

## Síntesis de Zeolitas tipo Gismondina empleando desechos urbanos e industriales Synthesis of Gismondina-type Zeolites using urban and industrial waste

L. E. Ibarra-Cruz <sup>a</sup>, F. Legorreta-García <sup>a</sup>, A. L. García-Hernández <sup>a</sup>, J. Valdez-Sierra <sup>a</sup>,

N. K. Pérez-González <sup>a</sup>, D. Díaz-Guzmán <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Laboratorio de Tecnología de Cerámicos, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

En este trabajo de investigación, se presenta la síntesis de zeolitas que pertenecen al grupo tipo Gismondina elaborada a partir de arena de caolín, hidróxido de sodio y lata de aluminio, empleando el método hidrotermal. Se estudia el efecto de la adición de aluminio previamente disuelto en una solución de NaOH 2M, así como la estabilidad térmica de la estructura de la zeolita obtenida. Los productos obtenidos son analizados mediante las técnicas de caracterización de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Los resultados ponen en evidencia que el aluminio adicionado, es indispensable para sintetizar la zeolita. Se pone en evidencia que la estructura de los polvos obtenidos no es estable a 400 °C.

### Palabras Clave:

Zeolitas, Síntesis Hidrotermal, Gismondina, Caolín, Aluminio.

### Abstract

In this research work, the synthesis of zeolites belonging to the Gismondina type group made from kaolin sand, sodium hydroxide and aluminum can, using the hydrothermal method is presented. The effect of the addition of aluminum previously dissolved in a 2M NaOH solution is studied, as well as the thermal stability of the structure of the zeolite obtained. The products obtained are analyzed using X-ray diffraction characterization techniques and scanning electron microscopy. The results show that the added aluminum is essential to synthesize the zeolite. It is evident that the structure of the powders obtained are not stable at 400 °C.

### Keywords:

Zeolites, Hydrothermal Synthesis, Gismondine, Kaolin, Aluminum.

## 1. Introducción

Sabiendo que el oxígeno, el silicio y el aluminio son los elementos más abundantes en la corteza terrestre, 46.6%, 27.7% y 8.1% en peso respectivamente, la cantidad de compuestos llamados aluminosilicatos es muy extensa. Uno de los grupos más interesantes de este tipo de materiales inorgánicos son las zeolitas, que, si bien se encuentran de forma natural, también se pueden fabricar en el laboratorio. Las zeolitas sintéticas poseen características físicas y químicas más uniformes en calidad y por lo tanto, tienen un mejor desempeño en las aplicaciones (Król, 2020). Las zeolitas son generalmente microporosas (Jha & Singh, 2016) y permiten aglomerar cationes en sus cavidades electronegativas (Data Base IZA). Dependiendo del tamaño de los poros intercrystalinos, las zeolitas se describen como zeolitas con

tamaño de poro grande (de 0.7 a 0.8 nm FAU, MOR), zeolita con tamaño de poro medio (de 0.5 a 0.6 nm MFI, ZSM) y zeolita con tamaño de poro pequeño (de 0.3 a 0.4 nm LTA, DDR, SAPO-34) (Pal et al., 2013). Gracias a esta propiedad de las zeolitas, así como a su alta cristalinidad, la topología de sus estructuras le confieren una importante gama de aplicaciones. La relación Si/Al en las zeolitas forman diferentes estructuras y una manera de modificar esta relación, es variando la proporción inicial de los precursores.

Es sabido que el Al, es el metal natural más abundante en la corteza terrestre. Sin embargo, la demanda ha incrementado de manera exponencial (World-Aluminium, 2018), (Betzabé-Piña, 2011). La bauxita, mineral del cual se obtiene el aluminio, al ser un recurso no renovable, puede llegar a escasear de manera crítica. Para producir 1 Ton de Al, se necesitan 2 Ton de alúmina y de 3 a 6 Ton de bauxita (Meyer, 2004). Aunque se han planteado

\*Autor para la correspondencia: [ib368339@uaeh.edu.mx](mailto:ib368339@uaeh.edu.mx)

Correo electrónico: [ib368339@uaeh.edu.mx](mailto:ib368339@uaeh.edu.mx) (Luz Elena Ibarra-Cruz), [profe\\_974@uaeh.edu.mx](mailto:profe_974@uaeh.edu.mx) (Felipe Legorreta-García), [ga354193@uaeh.edu.mx](mailto:ga354193@uaeh.edu.mx) (Andrea Lizbeth García-Hernández), [va189463@uaeh.edu.mx](mailto:va189463@uaeh.edu.mx) (Jonatan Valdez-Sierra), [Nelly Karina Pérez-González \(pe219945@uaeh.edu.mx\)](mailto:Nelly Karina Pérez-González (pe219945@uaeh.edu.mx)), [di264094@uaeh.edu.mx](mailto:di264094@uaeh.edu.mx) (Damián Díaz-Guzmán)

reservas económicamente viables de bauxita, se acabaría en aproximadamente 100 años (Meyer, 2004). Este hecho, sugiere que pudiera acabarse en un menor tiempo. Lo anterior, obliga a estudiar diferentes técnicas para reutilizar este metal de los desechos urbanos.

