:

#### **3.4.1 Aplicaciones Industriales**

Uno de los principales usos de la Heulandita-Ca que tiene como característica una estructura porosa altamente organizada que la convierte en un excelente material adsorbente y catalítico. Su capacidad para adsorber y liberar moléculas de forma selectiva, junto con su estabilidad térmica y química, la convierten en un candidato ideal para ser utilizada en procesos como:

##### 1. Catálisis

- Craqueo catalítico: Se utiliza como catalizador en el craqueo catalítico de hidrocarburos pesados para producir combustibles y productos petroquímicos. Su capacidad para romper moléculas grandes en moléculas más pequeñas la hace ideal para este proceso en la producción de combustibles y productos químicos (A. P. Davis et al. 2018).
- Refinería de petróleo: Se emplea en la refinación de petróleo para eliminar impurezas como azufre y nitrógeno, mejorando la calidad del producto final. Su selectividad hacia estas impurezas la convierte en una alternativa atractiva a los catalizadores convencionales (R. M. Barrer, s.f.).
- Síntesis de compuestos químicos: También se utiliza como catalizador en la síntesis de diversos compuestos químicos, como isobuteno, etileno y

propileno. Su capacidad para controlar la reacción y promover la formación de productos específicos la hace valiosa para la industria química (R. Delgado, et. al., 2020)

## 2. Separación de gases

- Captura de CO<sub>2</sub>: Se utiliza para capturar CO<sub>2</sub> de emisiones industriales y de centrales eléctricas. Su alta selectividad hacia CO<sub>2</sub> y su capacidad para regenerarse la convierten en una opción prometedora para la mitigación del cambio climático (R. G. Franco, et. al. 2018).
- Purificación de gases: se emplea para eliminar contaminantes de mezclas de gases, como agua, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y compuestos orgánicos volátiles (COV). Su capacidad para adsorber selectivamente estas impurezas la hace útil para la purificación de gases industriales y medicinales (R. G. Franco, et. al. 2018).
- Concentración de gases: Se utiliza para concentrar gases específicos de mezclas gaseosas, como oxígeno y nitrógeno. Su capacidad para adsorber y liberar gases de forma selectiva la convierte en un método eficiente para la separación de gases (R. G. Franco, et. al. 2018).
- Secado de gases y líquidos: Deshidratación de gases naturales y líquidos industriales (R. G. Franco, et. al. 2018).

## 3. Construcción

- Aislamientos térmicos y acústicos: La HeCa se utiliza en la fabricación de aislamientos térmicos y acústicos para edificios y viviendas. Su baja conductividad térmica y su capacidad para absorber la humedad la convierten en un material aislante eficaz (F. Pacheco-Torgal et al. 2014).

- Materiales de construcción: Se emplea como aditivo en materiales de construcción como el cemento y el hormigón, mejorando su resistencia y durabilidad. Su capacidad para controlar la porosidad y la hidratación del material la convierte en un aditivo valioso para la construcción (F. Pacheco-Torgal et al. 2014).
- Adsorción de humedad: Se utiliza para controlar la humedad en edificios y espacios confinados, previniendo la condensación y el moho. Su capacidad para adsorber y liberar agua la convierte en un deshumidificador natural eficaz. Regulando la humedad de ambientes interiores (F. Pacheco-Torgal et al. 2014).

### **3.4.2 Aplicaciones en la agricultura**

La Heulandita-Ca se utiliza en agricultura para:

Liberación controlada de nutrientes: La HeCa se utiliza para encapsular fertilizantes y pesticidas, liberándolos lentamente en el suelo y de manera controlada a las plantas, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos. Esto reduce la lixiviación de nutrientes y la contaminación ambiental, al mismo tiempo que mejora la eficiencia de los fertilizantes (D. Ming et al., 2020).

Adsorción de amoníaco: Se emplea para adsorber amoníaco del estiércol de animales, reduciendo el olor y las emisiones de gases de efecto invernadero. Su capacidad para adsorber selectivamente amoníaco la convierte en una alternativa ecológica al tratamiento convencional del estiércol (D. Ming et al., 2020).

Mejora de la calidad del suelo: Se utiliza para mejorar la estructura y para aumentar la retención de agua y de nutrientes en el suelo, lo que favorece el crecimiento y la fertilidad de las plantas. Su capacidad para adsorber y liberar agua la convierte en un aditivo beneficioso para el suelo (D. Ming et al., 2020).

Control de enfermedades: Reduce la incidencia de enfermedades fúngicas en los cultivos (D. Ming et al., 2020).

### **3.4.3 Aplicaciones en la salud**

Adsorción de toxinas: La Heulandita-Ca se utiliza en aplicaciones biomédicas para la adsorción de toxinas y metabolitos dañinos del cuerpo (C. Laurino, et. al. 2015).

