

Reducción de los niveles de concentración de dureza de las Aguas de pozo en las residencias estudiantiles ubicadas en salida arequipa, Juliaca-Puno 2025; mediante la aplicación de la zeolita natural

Turpo Quilla Uriel ^a, Yallercco Sacsu Ruth Amelia ^b, Yallercco Trelles Karen Rocío ^c

^aUniversidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP Ingeniería Ambiental Lima, Peru.

Resumen

El presente estudio de Reducción de los niveles de concentración de dureza de las aguas de pozo en las residencias estudiantiles ubicadas en salida arequipa, Juliaca-Puno 2025, mediante la aplicación de la zeolita natural; tuvo como objetivo reducir los niveles de dureza en el agua de pozo de las residencias estudiantiles de la zona Salida Arequipa en Juliaca, mediante el uso de zeolita natural activada. Se aplicó el método de activación termoquímica, que consistió en el tratamiento de la zeolita con hidróxido de potasio (KOH) y posterior activación térmica a altas temperaturas, optimizando así su capacidad de intercambio iónico para la remoción de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). Posteriormente, el material activado se aplicó a muestras de agua con diferentes dosis de zeolita (10 g, 30 g, 35 g, 40 g y 45 g), evaluando su eficiencia mediante el método de valoración de dureza con EDTA. Los resultados mostraron una disminución progresiva de la dureza, partiendo de un valor inicial de 840 mg/L a un mínimo de 404 mg/L al aplicar 45 g de zeolita, alcanzando una eficiencia de remoción del 51.90 %. Se concluye que la zeolita activada es una alternativa efectiva, económica y sostenible para el tratamiento de aguas duras, especialmente en comunidades rurales o con recursos limitados, mejorando significativamente la calidad del agua destinada al consumo humano.

Palabras clave: zeolita natural; activación termoquímica; agua de pozo; dureza.

Abstract

The present study on Reduction of Hardness Concentration Levels in Well Water from Student Residences Located in Salida Arequipa, Juliaca-Puno 2025, through the Application of Natural Zeolite aimed to reduce the hardness levels in well water from student residences in the Salida Arequipa area of Juliaca using activated natural zeolite. The thermo-chemical activation method was applied, consisting of treating the zeolite with potassium hydroxide (KOH) followed by thermal activation at high temperatures, thus optimizing its ion exchange capacity for the removal of calcium (Ca^{2+}) and magnesium (Mg^{2+}) ions. The activated material was then applied to water samples with different zeolite doses (10 g, 30 g, 35 g, 40 g, and 45 g), evaluating its efficiency through the EDTA titration method. The results showed a progressive decrease in hardness, starting from an initial value of 840 mg/L to a minimum of 404 mg/L with the application of 45 g of zeolite, achieving a removal efficiency of 51.90%. It is concluded that activated zeolite is an effective, economical, and sustainable alternative for the treatment of hard water, especially in rural or low-resource communities, significantly improving the quality of water intended for human consumption.

Keywords: natural zeolite; thermo-chemical activation; well water; hardness.

1. Introducción

En la ciudad de Juliaca, particularmente en la zona conocida como "Salida Arequipa", existe una problemática recurrente relacionada con la calidad del agua subterránea utilizada para el abastecimiento de residencias estudiantiles y comunidades cercanas. Estas aguas presentan niveles críticos de dureza, principalmente debido a las elevadas concentraciones de iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), superando los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011), que establece como valor máximo 300 mg/L de CaCO_3 . En algunos casos, los niveles de dureza alcanzan hasta 840 mg/L, generando afectaciones no solo en la potabilidad del recurso hídrico, sino también en las instalaciones domésticas, sistemas de distribución, eficiencia de detergentes y vida útil de electrodomésticos. Ante esta situación, diversas investigaciones han evaluado el uso de materiales naturales como las zeolitas para el tratamiento de aguas duras, destacando su capacidad de intercambio iónico como un mecanismo eficiente de remoción de iones multivalentes. Barreto Soto (2021) evaluó la activación térmica de zeolita natural sometida a temperaturas de 300 °C, 350 °C y 400 °C, encontrando que la mayor eficiencia se logró a 400 °C, alcanzando reducciones de hasta un 60 % de Ca^{2+} y 52 % de Mg^{2+} , sin afectar la estructura cristalina de la zeolita, lo que permite su reutilización y la convierte en una alternativa sostenible para zonas rurales. Por su parte, Condori Ccallo y Córdova Mamani (2020) analizaron filtros domésticos empacados con zeolita clinoptilolita activada térmicamente, observando reducciones de dureza de hasta 65 % con granulometrías finas (0.5–1 mm) y tiempos de contacto óptimos de 8 horas, evidenciando su aplicabilidad en sistemas domésticos y rurales.