Los caolines, la bentonita y los feldspatos (Yoldi et al., 2019), materiales que generalmente están compuestos de silicio y aluminio, han sido ampliamente usados para sintetizar zeolitas. Sin embargo, en los artículos revisados la metodología indica que, al emplear caolín es imperativamente necesario calcinarlo de 700° a 800° C para obtener metacaolín (Rodrigues et al., 2016), (Novembre et al., 2021) de la misma manera otros autores emplean ambientes corrosivos para desintegrar la estructura del caolín (Wang et al., 2019) (Espejel-Ayala et al., 2015) antes de someterse al proceso de síntesis, implicando que el tratamiento tenga un costo de producción elevado.

Empresas dedicadas a la extracción y procesamiento del caolín suelen acumular grandes cantidades de desechos industriales con alto contenido de sílice, denominados arenas de caolín. Para evitar la contaminación ambiental con estas arenas es importante buscar alternativas de reciclaje.

Se ha reportado que las zeolitas del tipo Gismondina (GIS) poseen dimensiones de canal y diámetro de poro de 3.1 x 4.5 y de 2.8 x 4.8 Angstroms respectivamente (Albert et al., 1998), (Jha & Singh, 2016). Una importante diversidad de síntesis se ha reportado para elaborar zeolitas tipo Gismondina tales como la síntesis sonoquímica (Pal et al., 2013), el método de sales fundidas (Park et al., 2000a,b) y el más comúnmente publicado es el de síntesis hidrotermal (Zhang et al., 2019). La metodología de síntesis de las zeolitas tipo Gismondina, es muy distante de un procedimiento a otro, sin embargo, los parámetros más importantes son el tiempo, la temperatura y la concentración del NaOH (Yoldi et al., 2019).

Respecto a las aplicaciones, se ha sugerido el uso de este material para remover los iones de metales alcalinos como el estroncio y cesio (Barrer & Munday, 1971), (Ma et al., 1998), para el tratamiento de aguas ácidas de mina, eliminando de más del 95% de As, Ni, Ca, Cu, Fe y Mn; así como más del 50 % de iones  $\text{NH}_4^+$ , Mg, K y Zn (Cardoso et al., 2015). Este tipo de zeolita también ha sido utilizada como agente antibacterial y en la adsorción de iones potasio; teniendo buen efecto inhibitor sobre el *Staphylococcus aureus*, con una tasa bacteriostática de 89% (Gao et al., 2018). Estas aplicaciones de zeolitas se ven fuertemente afectadas por el tamaño de los poros, el tipo de canales, superficie específica y la morfología microscópica de los cristales.

El aporte científico de este trabajo, es presentar un método de síntesis que permita obtener zeolita tipo Gismondina sin los procesos de ataque químico ni de calcinación del caolín, aprovechando desechos urbanos e industriales como latas de aluminio y arenas de caolín, así como la evaluación de la reactividad química de los polvos obtenidos.

## 2. Metodología

### 2.1 Síntesis hidrotermal

Para el proceso de síntesis se emplearon latas de aluminio pulverizadas; arena de caolín, de la empresa Moliendas Beycar S.

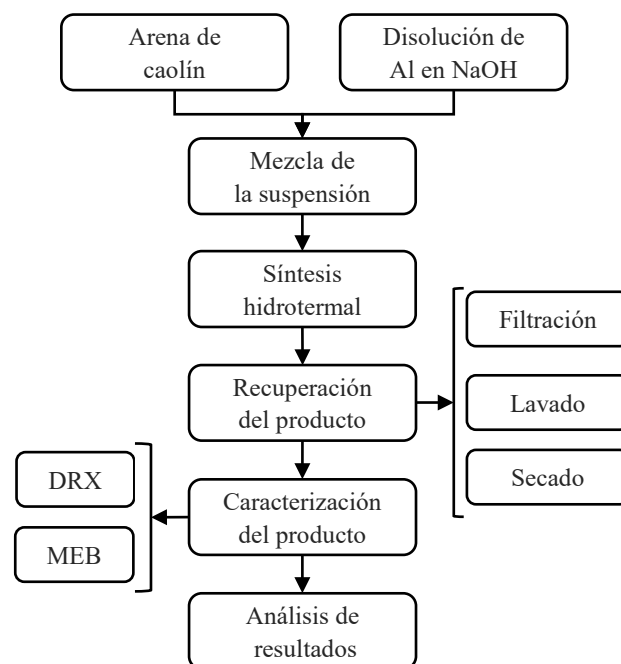
de R.L. de C.V, ubicada en el municipio de Metepec, estado de Hidalgo; NaOH marca Macron Fine Chemicals con pureza de 98% y agua desionizada.

