ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.838

Synthesis of zeolite from clays for the removal of arsenic from groundwater

Rossibel Churata, Dr[1], Esther Cañari-Ochoa, Ing.[1], Solimar Tapia-Paye, Ing[1], María Fernanda Palomino-Cervantes, Br[1], Yosheff Ortiz-Valdivia, Dr[1], Jonathan Almirón, Dr[2] and Danny Tupayachy-Quispe, Dr[2]

[1]*Universidad Nacional de San Agustín, Perú, rchurataa@unsa.edu.pe, ecanari@unsa.edu.pe, stapiapa@unsa.edu.pe, mpalomno@unsa.edu.pe, yortizv@unsa.edu.pe*
[2] *Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, jalmiron@ucsm.edu.pe, dtupayachy@ucsm.edu.pe*

Abstract– ***This study focuses on the synthesis of zeolites from Pucará clay for the removal of arsenic from groundwater in Chuñuhuayo, Moquegua, Peru. The raw material was initially characterized chemically and physically, determining its silicon dioxide (SiO_2) and aluminum oxide (Al_2O_3) content to predict the type of zeolite that could be obtained. The synthesis was performed via a hydrothermal process, varying temperature, activation time, and NaOH concentration as key factors. The zeolites were evaluated for their cation exchange capacity, with the highest value of 180 meq/100g achieved at 100°C, using 3M NaOH for 8 hours. Morphological and crystalline characterization confirmed the formation of analcime- and phillipsite-type zeolites. Subsequently, these zeolites were applied to groundwater containing 38.4 µg/L of arsenic, significantly exceeding the 10 µg/L limit established by the WHO. Adsorption tests in batch systems demonstrated an arsenic removal efficiency of 96.9% within 50 minutes of contact under magnetic stirring conditions. These findings underscore the potential of zeolites synthesized from local clays as low-cost, efficient materials for arsenic remediation in contaminated groundwater***

Keywords-- Zeolite, arsenic removal, Cation Exchange Capacity, groundwater treatment

Síntesis de zeolita a partir de arcillas para la remoción de arsénico de aguas subterráneas

Rossibel Churata, Dr[1], Esther Cañari-Ochoa, Ing.[1], Solimar Tapia-Paye, Ing[1], María Fernanda Palomino-Cervantes, Br[1], Yosheff Ortiz-Valdivia, Dr[1], Jonathan Almirón, Dr[2] y Danny Tupayachy-Quispe, Dr[2]

[1]*Universidad Nacional de San Agustín, Perú, rchurataa@unsa.edu.pe*, *ecanari@unsa.edu.pe*, *stapiapa@unsa.edu.pe*, *mpalomno@unsa.edu.pe*, *yortizv@unsa.edu.pe*
[2] *Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, jalmiron@ucsm.edu.pe, dtupayachy@ucsm.edu.pe*

Resumen*– Este estudio se centra en la síntesis de zeolitas a partir de arcilla de Pucará para la remoción de arsénico en aguas subterráneas de Chuñuhuayo, Moquegua, Perú. Inicialmente, se caracterizó la materia prima tanto química como físicamente, y se determinó los contenidos de dióxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3) para predecir el tipo de zeolita a obtener. La síntesis se realizó mediante un proceso hidrotermal, variando parámetros clave como temperatura, tiempo de activación y concentración de NaOH. Las zeolitas fueron evaluadas en términos de su capacidad de intercambio catiónico, alcanzando el valor más alto de 180 meq/100g a 100 °C, con NaOH al 3M durante 8 horas. La caracterización morfológica y cristalina confirmó la formación de zeolitas tipo analcima y phillipsita. Posteriormente, estas zeolitas se aplicaron al tratamiento de aguas subterráneas con una concentración inicial de 38.4 µg/L de arsénico, superando el límite de 10 µg/L establecido por la OMS. Las pruebas de adsorción en sistemas batch demostraron una eficiencia de remoción del 96.9% en 50 minutos de contacto bajo agitación magnética. Estos resultados destacan el potencial de las zeolitas sintetizadas a partir de arcillas locales como materiales de bajo costo y alta eficiencia para la remediación de arsénico en aguas subterráneas contaminadas.