Desde el punto de vista teórico, la dureza del agua está asociada a la presencia de cationes multivalentes provenientes de la disolución de minerales carbonatados y silicatos (Burgos Ibañez, 2024). Las zeolitas, específicamente la clinoptilolita, presentan una estructura microporosa tridimensional compuesta por tetraedros de sílice y alúmina, con cavidades internas capaces de retener iones metálicos mediante procesos de intercambio iónico (Ozekmekci, 2015). Además, la activación química con hidróxido de potasio (KOH) y el tratamiento térmico optimizan la capacidad de adsorción de la zeolita, incrementando los sitios activos de intercambio, lo que facilita la remoción de los iones responsables de la dureza (Barreto Soto, 2021; Burgos Ibañez, 2024). Es de tal manera que, el presente estudio tiene como objetivo general reducir los niveles de concentración de dureza en las aguas de pozo de las residencias estudiantiles ubicadas en la zona Salida Arequipa – Juliaca, mediante el uso de zeolita natural activada. Los objetivos específicos son: (i) activar la zeolita natural mediante procedimientos térmicos y químicos para optimizar su capacidad de intercambio iónico; y (ii) aplicar la zeolita activada sobre muestras de agua de alta dureza para evaluar su eficiencia en la remoción de iones calcio y magnesio. Este trabajo pretende aportar evidencia científica sobre la efectividad de la zeolita activada como alternativa sostenible y accesible para el tratamiento de aguas duras en contextos rurales y urbanos con limitados recursos tecnológicos.

2. Materiales y Métodos

El método de análisis que se aplicó fue el de activación termoquímica con hidróxido de potasio. Este método con la zeolita consiste en modificar sus propiedades fisicoquímicas para potenciar su capacidad de retener iones indeseados presentes en el agua, como los responsables de la dureza (calcio y magnesio). Este método combina dos etapas: por un lado, un tratamiento químico mediante la impregnación de la zeolita con una solución de hidróxido de potasio (KOH), que intercambia algunos cationes internos del material por iones potasio, aumentando la disponibilidad de sitios activos de intercambio iónico. Por otro lado, un tratamiento térmico que somete la zeolita a altas temperaturas, lo cual ayuda a liberar agua de hidratación

atrapada en su estructura porosa, favoreciendo así el acceso de los iones hacia los canales internos del material.

2.1. Instrumentos

2.1. Materiales para la toma de muestras en campo:

- Cooler
- Envases de vidrio esterilizados
- Guantes
- Barbijo

2.2. materiales y reactivos para la activación de la zeolita:

2.2.1. Reactivos:

- Zeolita natural (clinoptilolita u otro tipo disponible)
- Hidróxido de potasio (KOH) en pellets o solución al 1–2 M
- Agua destilada o desionizada

2.3. Materiales y Equipos:

- Balanza analítica
- Estufa o mufla (capaz de alcanzar 400–600 °C)
- Agitador magnético con calefacción
- Matraces de vidrio (250 ml, 500 ml)
- Crisol de porcelana o bandejas de vidrio/pirex
- Guantes, gafas y bata de laboratorio pH-metro
- Espectrofotómetro o kits para análisis de dureza (opcional, para evaluar resultados)

2.2. Procedimiento

Activación de la zeolita por el método de activación termoquímica:

2.2.1. **Preparación de la zeolita**

- Lavado inicial: Lavar la zeolita natural con abundante agua destilada para eliminar impurezas.

2.2.2. **Impregnación con KOH**

- Disolver 5g KOH en 500ml de agua destilada para obtener una solución de concentración 1 a 2 M.

2.2.3. **Impregnación:**

- Colocar 200g de la zeolita seca en un vaso de precipitado pyrex de 1000 ml y añadir la solución de KOH en una proporción que sobrepase 100 ml por sobre la cantidad de la zeolita (masa/volumen).
- Agitar durante 3 horas promedio a 50–100°C en un agitador con calefacción para acelerar el proceso.
- Desechar el exceso de KOH.

2.2.4. **Lavado post-activación**

- Lavar con agua destilada para eliminar KOH residual si se desea neutralizar la muestra.
- Verificar el pH del lavado hasta que se acerque a neutro (pH \approx 7).