Para la preparación del polvo de aluminio, se pulverizó una lata de refresco, mediante un molino de cuchillas, hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 595  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, el polvo de Al se disolvió en una solución 2M de NaOH con agitación constante a temperatura ambiente durante 24 h, obteniendo para su estudio una concentración de 5 g/L de Al.

Con el objetivo de comparar el efecto del Al en solución, se utilizaron dos reactores hidrotermales, en uno se colocaron 3g de arena de caolín (a la arena no se le realizó ningún tratamiento) y 30 ml de la solución de Al; en el otro reactor se adicionó la misma cantidad de arena de caolín, únicamente con agua desionizada. Ambos reactores se dejaron reaccionar durante 24 h, a una temperatura de 145 °C. La experimentación se hizo por triplicado.

Después del proceso de reacción hidrotermal, los polvos obtenidos fueron lavados sobre un papel filtro con abundante agua desionizada a una temperatura de aproximadamente 45°C hasta obtener un pH de 7, posteriormente se secó en una estufa a 80°C durante 24 h.

En la Figura 1 se observa paso a paso el desarrollo experimental que se llevó a cabo para obtener la zeolita tipo Gismondina y técnicas de caracterización empleadas para su análisis.



**Figura 1. Diagrama de bloques del desarrollo experimental y técnicas de caracterización empleadas para síntesis de zeolitas tipo Gismondina.**

### 2.2 Estabilidad térmica

Este estudio se realizó comparando las señales de difracción de los polvos sin calcinar y calcinados a 400°C, 500°C, 600°C y 800°C en atmósfera de aire. La calcinación se realizó en una mufla, aplicando una velocidad de calentamiento de 10°C/min, durante 2 h y posteriormente se designó un enfriamiento natural

### 2.3 Estudio Cristalográfico

El producto sólido obtenido se caracterizó por medio de la técnica de difracción de rayos X (DRX) para observar la identificación de las fases cristalinas a temperatura ambiente. Los materiales se analizaron con un difractómetro marca INEL modelo Equinox 2000, el rango del ángulo 2 theta se ejecutó de 5-100°, la fuente de irradiación fue de Co K $\alpha$ 1 ( $\lambda=1.789010$  Å), con un detector curvo, 30 mA de corriente y un voltaje de 25 kV. Los patrones de difracción de rayos X se indexaron con el programa Match.

### 2.4 Microscopía electrónica de barrido

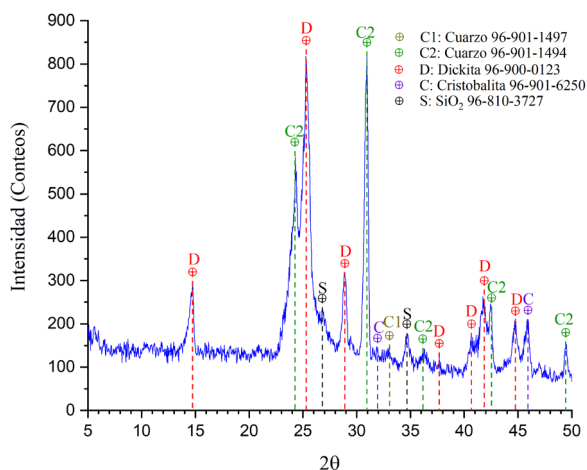
El análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) se realizó en un JSM-IT300 (JEOL Ltd., Tokio, Japón) y un detector de rayos X OXFORD (OXFORD Instruments, Oxford, Reino Unido) con 30 kV de tensión de aceleración. El análisis se realizó con polvos de la muestra colocados sobre una cinta de grafito de doble cara adhesiva y posteriormente se recubrió al vacío con oro, con el fin de hacer conductora la muestra, se hicieron rutinas puntuales semicuantitativas en áreas de barrido de aproximadamente 4,5 mm<sup>2</sup>.

## 3. Análisis y resultados.

### 3.1 Difracción de rayos X (DRX)

El estudio cristalográfico de la arena de caolín se muestra en la Figura 2 se logran observar mayoritariamente dos fases polimórficas cristalinas de la Sílice (SiO<sub>2</sub>), una en forma de Cuarzo y la otra detectada como Cristobalita, además de una tercera fase cristalina que corresponde a la Dickita, fase polimórfica de la Caolinita (Al<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>9</sub>Si<sub>2</sub>), ficha PDF 96-900-0123.