Palabras clave—zeolita, remoción de arsénico, capacidad de intercambio catiónico, tratamiento de aguas subterráneas

I. Introducción

Una de las problemáticas cruciales que enfrentamos en la actualidad a nivel mundial y, sobre todo, en nuestro país es la contaminación por metales pesados en agua, suelo, aire u otras matrices, esto resulta potencialmente peligroso debido al elevado grado de toxicidad de estos elementos químicos [1], pudiendo generar consecuencias negativas en la salud del ser humano, perjuicios permanentes en la vegetación y vida silvestre, así como en el medio ambiente, traduciéndose en graves impactos socioeconómicos. Dentro de las principales fuentes de contaminación antrópicas de estos elementos en el Perú, están los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), así como unidades mineras activas y zonas de actividad minera ilegal e informal [2]. Asimismo, el uso de fertilizantes y pesticidas que contienen metales pesados [3], el vertimiento de aguas industriales y domésticas sin tratamiento adecuado [4], entre otros. También es frecuente encontrar fuentes de contaminación natural por metales pesados en nuestro país, lo cual se encuentra asociado a los terrenos volcánicos de la Cordillera Occidental de los Andes, donde específicamente el arsénico se presenta en distintas especies de minerales [5]. Dentro de los metales pesados más comúnmente asociados a la contaminación en nuestro país, los cuales son: As, Cd, Pb y Hg. Cabe señalar que el presente estudio se enfoca en el arsénico, debido a que es frecuente la presencia de arsénico en aguas subterráneas de abastecimiento para consumo humano en el Perú de acuerdo a investigaciones recientes [5].

Por lo expuesto y dada la gran importancia de reducir los índices de arsénico disuelto en agua de consumo humano, es importante implementar soluciones que permitan remover este metal pesado del agua. En la actualidad, se presentan tecnologías convencionales como: Coagulación filtración y Oxidación filtración, pero sobre todo, resaltan las alternativas innovadoras, como la adsorción con medios específicos como óxidos de Fe o en MnO_2, tecnologías solares y la implementación de zeolitas [6], este último representa una alternativa óptima, ya que, por un lado estos componentes naturalmente se forman por reacciones del material volcánico en ambientes geológicos específicos y condiciones químicas particulares, siendo así, se originan de materiales precursores como ceniza volcánica, arcilla, feldespatos, entre otros; luego, con fines de investigación para abordar los requerimientos de la industria son sintetizadas zeolitas sintéticas, las cuales poseen una elevada homogeneidad y pureza, funcionando muy bien como tamices moleculares o sorbentes [7]; por otro lado, las zeolitas poseen una serie de propiedades que favorecen el mecanismo de remoción, tales como la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) que permite que las zeolitas sustituyan los cationes presentes en su red estructural por iones contaminantes disueltos en el agua. Esta característica deriva de la presencia de átomos de aluminio y silicio que generan sitios activos en la estructura cristalina. Además, la extensa superficie interna de las zeolitas, producto de su red de microporos menores a 2 nm, facilita un contacto más efectivo entre los iones del agua y la matriz mineral. Finalmente, su elevado potencial de adsorción, intensificado en espacios de

poro reducidos, favorece el confinamiento y la captura de moléculas o iones específicos. Estas propiedades combinadas, junto con la alta estabilidad térmica y química de las zeolitas, hacen de estos materiales sistemas ideales para la remoción de metales y metaloides en procesos de tratamiento de aguas subterráneas.

Ahora bien, respecto a los métodos de síntesis de zeolitas [8] encontramos: Sol-gel, Fusión alcalina, Síntesis asistida por microondas, Síntesis con aditivos y, sobre todo, el proceso hidrotérmico, el cual se lleva a cabo a partir de soluciones en estado acuoso como: sosa (NaOH), $NaAl(OH)_4$ y Na_2SiO_3 [9], resultando en la obtención de un polímero líquido viscoso denominado "gel" del cual luego se forman grandes cristales de zeolita.

Tal como se ha ilustrado, en los últimos años se ha profundizado el estudio y aplicación de zeolitas, pero en muchos de los casos estas resultan ser de un alto costo, es por esto que recientemente ha incrementado el desarrollo de estudios donde se plantea el uso de zeolitas de tipo natural. La referencia [10] ilustra el uso de zeolitas naturales de origen volcánico, específicamente de tipo clinoptilolita, para procesos de pirólisis catalítica, del mismo modo otros autores [11] investigaron las propiedades retardantes de llama de cenizas volcánicas que son una fuente natural de zeolitas; siendo así, en la investigación actual se busca seguir esta misma línea.

A raíz de lo mencionado, en el presente estudio se plantea como objetivo sintetizar zeolitas a partir de arcilla del distrito de Pucará, provincia de Lampa, Puno, Perú, las cuales posteriormente fueron caracterizadas a través de las técnicas de Espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS), Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), Difracción de rayos X (DRX) y determinación de CIC. Asimismo, para evaluar la capacidad de remoción de arsénico del producto zeolítico obtenido, se utilizó en la remoción de este metal pesado contenido en aguas subterráneas, las cuales fueron obtenidas del pozo de suministro al centro poblado de Chuñuhuayo, distrito de Puquina, provincia General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua, analizando la concentración de As (V) en mg/L tanto inicial como final.

II. Materiales y Métodos

A. Materiales

Las zeolitas fueron sintetizadas a partir de muestras de arcilla de gran pureza obtenidas en una cantera de la zona de Pucará cerca de la ciudad de Juliaca, Puno, cuyas coordenadas de ubicación son 15°2'34″ S, 70°22'5″ W, como se aprecia en la Fig 1.