Purificación de sangre: Elimina toxinas de la sangre en pacientes con insuficiencia renal o hepática (C. Laurino, et. al. 2015).

Desintoxicación: Ayuda a eliminar toxinas del cuerpo en casos de envenenamiento o exposición a sustancias nocivas (C. Laurino, et. al. 2015).

Entrega de medicamentos: La Heulandita-Ca se utiliza como vehículo para la entrega de medicamentos debido a su capacidad para encapsular y liberar medicamentos de manera controlada.

Medicamentos para el cáncer: Entrega de medicamentos dirigidos a células cancerosas.

Vacunas: Desarrollo de vacunas más estables y eficaces.

Regeneración de tejidos: La Heulandita-Ca se investiga para su uso en la regeneración de tejidos debido a su capacidad para promover el crecimiento celular.

Ingeniería de tejidos: Desarrollo de andamios para el crecimiento de células y tejidos.

Medicina regenerativa: Reparación de tejidos dañados o enfermos.

### **3.4.4 Otras aplicaciones:**

Tratamiento de aguas residuales: La HeCa se utiliza para eliminar contaminantes de aguas residuales, como metales pesados, compuestos orgánicos y fosfatos. Su capacidad para adsorber selectivamente estas impurezas la convierte en una alternativa ecológica al tratamiento convencional de aguas residuales.

Industria farmacéutica: La HeCa se emplea como agente desecante en la industria farmacéutica para mantener la estabilidad de los medicamentos y prevenir la degradación. Su capacidad para adsorber la humedad la convierte en un material de secado ideal para productos farmacéuticos.



Industria alimentaria: La HeCa se utiliza como aditivo en la industria alimentaria para controlar la humedad, prevenir el deterioro y mejorar la textura de los alimentos. Su capacidad para adsorber y liberar agua la convierte en un aditivo funcional beneficioso para la industria alimentaria.

Es importante destacar que la investigación sobre las aplicaciones de la Heulandita-Ca está en constante desarrollo, y se esperan nuevos descubrimientos en el futuro.

## **CONCLUSIONES**

En conclusión, la caracterización de las zeolitas con propiedades únicas que las hacen útiles en diversas aplicaciones industriales. La comprensión de su estructura atómica, cristalización, tamaño de celda y otras características es fundamental para su uso efectivo.

En cuanto a los métodos de caracterización se puede apreciar que las gráficas de desorción y adsorción de N<sub>2</sub> en zeolita Heulandita Ca proporcionan información valiosa sobre su distribución de poros y comportamiento de adsorción. La desorción a mayor tamaño de poro y la forma de tipo I en la isoterma de adsorción sugieren una superficie externa accesible y microporos uniformes.

La zeolita heulandita-cálcica (HeCa) ha demostrado ser un material altamente versátil con un amplio espectro de aplicaciones industriales. Su capacidad para adsorber y liberar moléculas de forma selectiva, junto con su estabilidad térmica y química, la convierten en un candidato ideal para diversos procesos.

La HeCa es un material sostenible y respetuoso con el medio ambiente, ya que puede regenerarse y reutilizarse en muchos procesos. Además, su capacidad para adsorber contaminantes y mejorar la eficiencia de procesos industriales la convierte en una herramienta valiosa para la mitigación del cambio climático y la protección del medio ambiente.

En resumen, la zeolita heulandita-cálcica es un material con un gran potencial para el desarrollo de nuevas tecnologías y la mejora de procesos industriales existentes.

Su versatilidad, propiedades únicas y beneficios ambientales la convierten en un material clave para el futuro de diversas industrias.

Es importante destacar que la investigación sobre las aplicaciones de la HeCa es un campo activo y en constante evolución. Se espera que se descubran nuevas aplicaciones y se desarrollen nuevas tecnologías basadas en este material en el futuro.

## REFERENCIAS

Alonso Abad, P., Castroviejo Fernández, Ma P., Mansilla Cuesta, M., Delgado Tajadura, J. J., Rodríguez Ruiz, D., Sampaio Neves, H. M. (2020) La difracción de rayos X. Color y Ciencia. <https://colorycienciajmburgos.wordpress.com/2020/01/27/la-difraccion-de-rayos-x/>

M.E. Aparicio, G.G. Carvajal, «Utilidad de la difracción de rayos x en nanociencias,» Mundo nano UNAM, vol. 3, nº 2, p. 63, 2010.

S. Petrick, R. Castillo, «Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas,» Revista de la Facultad de Ciencias de la UNI, vol. 9, nº 1, pp. 1-5, 2005.