El pico de Cuarzo, detectado a un valor de 2 theta aproximadamente a 31°, posee una intensidad similar a la de la Dickita con un valor de 2 theta aproximadamente a 25°.



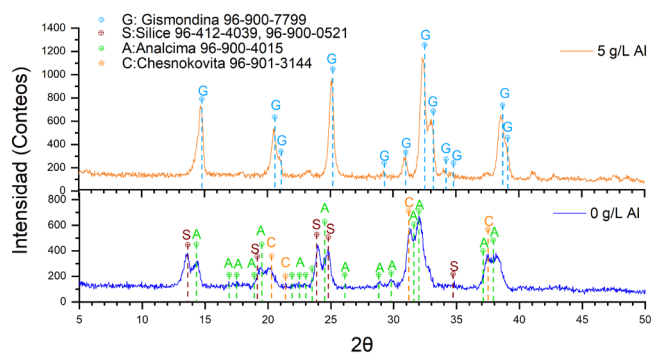
**Figura 2. Identificación de las fases presentes en las arenas de caolín sin ningún tratamiento.**

En la Figura 3, se observa el difractograma de los polvos obtenidos después del tratamiento hidrotérmico. Al indexar, las señales de difracción indican que la muestra analizada es una zeolita que pertenece al grupo Gismondina como fase mayoritaria, con ficha técnica 96-900-7799 (Hansen et al., 1989).

### 3.2 Efecto de la adición de aluminio.

El análisis cristalográfico de los polvos obtenidos después de ser sometidos a la reacción hidrotérmica con y sin solución de aluminio, son mostrados en la Figura 3, se aprecia que cuando no se adiciona la solución de aluminio, se detectan las fases cristalinas de la Sílice, Analcima y Chesnokovita.

Sin embargo, el análisis de los polvos demuestra que, cuando se adiciona la solución de aluminio a la reacción (5g/Lt de Al), es posible lograr la síntesis de una zeolita tipo Gismondina.

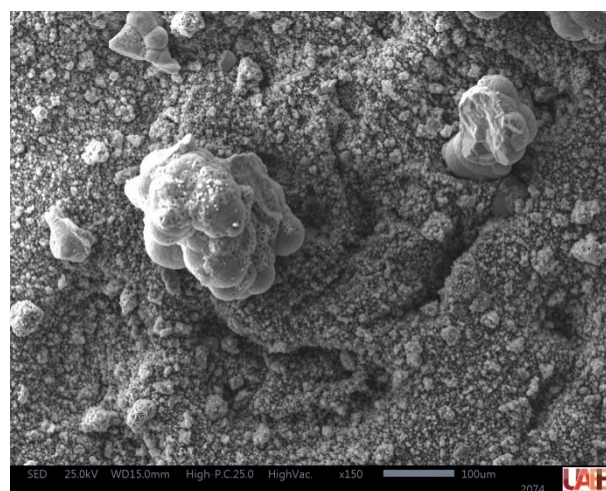


**Figura 3. Identificación de las fases presentes en los polvos obtenidos con 0g/Lt y 5g/Lt de Al, sintetizados en un reactor hidrotérmico a 145°C, durante 24h.**

### 3.3 Microscopía electrónica de Barrido

En la Figura 4 se muestra el estudio de una imagen obtenida de un microscopio electrónico de barrido de los polvos. Se observa una partícula de gran tamaño cuya morfología está constituida de semiesferas unidas, con un tamaño de aproximadamente 247  $\mu$ m.

En la parte superior del lado derecho de la imagen se observa un conjunto de esferas fracturadas con un tamaño aproximado de 176  $\mu$ m. En el fondo de la imagen se observan partículas con un tamaño promedio de 35  $\mu$ m y otras más pequeñas cuyos tamaños son de entre 1 y 4  $\mu$ m, de las cuales no se logra apreciar su morfología.