Fig. 1 Ubicación satelital del punto de muestreo de arcilla en la zona de Pucará, Puno.

Este material precursor fue inicialmente acondicionado removiendo las impurezas, donde se procedió a la extracción de piedras, cuerpos extraños y residuos orgánicos. Para el proceso de secado se utilizó el horno estufa de la marca Nabertherm GmbH TR 120 SN 390445, el procedimiento fue desarrollado a 105°C por 24 horas. El secado facilitó el proceso de molienda, para lo cual se utilizó el equipo Molino planetario de bolas PM 100 de la marca Retsch, este proceso se llevó a cabo a 500 revoluciones por minuto, durante 30 minutos con el objetivo de reducir la granulometría de la arcilla secada, lo cual es fundamental para la síntesis de zeolitas. Finalmente, se efectuó un tamizado utilizando una malla #100 ASTM (150 µm), con el propósito de garantizar una granulometría homogénea.

B. Caracterización

Se caracterizó la arcilla, en primer lugar, de manera física, determinando la densidad real, porosidad y granulometría. Luego se caracterizó de manera química, para identificar la composición química del material precursor, lo cual resulta fundamental para determinar los parámetros de activación requeridos, morfología de la arcilla y el producto zeolitico. Siendo así, se aplicaron distintas técnicas.

EDS. Técnica de análisis químico elemental de materiales, el cual a medida que la sonda de electrones emitida escanea la muestra, emite y mide rayos X característicos, los cuales constituyen espectros EDS que son traducidos en información sobre la composición del material evaluado, incluso hasta el nivel atómico. Específicamente se utilizó el equipo Microscopio Electrónico de Barrido *Thermo Scientific Scios 2* con la adición de un detector EDS.

MEB. La composición morfológica de la materia prima pudo conocerse a través de este método, el cual hace uso de electrones para crear una imagen. En este caso, también se hizo uso del equipo anteriormente mencionado *Thermo Scientific Scios 2,* cuyo sistema FIB-SEM analítico de increíble resolución brinda un rendimiento de caracterización 3D para varios tipos de muestras.

DRX. La realización de análisis cualitativos y cuantitativos de materiales policristalinos son proporcionados a través de esta técnica de difracción de rayos X.

Cualitativamente se usa para identificar sustancias desconocidas y cuantitativamente se caracterizan mezclas sólidas para establecer la abundancia relativa de compuestos cristalinos. En este caso, se utilizó el Difractómetro de rayos X de la marca Rigaku-Miniflex.

CIC. Técnica que permitió la identificación de la capacidad de intercambio catiónico del material evaluado, con el fin de establecer principalmente su habilidad para retener cationes. Específicamente se aplicó el Método 9081 desarrollado por Chapman en 1965 para lo cual se utilizó el equipo Centrífuga Hermle Z 306, así como el Espectrómetro de Absorción Atómica del Laboratorio Analítico de Sur y una Balanza de precisión

C. *Síntesis de zeolitas*

Se llevó a cabo la síntesis de zeolitas a través de un procedimiento de conversión hidrotermal haciendo uso del equipo Horno-Mufla modelo HM-030-008 2017. Esto se llevó a cabo mediante una solución activante con hidróxido de sodio (NaOH), debido a que, investigaciones recientes [12] recomiendan su uso en este tipo de procesos, puesto que, brinda el medio alcalino ideal. Entonces, se realizó 11 ensayos donde se utilizó 10 g de arcilla y 125 ml de solución de NaOH, manteniendo una relación solución activante/sólido igual a 12,5. Las condiciones a tomarse en cuenta con respecto a la temperatura de activación fue de 100, 125 y 150°C, mientras que la concentración de la solución activante se trabajaron molaridades de 1, 2 y 3M, y el tiempo de activación fue de 6, 7 y 8 h.

Cabe mencionar que las condiciones aplicadas, se llevaron a cabo con el propósito de generar un entorno de auto presión y lograr que el procedimiento de síntesis se lleve a cabo de manera satisfactoria.

A continuación, la zeolita obtenida fue filtrada con 400 ml de agua y posteriormente se secó en horno estufa a 85°C por 8 horas. Una vez obtenida la zeolita, se procedió con la caracterización física y química.

D. *Obtención de la muestra de agua*

La muestra de agua subterránea fue extraída del Anexo 8 de Chuñumayo, situado en el distrito de Puquina, tal como se ilustra en la Fig. 2. Las coordenadas geográficas correspondientes son: 16°34'981" S y 71°10'643" W.