Applications of Zeolites. (2013). Obtenido de <http://www.ch.ic.ac.uk/vchemlib/course/zeolite/applications.html>

Ay, A. N., Cingiz, K., & Uzun, B. B. (2019). Characterization and some properties of natural clinoptilolite zeolite from Turkey. Acta Physica Polonica A, 136(5), 786-788.

Barquero, M. (2006). PRINCIPIOS Y APLICACIONES DE LA CROMATOGRAFÍA DE GASES. Editorial Universidad de Costa Rica.

Biogena GmbH, & Co, K. G. (s.f.). Zeolita. Biogena GmbH & Co KG. Recuperado: 20 de septiembre de 2023 <https://www.biogena.com/es-ES/saber/zeolita.html>

Cárdenas Reinoso, D. A., Touma Faytong, M. A. (2011). "Estudio comparativo de dos métodos de fertilización del cultivo de Arroz: usando briquetas de urea con diferentes concentraciones de zeolita y el sistema tradicional en la zona Febres

Cordero - Provincia de Los Ríos" [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19161/2/TESIS%20FINAL%202.pdf

Calderón, M. Mineralogía, petrografía y química de las rocas volcánicas zeolitizadas del Estado de Oaxaca: implicación económica., Octubre 2004.

Chica Toro, Fáber de Jesús; Londoño Benítez, Lina María; Álvarez Herrera, María Isabel. (1 enero- junio 2006). La zeolita en la mitigación ambiental. Revista Lasallista de Investigación, vol. 3, pág. 31 y 32.

Cortés, A. C. (Ed.). (2009). La importancia de las zeolitas. Revista cuadernos tomas. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3760692.pdf>

Costafreda Mustelier, J. L., Martín, D. A., Costafreda Velázquez, J. L. (2018). Las Zeolitas Naturales de Iberoamérica.

Curi, A., Granda, W. J. V., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. CIT Información Tecnológica, 17(6), 111–118. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642006000600017>

Cox, L., Strum, M., & Vogel, C. A. (1999). ZEOLITA UN ADSORBENTE VERSÁTIL DE CONTAMINANTES DEL AIRE.

Davis, R., & Noble, R. (2018). Zeolites in Industrial Separation and Catalysis. John Wiley & Sons.

Delgado, M. R., Hernández, H. A., Valdés, G. G., Solís, G. L. C., & Reyes, B. R. (2019). New applications of the natural zeolite Hauynite. Proceedings of the International Conference on Sustainable Development in Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), 1, 9-15.

Descripciones petrográficas. (2011). Descripciones petrográficas. Recuperado 6 de noviembre de 2021, de [https://www.ugr.es/%7Eagcasco/msecgeol/secciones/petro/pet\\_petrograf.htm](https://www.ugr.es/%7Eagcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_petrograf.htm)

Difracción de rayos X s. f. Universidad Politécnica de Cartagena.

EDS Analysis. Energy Dispersive Spectroscopy. (s. f.). Thermo Fisher Scientific. Recuperado 6 de noviembre de 2021, de <https://www.thermofisher.com/nl/en/home/materials-science/eds-technology.html>

Eloísa, A. C. M., Guadalupe, C. A. G., Eloísa, A. C. M., & Guadalupe, C. A. G. (s. f.). *Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias*. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912010000200062&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912010000200062&script=sci_arttext)

Flores, A.; Bosch P.; Lara, V.; Ordaz, V.; Cortés, J.; De León F. (2003). Caracterización Mineralógica y técnica de materiales zeolíticos naturales de uso comercial. *Soc. Española Mineral*. 26, 59-67

Flores, J., Maubert A. y. Martín N. (Ed.). (2006). *EVALUACION DE LOS INTERCAMBIOS IONICOS EN UNA ZEOLITA NATURAL MEXICANA PARA LA SEPARACION DE N2-O2 EN EL AIRE ATMOSFÉRICO* (Vol. 5). REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA.

García, A. C., Rodríguez, M. A. C., Pescador, R. F., & Pérez, M. R. (2018). Thermal behavior of the mordenite zeolite and its application in gas separation processes. *Energy Procedia*, 146, 24-29.

Horacio López, R. (2004). Caracterización de Medios Porosos y Procesos Percolativos y de Transporte. Universidad Nacional de San Luis.

L.F.Vassallo, Ph.D., "Yacimientos Minerales Metálicos" 4ª edición 2008. Versión OnLine, Bol-e. Centro de Geociencias, UNAM. Querétaro, México.

Li, S., Shang, Y., Yan, J., Zhao, Z., & Xie, Y. (2021). Mechanistic insight into the effect of chabazite zeolite on the activity and stability of iron catalyst in Fischer-Tropsch synthesis. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 40, 351-361.