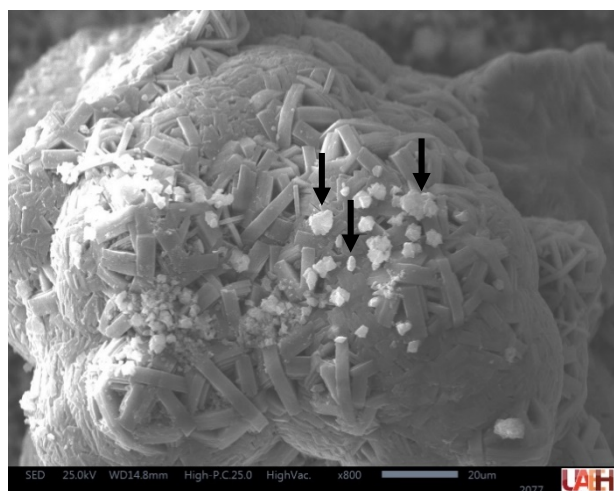


**Figura 4. Imagen de MEB de los polvos obtenidos después del tratamiento hidrotérmico (x150).**

Huo et al. Han reportado una morfología semejante a la obtenida en este trabajo, describiendo formas esféricas como bolas de estambre, con tamaños de entre 1.5 y 4  $\mu\text{m}$  (Huo et al., 2012). Los autores emplearon como precursores aluminato de sodio, hidróxido de aluminio e hidróxido de sodio, los cuales fueron sometidos a un reactor hidrotermal a una temperatura de 100°C durante 48 h.

La Figura 5, muestra a detalle el estudio de la Figura 4, donde se observan cristales que forman las partículas esféricas, estos cristales, poseen morfología de prisma rectangular. Las longitudes de los cristales miden alrededor de 20  $\mu\text{m}$ , el ancho es de aproximadamente 2  $\mu\text{m}$  y la altura es muy variable y difícil de estimar debido a que los cristales están incrustados en la esfera. La forma de las partículas esferoidales podría atribuirse al movimiento que se produce durante la convección de la suspensión dentro del reactor al realizarse la síntesis.

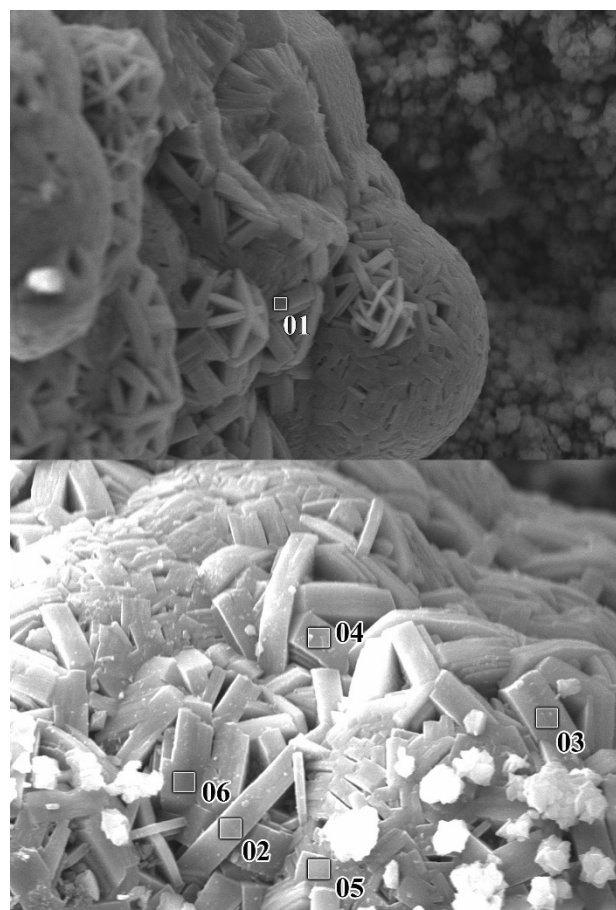
Cabe mencionar que encima de las partículas esferoidales se detectan aglomerados de menor tamaño que oscilan entre 2 y 8  $\mu\text{m}$  (señaladas con flechas de color negro). Es probable que se trate de otro tipo de zeolita, no detectada en el estudio cristalográfico.



**Figura 5.** Imagen de MEB de los polvos obtenidos después del tratamiento hidrotermal (x800).

### 3.3.1 Análisis semicuantitativo determinado por EDS

En la Tabla 1 se presenta la composición elemental de los puntos seleccionados en la Figura 6. En base a estos resultados, la composición química promedio de los polvos obtenidos, basada en la celda unitaria de 32 oxígenos de la zeolita GIS, es  $\text{Na}_{10.75}[\text{Al}_{7.88}\text{Si}_{8.12}\text{O}_{32}]$  con una relación  $\text{Si}:\text{Al}=1.03$ .



**Figura 6.** Análisis semicuantitativos determinados por espectroscopia de energía dispersiva (EDS) realizados en 6 zonas sobre los cristales de morfología prismática.