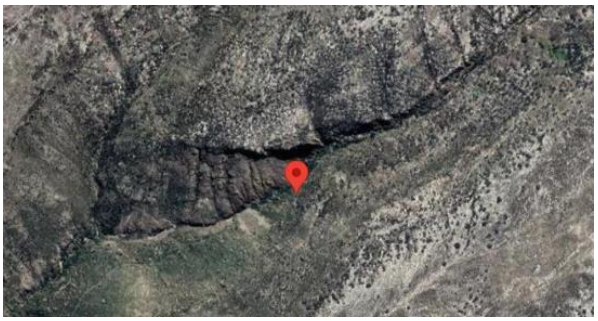


Fig. 2: Ubicación satelital del pozo de toma de muestra de agua potable Huarani del Anexo 8 de Chuñuhuayo, distrito de Puquina

El muestreo se realizó siguiendo el protocolo establecido en la referencia [13]. Una vez obtenida la muestra, se analizó para determinar los niveles de arsénico por volumen de agua (mg/L).

E. *Remoción de Arsénico*

La remoción de arsénico se llevó a cabo utilizando las zeolitas sintetizadas. Se llevaron a cabo pruebas de adsorción de cationes de As (V) empleando el material zeolítico con la mayor CIC. Para ello, se usaron recipientes de 500 ml que contenían 250 ml de agua subterránea mezclados con 1 g de zeolita, bajo tiempos de contacto de 30, 50, 70 y 90 minutos, con agitación magnética constante a 200 revoluciones por minuto [14]. Cabe mencionar que las diferentes pruebas se realizaron sin alterar la temperatura de la muestra, es decir, a 15,8 °C. Posteriormente, la solución filtrada fue analizada para detectar los niveles de arsénico finales.

III. RESULTADOS

A. *Caracterización de la materia prima*

La arcilla de Pucará fue caracterizada mediante técnicas físico-químicas para determinar su idoneidad en la síntesis de zeolitas, esto resultó un pilar importante para identificar la reactividad de la arcilla y la eficiencia del proceso de conversión hidrotermal.

El análisis físico de la arcilla consistió en evaluar parámetros fundamentales, tales como la densidad real cuyo valor fue 2,53g/cm^3, luego la densidad aparente con un valor de 0,95g/cm^3 y por último la porosidad que dio como resultado 0,62 o 62% de volumen de arcilla no ocupado por sólidos.

Luego se llevó a cabo el análisis químico de la arcilla sin tratamiento, a través del cual se pudo determinar su composición mineralógica. En primer lugar, se empleó el detector EDX del MEB cuyos resultados se muestran en la Fig. 3.

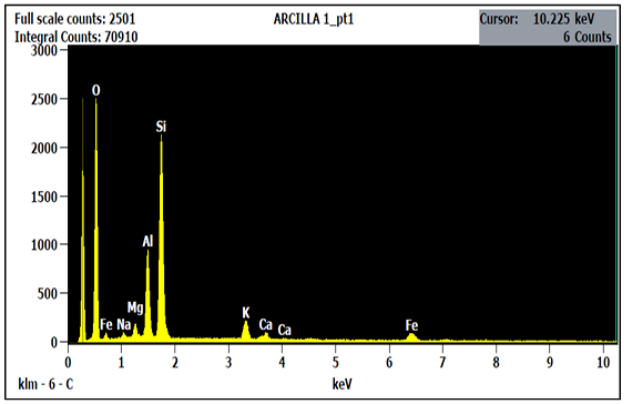


Fig. 3: Espectro EDS de la arcilla.

Seguidamente, del análisis realizado en la Figura 3 se sintetiza la Tabla I, donde se observa un contenido de dióxido

de silicio (SiO_2) del 62.20 % y de alúmina (Al_2O_3) del 19.89 %.

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ARCILLA

Composición química	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3
%	1,28	2,89	19,89	62,20	4,91	1,60	7,23

Los valores de la Tabla I evidencian un alto contenido de sílice y alúmina, específicamente en proporción 3:1, lo cual es un indicador del potencial de activación de la arcilla para la obtención de zeolitas [15].

Seguidamente, se analizó la morfología de la arcilla a través del MEB. La información que se obtuvo evidenció partículas de tamaño heterogéneo, con superficies rugosas e irregularidades propias de minerales naturales. Esto es posible visualizarlo gracias al uso del detector de electrones secundarios, y al recubrimiento de la muestra con una capa de oro a fin de proveerle conducción. Siendo así, la morfología característica de la arcilla se aprecia en las imágenes micrográficas de la Fig. 4.