2.2.5. **secado post- lavado:**

- Colocar la zeolita lavada en una bandeja secar la zeolita activada introduciendo la bandeja en una estufa durante 1h a una temperatura de 98°

2.2.6. Análisis de determinación de dureza inicial de las 3 muestras de agua de las residencias de salida Arequipa

- Primero se hizo un análisis de determinación de los niveles de dureza de las muestras de las residencias ubicadas en salida arequipa, en total fueron 3 muestras de agua de pozo.
- Se utilizó el método de valoración para determinar los niveles de dureza
- La tercera muestra de agua de pozo presenta alta concentración de niveles de dureza.

2.2.7. aplicación: Prueba de reducción de dureza del agua

- Preparar muestras de agua con dureza conocida (conteniendo Ca^{2+} y Mg^{2+}). se plantea 5 muestras
- Añadir la zeolita activada a la muestra (proporción por muestra: 10 g/L, 30 g/l, 35g/l, 40 g/L,45 g/L).
- Agitar durante 1 horas manualmente se coloca las muestras en el test de jarras a 30 min/ 90 rpm se deja reposar por 24 h

2.3. Análisis de datos

FÓRMULA DE DUREZA TOTAL

$$\frac{meq}{L}(Ca^{2+} + Mg^{2+}) = \frac{V_T * N_{EDTA} * 1000}{ml\ muestra}$$

Dónde:

V = ml gastados de la solución de EDTA

N = normalidad de la solución de EDTA

M = ml de muestra de agua utilizada Cálculo:

DETERMINACIÓN DE LA DUREZA DE AGUA CRUDA

$$\frac{meq}{L}(Ca^{2+} + Mg^{2+}) = \frac{42ml * 0.01meq/L * 1000ml}{25 ml} = 16.8meq/L$$

Expresada como ppm de $CaCO_3$ o mg/L de $CaCO_3$

Dureza de total: mg/ L de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ = (meq/L de Ca^{2+} y Mg^{2+}) * (50 mg/meq)

$$\frac{meq}{L}(Ca^{2+} + Mg^{2+}) = 16.8 \frac{meq}{L} * 50 \frac{mg}{meq} = 840 \frac{mg}{L}$$

MUESTRA 1

$$\frac{meq}{L}(Ca^{2+} + Mg^{2+}) = \frac{40.6ml * 0.01meq/L * 1000ml}{25 ml} = 16.24meq/L$$

$$\frac{meq}{L}(Ca^{2+} + Mg^{2+}) = 16.4 \frac{meq}{L} * 50 \frac{mg}{meq} = 812 \frac{mg}{L}$$

MUESTRA 2

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = \frac{36.7\text{ml} * 0.01\text{meq/L} * 1000\text{ml}}{25\text{ ml}} = 14.68\text{meq/L}$$

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 14.68 \frac{\text{meq}}{\text{L}} * 50 \frac{\text{mg}}{\text{meq}} = 734 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

MUESTRA 3

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = \frac{30.2\text{ml} * 0.01\text{meq/L} * 1000\text{ml}}{25\text{ ml}} = 12.08\text{meq/L}$$

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 12.08 \frac{\text{meq}}{\text{L}} * 50 \frac{\text{mg}}{\text{meq}} = 604 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

MUESTRA 4

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = \frac{24.5\text{ml} * 0.01\text{meq/L} * 1000\text{ml}}{25\text{ ml}} = 9.8\text{meq/L}$$

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 9.8 \frac{\text{meq}}{\text{L}} * 50 \frac{\text{mg}}{\text{meq}} = 490 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

MUESTRA 5

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = \frac{20.2\text{ml} * 0.01\text{meq/L} * 1000\text{ml}}{25\text{ ml}} = 8.08\text{meq/L}$$

$$\frac{\text{meq}}{\text{L}}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 8.08 \frac{\text{meq}}{\text{L}} * 50 \frac{\text{mg}}{\text{meq}} = 404 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados 1