### 3.4 Estabilidad térmica

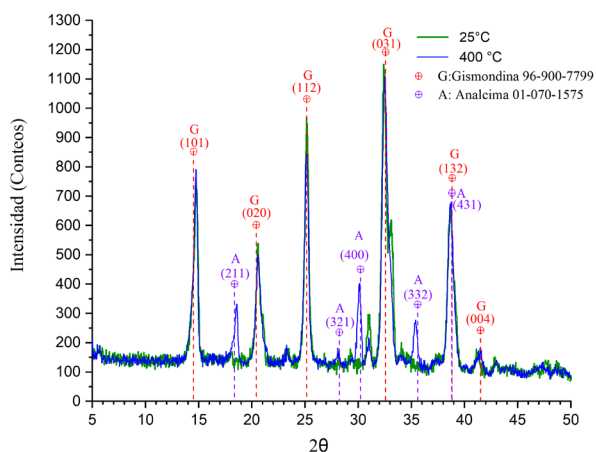
En la Figura 7, se presenta la comparación de los polvos sin calcinar (25°C) y calcinados a 400°C. Se observa que la fase Gismondina es afectada en su estructura debido a su baja estabilidad térmica.

Los difractogramas presentan una disminución de intensidad después de calcinar a 400°C, estas disminuciones se observan, en los planos (020), (112) y (031). El decremento de la intensidad de los picos de difracción, ha sido reportado como el colapso de la estructura de las zeolitas (Ostrooumov et al., 2012), (Mumpton, 1960), (Díaz Guzmán, 2020).

Tabla 1. Microanálisis puntual semicuantitativo de los polvos obtenidos después del tratamiento hidrotermal. Los valores representan el número de átomos por celda unitaria.

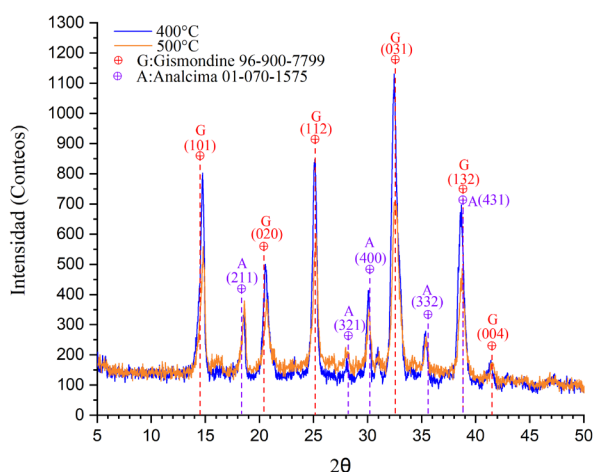
	1	2	3	4	5	6	Promedio
Elementos	No átomos	No átomos	No átomos	No átomos	No átomos	No átomos	No átomos
O	32	32	32	32	32	32	32
Si	8.00	8.58	7.86	7.98	8.34	7.94	8.12
Al	8.00	7.42	8.14	8.02	7.66	8.06	7.88
Na	9.97	10.92	10.13	11.45	11.47	10.55	10.75
Si:Al	1.00	1.16	0.97	0.99	1.09	0.99	1.03

Se observa que los valores de  $2\theta$  de  $18.3^\circ$ ,  $28.2^\circ$ ,  $30.1^\circ$  y  $35.7^\circ$ , con los planos correspondientes a (211), (321), (400) y (332), pertenecen a la fase Analcima. La formación de esta nueva fase es acorde con la regla de Ostwald (Maldonado et al., 2013), lo anterior sugiere que la calcinación de los polvos a  $400^\circ\text{C}$  favoreció el reordenamiento del material amorfo, convirtiéndose en la fase Analcima.



**Figura 7. Diffractogramas de los polvos a  $25^\circ\text{C}$  y calcinados a  $400^\circ\text{C}$ . Se señalan los principales planos de la fase Gismondina, así como, la aparición de la fase Analcima.**

En la Figura 8 se presenta la comparación de los polvos calcinados a  $400^\circ\text{C}$  y a  $500^\circ\text{C}$ . Se observa un decremento aproximado de 26% a 38% de los planos (101), (020), (112), (031) (132). También se muestra un incremento de los picos de difracción de la fase Analcima al aumentar la temperatura de calcinación.

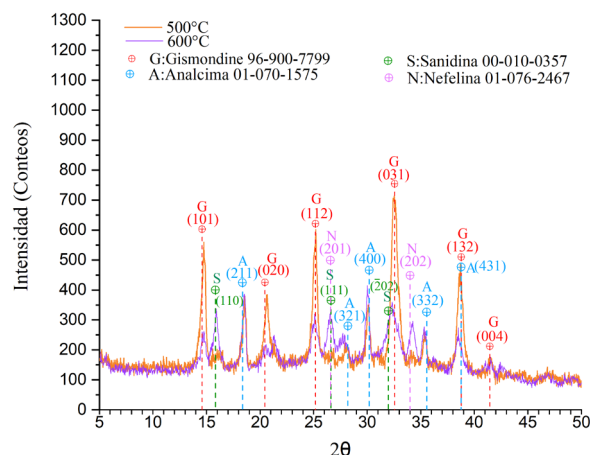


**Figura 8. Diffractogramas de los polvos calcinados a  $400^\circ\text{C}$  y  $500^\circ\text{C}$ .**

La comparación de los polvos calcinados a  $500^\circ\text{C}$  y a  $600^\circ\text{C}$  es mostrado en la Figura 9, presentando un decremento que oscila entre el 59.12% y 70%. También se observa la formación de dos nuevas fases Sanidina y Nefelina.