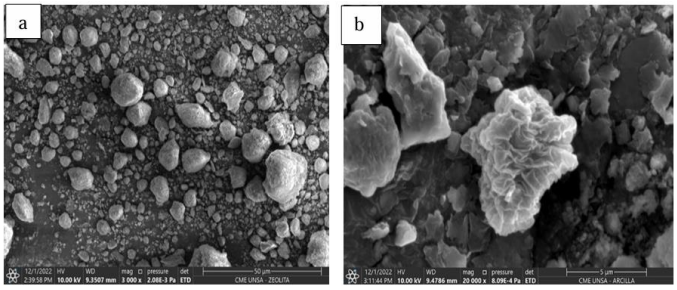


Fig. 4: Microscopía Electrónica de Barrido de la arcilla: Primera imagen (a): magnificación de 3000x y segunda imagen (b), magnificación de 20 000x.

A través de la Fig. 4 se hace evidente la morfología granular de increíble variedad en el tamaño de partícula, por un lado, en la primera imagen, se presenta una morfología cristalina de granos pseudoesféricos, al mismo tiempo en la segunda imagen se aprecia la presencia de texturas escamosas muy comunes en filosilicatos, resultando en un caolín de morfología irregular.

Por último, se empleó el método DRX para evaluar el material precursor. Los difractogramas mostraron la presencia de caolinita, identificada por un conjunto de picos de difracción de menor intensidad en los ángulos 2θ de 12.4°, 20.1° y 55.1°. Así mismo, el cuarzo apareció como la fase cristalina predominante en la arcilla, con picos localizados en los ángulos 2θ de 20.8°, 26.6°, 39.45°, 42.3°, 50.13°, 59.9° y 68.3°, lo que coincide con los resultados reportados en estudios previos [16].

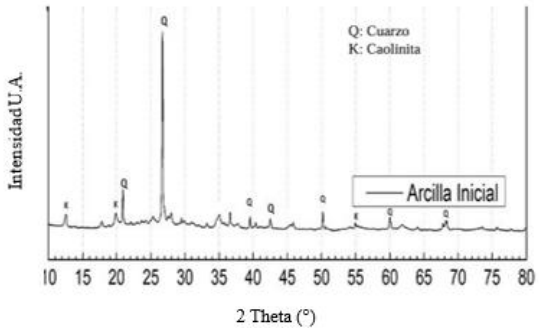


Fig. 5: Análisis DRX del material precursor

La Fig. 5 ilustra cómo estas fases cristalinas proporcionan el contenido de sílice y alúmina necesario para la formación de estructuras zeolíticas.

B. *Síntesis por conversión hidrotermal*

La síntesis de zeolitas se llevó a cabo mediante el método hidrotermal utilizando soluciones alcalinas de NaOH. Se llevó a cabo 11 ensayos (C1 – C11), adicionando una muestra de zeolita "prueba" (CP), que no formó parte del diseño experimental, las condiciones experimentales de cada uno variaron en términos de concentración de NaOH, temperatura y tiempo de reacción, obteniendo los resultados mostrados en términos de CIC.

TABLA II
RESULTADOS DE LA SÍNTESIS DE ZEOLITAS

Ensayo	Temperatura (°C)	Molaridad NaOH (M)	Tiempo (h)	Sodio (mg/L)	CIC (meq/100g)
C1	100	1	6	1200	130,43
C2	150	1	6	536	58,26
C3	100	3	6	896	97,39
C4	150	3	6	808	87,83
C5	100	1	8	672	73,04
C6	150	1	8	672	73,04
C7	100	3	8	1656	180,00
C8	150	3	8	632	68,10
C9	125	2	7	786	85,43
C10	125	2	7	472	51,30
C11	125	2	7	480	52,17
CP	100	2	8	1856	201,74
Arcilla natural	-	-	-	400	43,48

[a]CP: Zeolita prueba fuera del diseño experimental.

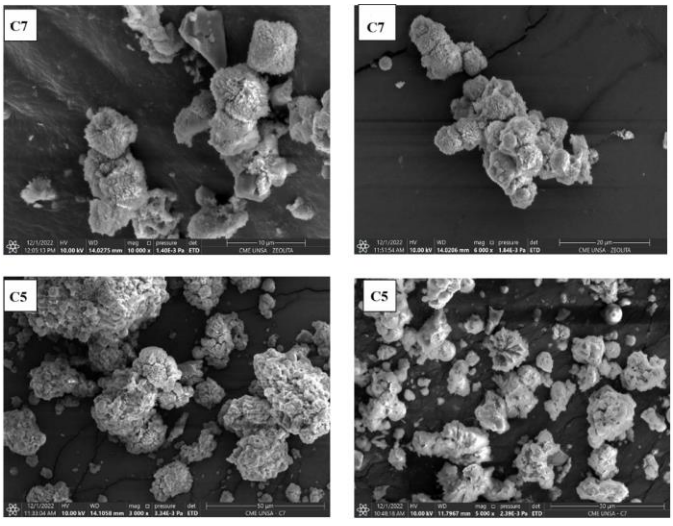
Los datos presentados en la Tabla II se sintetizan en los siguientes parámetros óptimos:

1) *Eficiencia:* La conversión más eficiente se logró en el séptimo ensayo C7, el cual obtuvo una CIC de 180 meq/100 g., bajo una concentración de NaOH 3M a 100 °C durante 8 h.
2) *Temperatura:* Este factor resultó fundamental en el proceso de activación de la CIC, ya que, favorece el proceso de despolimerización de los polialuminosilicatos de la mezcla precristalina y posteriormente, el ensamblaje de las diferentes unidades de construcción,
3) *Aplicación de soluciones de NaOH:* En las condiciones de prueba aplicadas en el séptimo ensayo, es decir, concentraciones iguales a 3M, la solución alcanzó una alcalinidad del potencial de hidrógeno (pH) mayor a 14, lo cual favoreció la cristalización de productos zeolíticos con mayor CIC.
4) *Cristalinidad:* Las zeolitas sintetizadas presentaron una cristalinidad superior al 85 %, con fases predominantes de analcima y phillipsita, según análisis de DRX.
5) *Análisis:* La fase líquida residual se analizó para confirmar la solubilización de sílice y alúmina durante el proceso, demostrando que más del 90 % de estos componentes fueron convertidos a estructuras cristalinas.

C. *Caracterización química de la zeolita*

En primer lugar, gracias a los resultados obtenidos en la Tabla II, se identificó aquellos especímenes, dentro del grupo de zeolitas sintetizadas, que presentaron menor y mayor CIC en un entorno de temperatura constante. Siendo así, se seleccionó la zeolita C7 que obtuvo una CIC de 180 meq/100 g, la zeolita C5 cuya CIC fue de 73.043 meq/100 g y, por último, se incorporó la zeolita prueba (CP), puesto que, presentó una mayor CIC fuera del diseño experimental cuyo valor fue de 201,74 meq/100 g.

Luego, estas muestras fueron sometidas a análisis detallados para confirmar su estructura, composición y propiedades, como se detalla a continuación.



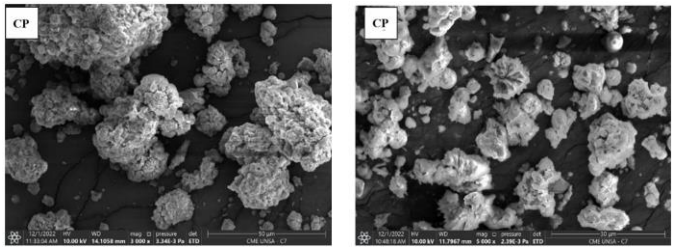


Fig. 6: Microscopía Electrónica de Barrido para las zeolitas sintetizadas: Zeolita C7 tratada a 100°C, 3M, 8h, Zeolita C5 tratada a 100°C, 1M, 8h. y Zeolita prueba (CP) tratada a 100°C, 2M, 8h.

MEB. A través del presente método, se identificó la morfología de las zeolitas en estudio, esto se aprecia en la Fig. 6, que revela a través de micrografías, una morfología de tipo cúbica y prismática, características de las estructuras zeolíticas sintetizadas. La homogeneidad de los cristales fue notable en las muestras analizadas, es decir, C7 y C5.

DRX**.** Los difractogramas de las zeolitas mostraron picos característicos correspondientes a zeolitas del tipo analcima y phillipsita, localizados en los siguientes ángulos: para la analcima (A) en 15.8°, 24.3°, 26.04°, 30.6°, 33.3°, 40.52° y 47.7°; y para la phillipsita (Ph) en 12.36°, 13.78°, 17.98°, 21.5°, 27.9° y 35.4°. Descubrimiento que confirmó una conversión efectiva de las fases originales de la arcilla.

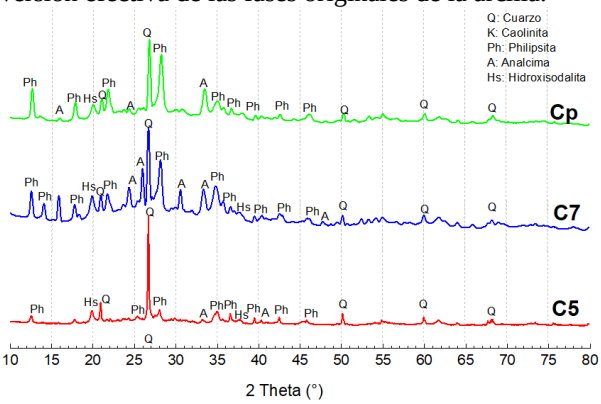


Fig. 7: Análisis DRX de las zeolitas.

CIC. La capacidad de intercambio catiónico alcanzó un máximo de 180 meq/100 g en las condiciones óptimas, es decir, en la muestra C7 como se aprecia en la Tabla II, lo que resalta el gran potencial de las zeolitas para su uso en aplicaciones ambientales.