López-Ramón, M. V., Stoeckli, F., Moreno-Castilla, C., Carrasco-Marín, F., & Carrasco-Marin, F. (2016). Chemical activation of clinoptilolite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(5), 1454-1459.

Marian Rigñack-Delgado, Ana Mary Sánchez-Rodríguez, Aymeé Reyes-Dalmau, Ramón Arias-Gilart (2020) Reducción de metales pesados en el crudo ligero cubano con el uso de zeolita.

Ma, X., Wang, H., Wang, H., O'Brien–Abraham, J., y Lin, Y. S. (2015). Pore structure characterization of supported polycrystalline zeolite membranes by positron annihilation spectroscopy. *J. Memb. Sci.* 477 (1), 41– 48.

Marlow, V. S. L. (s. f.). Qué es la zeolita. ZEOCEM. Recuperado 4 de diciembre de 2021, de <https://www.zeocem.com/es/zeolita>

Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera: Techniques of Mineral Characterization and their Use inmining Exploration and Exploitation. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3722368>

Microscopía Electrónica de Barrido. (s. f.). SERVICIOS CENTRALES DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN. Recuperado: 16 de Septiembre de 2023, <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>

Montes-Luna A. de J., Fuentes-López N. C., Perera-Mercado Y. A, Pérez-Camacho O., Castruita-de León G., García-Rodríguez S. P., García-Zamora M.. (2015). Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca<sup>2+</sup> por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases.. 2021, de Sociedad mexicana de Ciencia y Tecnología de superficies y materiales Sitio web: <http://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v28n1/1665-3521-sv-28-01-00005.pdf>

Novo, R., & Costafreda, J. L. (s. f.). Las zeolitas naturales de México. Las zeolitas naturales de Iberoamérica. Recuperado 6 de noviembre de 2021, de [https://oa.upm.es/50786/1/zeolitas\\_Mexico.pdf](https://oa.upm.es/50786/1/zeolitas_Mexico.pdf)

Obregón-Portocarrero, N., Díaz-Ortiz, J. E., Daza-Torres, M. C., & Aristizabal-Rodríguez, H. F. (2016). Efecto de la aplicación de zeolita en la recuperación de nitrógeno y el rendimiento de maíz. *Acta Agronómica*, 65(1), 24-30.

Palacio Espinosa, C., UEA FIT. (2019). Difracción de Rayos X. 2021, de EAFIT Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=q2KPBbMI-r4&t=14s>

¿Qué es y cómo funciona un microscopio electrónico de barrido? (s.f.). Metalinspec Recuperado: 15 de Septiembre de 2023, <https://www.blog.metalinspec.com.mx/que-es-y-como-funciona-un-microscopio-electronico-de-barrido>

Ramón, B. E. V. (1998) IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL TIPO CLINOPTILOLITA. [Universidad Autónoma de Nuevo León]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://core.ac.uk/download/pdf/76582657.pdf>

Ríos García, R., Badillo Cruz, R., (1978) Una Nueva localidad de Zeolitas Volcano sedimentarias en México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/267-sitio/articulos/tercera-epoca/3902/1239-3902-16>

Rodolfo García Franco, Miguel Ángel Hernández, Roberto Portillo Reyes, Vitalii Petranovskii, Efraín Rubio, Karla Fabiola Quiroz Estrada (2018) ADSORCIÓN DE CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> EN ZEOLITAS NATURALES DE PORO ANGOSTO.

Pozo Rodriguez, M. (2019). EL PAPEL DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y GEOQUÍMICA EN EL ESTUDIO DE LAS CULTURAS ANTIGUAS: EJEMPLOS DE EXCAVACIONES ESPAÑOLAS EN ORIENTE.

Virta, R., L. (2008, June). Mineral resource of the month: natural and synthetic zeolites. GEOTIMES. [http://www.geotimes.org/june08/article.html?id=nn\\_zeolites.html](http://www.geotimes.org/june08/article.html?id=nn_zeolites.html)

Servicio Geológico Mexicano. (2017). Yacimientos minerales. octubre 2021, de Gobierno de México Sitio web:

[https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Yacimientos-minerales.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimientos-minerales.html)

Shabgard, H., Zhang, L., & Bakhshandeh, R. (2020). Natural zeolites: Properties, applications, and environmental impact. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126013>.

Soca, M., & Daza, C. (2016). Evaluación de fracciones granulométricas y dosis de Zeolita para la agricultura. *SciELO*.

Zeolita Sintética. Tamiz Molecular. Absorbente Humedad - Sercalia. (17 de Julio de 2014). [sercalia.com](https://www.sercalia.com). <https://www.sercalia.com/zeolita-sintetica/>

Zeolita. (s. f.). [Ecured.cu](https://www.ecured.cu). Recuperado: 19 de septiembre de 2023 <https://www.ecured.cu/Zeolita>