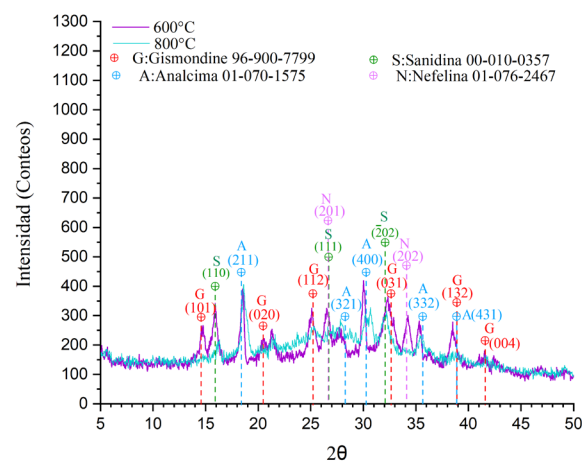
La Carnegieita y la Nefelina son fases que suelen formarse al calcinar diversas zeolitas a temperaturas superiores a los  $850^\circ\text{C}$  (Rodriguez et al., 2016), (Lutz et al., 1985). Estas nuevas fases

indican la pérdida de moléculas de agua enlazadas químicamente para dar paso a la formación de los minerales mencionados que ya no pertenecen al grupo de las zeolitas.



**Figura 9. Diffractogramas de los polvos calcinados a  $500^\circ\text{C}$  y  $600^\circ\text{C}$ .**

En la Figura 10 se presenta la comparación de los polvos calcinados a  $600^\circ\text{C}$  y a  $800^\circ\text{C}$ . La mayor parte de los planos de la fase Gismondina han desaparecido, indicando que esta fase se ha transformado en material amorfo y en una mezcla de fases cristalinas de Gismondina, Analcima, Sanidina y Nefelina.



**Figura 10. Diffractogramas de los polvos calcinados a  $600^\circ\text{C}$  y  $800^\circ\text{C}$ .**

#### 4. Conclusiones

En este trabajo de investigación se logró sintetizar una zeolita del tipo Gismondina a partir de arenas de caolín y desechos urbanos de aluminio, sin el empleo del ataque químico ni calcinación previa del caolín. Los polvos fueron estudiados por medio de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Se pone en evidencia que la adición de aluminio en la reacción es imprescindible para la formación de la zeolita tipo Gismondina. Los polvos de la fase Gismondina sintetizada, fueron calcinados a diferentes temperaturas para evaluar la estabilidad térmica; se encontró que a  $400^\circ\text{C}$  inicia la creación de Analcima como nueva

fase; no obstante, al incrementar la temperatura, aparecen las fases de Sanidina y Nefelina. Finalmente, a una temperatura de calcinación de 800°C, se detectó material amorfo con cristales pertenecientes a las fases de Gismondina, sanidina y nefelina; lo cual sugiere que, a una temperatura mayor de 800°C, la fase Gismondina desaparece por completo.