D. *Remoción de arsénico con zeolitas*

La capacidad de las zeolitas sintetizadas para remover arsénico de aguas subterráneas se evaluó mediante experimentos de tipo Batch siguiendo la secuencia a continuación.

Caracterización del Agua subterránea:

1. *Caracterización física*: Se evaluó el pH y la temperatura (°C) de la muestra de agua subterránea.,

de modo que se obtuvo los valores 7.2 y 15.8 respectivamente.

2. *Caracterización química:* Se analizó la concentración de arsénico en la muestra de agua, se obtuvo un valor de 0,0384 mg/L, el cual superó el valor de referencia de este metal para agua potable de consumo humano [17].

Proceso de remoción de arsénico con zeolitas:

Las condiciones experimentales evaluadas para identificar el entorno óptimo y así obtener el mayor porcentaje de remoción de arsénico, se muestran a continuación.

TABLA III
RESULTADOS DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Tiempo de contacto (minutos)	Concentración de arsénico inicial (mg/L)	Concentración de arsénico final (mg/L)	Cantidad de arsénico removido (mg/L)	Porcentaje de arsénico removido
30	0,0384	0,0053	0,0331	86,2
50	0,0384	0,0012	0,0372	96,9
90	0,0384	0,0012	0,0372	96,9

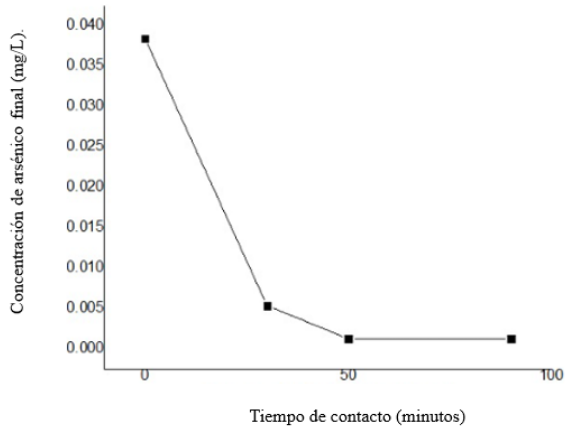


Fig. 8: Concentración de arsénico final (mg/L).

Los resultados demostraron una remoción del 96,9 % de arsénico, porcentaje que, de acuerdo a la cinética del proceso, mostró que la mayor parte de arsénico fue removida en los primeros 30 minutos, seguido de un equilibrio después de 50 minutos, momento en que se alcanza la máxima capacidad de adsorción de la zeolita, como se aprecia en la Tabla III. Pasado este tiempo se alcanza un punto de saturación donde la zeolita no tiene capacidad de adsorber más cationes en su superficie y se mantiene constante, como ilustra la Fig. 8.

Asimismo, este porcentaje de remoción de arsénico alcanzado confirma la alta eficiencia de la zeolita bajo las condiciones evaluadas. Lo que sugiere que los mecanismos de adsorción y confinamiento en microporos fueron predominantes frente a otros posibles procesos de remoción. La eficiencia observada es consistente con el comportamiento esperado de materiales de alta capacidad de intercambio catiónico y superficie interna desarrollada, reforzando el potencial de aplicación de la zeolita en el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con metales pesados.

IV. CONCLUSIONES

- El tratamiento hidrotermal de la arcilla de Pucará, Puno, permitió obtener materiales zeolíticos con propiedades estructurales y texturales diversas, gracias a la variación de condiciones como temperatura, tiempo de contacto y concentración de la solución activante. La arcilla inicial presentó una densidad real de 2.53 g/cm³, densidad aparente de 0.95 g/cm³, un 62.20 % de SiO_2, 19.89 % de Al_2O_3, y una relación molar de 3.13, siendo caracterizada como caolinita con texturas escamosas y cristales pseudoesféricos, confirmada mediante MEB, DRX y picos de cuarzo.
- Se obtuvo zeolitas tipo analcima y phillipsita con estructuras morfológicas típicas, destacando una muestra que alcanzó la mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 180 meq/100 g al ser sintetizada a 100 °C con una solución de NaOH al 3M y un tiempo de reacción de 8 horas. Estas propiedades hacen a las zeolitas altamente funcionales para procesos de intercambio iónico y adsorción.
- El agua subterránea de Chuñuhuayo, con una concentración de arsénico de 38.4 µg/L que excede el límite de 10 µg/L recomendado por la OMS, fue tratada con la zeolita obtenida, logrando una remoción máxima del 96.9 %, demostrando así su efectividad en la adsorción de arsénico y su potencial para la purificación de aguas contaminadas.
- Las propiedades fisicoquímicas de las zeolitas, como su elevada CIC, su estructura altamente microporosa y su notable estabilidad química, permiten inferir un mecanismo de interacción efectivo con especies como el arsénico en medios acuosos. Estas características no solo favorecen procesos de adsorción y retención selectiva, sino que también incrementan la eficiencia de remoción en condiciones ambientales diversas, consolidando a las zeolitas como materiales estratégicos para aplicaciones en tratamiento de aguas subterráneas contaminadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] O. Correa, F. E. Fuentes, y R. G. Coral, "Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray-Perú," *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 87, no. 1, Marzo 2021.