## 5. Referencias

- Albert, B. ., Cheetham, A. K., Stuart, J. A., & Adams, C. J. (1998). Investigations on P zeolites: synthesis, characterisation, and structure of highly crystalline low-silica NaP. *Microporous and Mesoporous Materials*, 1–10.
- Barrer, R. M., & Munday, B. M. (1971). Cation exchange reactions of zeolite na-P. *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*, 2909. <https://doi.org/10.1039/j19710002909>
- Betzabé-Piña, A. (2011). *Explotaciones mineras de Bauxita*.
- Cardoso, A. M., Paprocki, A., Ferret, L. S., Azevedo, C. M. N., & Pires, M. (2015). Synthesis of zeolite Na-P1 under mild conditions using Brazilian coal fly ash and its application in wastewater treatment. *Microporous and Mesoporous Materials*, 139, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.016>
- Diáz Guzmán, D. (2020). *Zeolitas naturales: Composición mineralógica, análisis microestructural, composición química, estudios de adsorción y térmicos*.
- Espejel-Ayala, F., Solís-López, M., Schouwenaars, R., & Ramírez-Zamora, R. M. (2015). Síntesis de Zeolita P utilizando jales de cobre. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14. <http://www.rmiq.org/ojs311/index.php/rmiq/article/view/1232>
- Gao, S. S., Wang, X. L., Pei, Y. C., Meng, X. J., & Chen, N. C. (2018). P-type molecular sieve antibacterial agent and hydrothermal control. *Solid State Phenomena*, 281 SSP, 887–892. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.281.887>
- Hansen, S., Håkansson, U., & Fålh, L. (1989). Structure of synthetic zeolite Na-P2. *Acta Crystallographica. Section C, Crystal Structure Communications*, 46(6), 1361–1362. <https://doi.org/10.1107/s010827018901262x>
- Huo, Z., Xu, X., Lü, Z., Song, J., He, M., Li, Z., Wang, Q., & Yan, L. (2012). Synthesis of zeolite NaP with controllable morphologies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 158, 137–140. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.03.026>
- Jha, B., & Singh, D. N. (2016). Fly Ash Zeolites: Innovations, Applications, and Directions. In *Advanced Structured Materials* (pp. 5–31). Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1404-8>
- Król, M. (2020). Natural vs. Synthetic zeolites. *Crystals*, 10(7), 1–8. <https://doi.org/10.3390/cryst10070622>
- Lutz, W., Engelhardt, G., Fichtner-Schmittler, H., Peuker, C., Löffler, E., & Siegel, H. (1985). The influence of water steam on the direct phase transformation of zeolite NaA to nepheline by thermal treatment. *Crystal Research and Technology*, 20(9). <https://doi.org/10.1002/crat.2170200917>
- Ma, W., Brown, P. W., & Komarneni, S. (1998). Characterization and cation exchange properties of zeolite synthesized from fly ashes. *Journal of Materials Research*, 13(1), 3–7. <https://doi.org/10.1557/JMR.1998.0001>
- Maldonado, M., Oleksiak, M. D., Chinta, S., & Rimer, J. D. (2013). Controlling crystal polymorphism in organic-free synthesis of Na-zeolites. *Journal of the American Chemical Society*, 135(7), 2641–2652. <https://doi.org/10.1021/ja3105939>
- Meyer, F. (2004). *Disponibilidad de reservas de bauxita*. *Natural Resources. Research*, 13 (3), 161-172.
- Mumpton, F. A. (1960). Clinoptilolite redefined. *American Mineralogist*, 45(3–4), 351–369.
- Novembre, D., Gimeno, D., & Del Vecchio, A. (2021). Synthesis and characterization of Na-P1 (GIS) zeolite using a kaolinitic rock. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84383-7>
- Ostrooumov, M., Cappelletti, P., & Gennaro, R. De. (2012). Applied Clay Science Mineralogical study of zeolite from New Mexican deposits (Cuitzeo area , Michoacan , Mexico ). *Applied Clay Science*, 55, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.09.011>
- Pal, P., Das, J. K., Das, N., Bandyopadhyay, S., & Pal, P. (2013). Synthesis of NaP zeolite at room temperature and short crystallization time by sonochemical method. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.012>
- Park, M., Choi, C. L., Lim, W. T., Kim, M. C., Choi, J., & Heo, N. H. (2000a). Molten-salt method for the synthesis of zeolitic materials I. Zeolite formation in alkaline molten-salt system. *Microporous and Mesoporous Materials*, 37(1–2), 81–89. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(99\)00196-1](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(99)00196-1)
- Park, M., Choi, C. L., Lim, W. T., Kim, M. C., Choi, J., & Heo, N. H. (2000b). Molten-salt method for the synthesis of zeolitic materials II. Characterization of zeolitic materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, 37(1–2), 91–98. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(99\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(99)00195-X)
- Rodrigues, M., Souza, A., & Santos, I. (2016). Brazilian Kaolin Wastes: Synthesis of Zeolite P at Low-Temperature. *American Chemical Science Journal*, 12(4), 1–11. <https://doi.org/10.9734/acscj/2016/22771>
- Wang, P., Sun, Q., Zhang, Y., & Cao, J. (2019). Alkali-dissolving hydrothermal synthesis of zeolite P from fly ash. *Micro and Nano Letters*, 14(5), 572–576. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5650>
- World-Aluminium. (2018). *Sustainable Bauxite Mining Guidelines*. [www.world-aluminium.org](http://www.world-aluminium.org)
- Yoldi, M., Fuentes-Ordoñez, E. G., Korili, S. A., & Gil, A. (2019). Zeolite synthesis from industrial wastes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 287(March), 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.06.009>
- Zhang, Y., Kang, W., Han, H., Wang, H., Chen, Y., Gong, X., Zhai, C., & Song, H. (2019). In-situ synthesis of NaP zeolite doped with transition metals using fly ash. *Journal of the American Ceramic Society*, 102(12), 7665–7677. <https://doi.org/10.1111/jace.16623>