[2] Defensoría del Pueblo, "Informe de Adjuntía N.° 19-2021-DP/AMASPPI: Supervisión a estaciones de monitoreo de calidad del aire en las provincias del Perú," informe, Defensoría del Pueblo, Lima, Perú, Diciembre 2021

[3] J. D. Mahecha-Pulido, J. M. Trujillo-González, y M. A. Torres-Mora, "Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta," *Orinoquía*, vol. 19, no. 1, pp. 118-122, 2015.
[4] P. Saravanan, V. Saravanan, R. Rajeshkannan, G. Arnica, M. Rajasimman, G. Baskar y A. Pugazhendhi, "Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment," *Environmental Research*, vol. 123, no. 4, pp. 567-578, Abril 2024.
[5] R. Apaza y M. E. Calcina, "Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de Carancas y Huata, Puno," *Revista Investigaciones Altoandinas*, vol. 16, no. 1, pp. 51-58, 2014.
[6] L. Gutiérrez-Ruiz, G. Castañón-Sandoval y G. Ávila-Toledo, "*Arsénico en el agua: Problemática en Latinoamérica*," Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), 2014.
[7] M. G. Guerrero-Olvera, F. Legorreta-García, D. Díaz-Guzmán, E. A. Chávez Urbiola, y N. K. Pérez-González, "Síntesis de zeolita L a partir de zeolita natural por el método de fusión alcalina-hidrotermal," *PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, no. Especial 7, 2022.
[8] Z. Dong, "Synthesis and Characterization of Zeolites: Methods and Applications," *Science Progress*, vol. 96, no. 3, pp. 325-340, 2013. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.3184/003685013X13627305831017
[9] J. Briceño, C. Lugo, P. Rodríguez, P. Pérez, J. Rondón, H. Del Castillo y F. Imbert, "Síntesis de Zeolita LTA modificada (iones Ca^{2+} y NH_4^+) empleando el método hidrotérmico para la captura de gases de invernadero (CH_4 y CO_2)," *Academia.edu*, 2019.
[10] A. G. Valencia-Huaman, S. H. Fuentes-Mamani, L. F. Mamani-De La Cruz, F. Velasco, R. Churata, A. Silva-Vela, J. Mamani-Quispe y J. Almirón, "Obtaining Zeolites from Natural Materials of Volcanic Origin for Application in Catalytic Pyrolysis for the Sustainable Chemical Recycling of Polymers," *Sustainability*, vol. 16, no. 14, p. 5910, 2024.
[11] J. Almirón, F. Roudet y S. Duquesne, "Influence of volcanic ash, rice husk ash, and solid residue of catalytic pyrolysis on the flame-retardant properties of polypropylene composites," *Journal of Fire Sciences*, vol. 37, no. 6, pp. 434-451, 2019.
[12] P. K. Huanca, L. T. Corrales, B. Paredes, J. J. Almirón y D. P. Gonzales, "Estudio de la modificación hidrotermal de un mineral ignimbrítico para obtener zeolita sintética de alta capacidad de intercambio catiónico," *Rev. Bol. de Quím.*, vol. 36, no. 4, pp. 173-180, 2019.
[13] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, "Protocolo de Muestreo, Transporte y Conservación de Muestras de Agua con Fines Multiples (consumo humano, abrevado animal y riego)," Argentina, 2011.
[14] I. K. Quispe Díaz, J. W. Ccama Vilca, R. E. Turpo Turpo, J. E. Vigo Rivera, R. A. Lozada Vilca, G. Argota Pérez, y S. P. L. Prada Vega, "Ingeniería de tratamiento para la filtración y remoción del arsénico en las aguas subterráneas mediante zeolitas naturales," *Campus*, vol. XXVII, no. 33, pp. 43–56, ene.-jun. 2022.
[15] W. Tanwongwan, N. Chollacoop, K. Faungnawakij, S. Assabumrungrat, P. Nakhanivej, and A. Eiad-ua, "Combination of natural silica and alumina sources for synthesis of MCM-22 zeolite," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, e18772, 2023. [Online].
[16] M. Villaquirán Caicedo, R. Mejía de Gutiérrez, M. Gordillo Suárez, y N. Constancia Gallego, "Producción de zeolitas de baja sílice a partir de caolín colombiano," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 17, no. 1, pp. 109–118, 2015.
[17] Organización Mundial de la Salud, *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4.ª ed., con adendas, Ginebra, Suiza: OMS, 2017. [En línea].