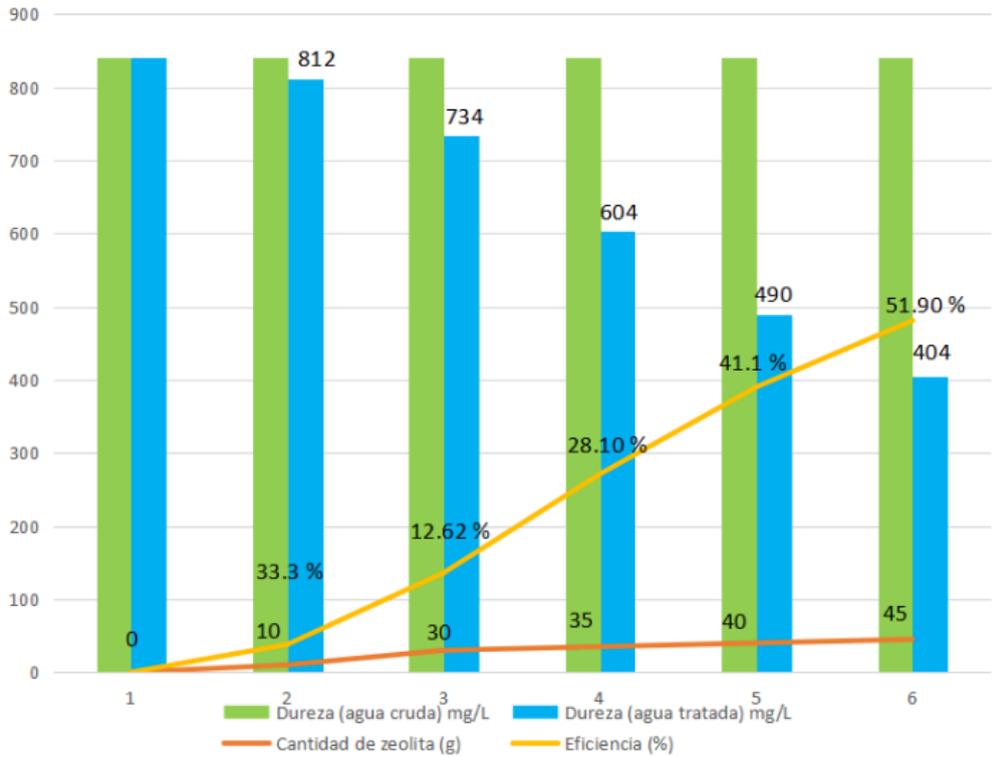
3.1.1. Interpretación de los resultados tratamiento de agua con zeolita

Tratamientos	Dureza (agua cruda) mg/L	Cantidad de zeolita (g)	Dureza (agua tratada) mg/L	Eficiencia (%)
1	840	0 g	840 mg/L	0 %
2	840	10 g	812 mg/L	3.33 %
3	840	30 g	734 mg/L	12.62 %
4	840	35 g	604 mg/L	28.10 %

5	840	40 g	490 mg/L	41.67 %
6	840	45 g	404 mg/L	51.90 %

Fuente: elaboración propia

3.1.2. interpretación de los resultados en gráfica



Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos en el tratamiento del agua con zeolita muestran una disminución progresiva de la dureza total, partiendo de una dureza inicial del agua cruda de 840 mg/L. Esta alta concentración indica que se trata de un agua con un nivel considerable de dureza, lo cual representa una condición desfavorable para el consumo humano o uso doméstico sin tratamiento previo. El objetivo del tratamiento con zeolita es reducir esta dureza mediante el proceso de intercambio iónico.

A partir de la aplicación de 10 gramos de zeolita, la dureza disminuye ligeramente de 840 mg/L a 812 mg/L, alcanzando una eficiencia del 3.33 %. Aunque la reducción es mínima, representa el inicio del efecto del material sobre los iones presentes en el agua. Con 30 gramos de zeolita, se logra reducir la dureza a 734 mg/L, mejorando la eficiencia al 12.62 %, lo cual demuestra que, al aumentar la cantidad de zeolita, se incrementa también la capacidad del sistema para remover los iones de calcio y magnesio.

La tendencia de reducción de dureza continúa con 35 y 40 gramos de zeolita, obteniéndose valores de 604 mg/L y 490 mg/L, respectivamente. En estos casos, la eficiencia del tratamiento se eleva a 28.10 % y 41.67 %, lo cual refleja una mejora significativa en la calidad del agua tratada. Finalmente, con 45 gramos de zeolita, la dureza del agua disminuye hasta 404 mg/L, alcanzando la mayor eficiencia del proceso con un 51.90 % de remoción de dureza.

Estos resultados demuestran que la zeolita es un material eficaz para reducir la dureza del agua cruda, especialmente cuando se emplean cantidades superiores a 30 gramos. Si bien el comportamiento es

claramente positivo, también se observa que el aumento en eficiencia no es completamente lineal, lo que podría indicar la proximidad a un punto de saturación. Por ello, sería conveniente continuar con ensayos utilizando mayores cantidades de zeolita para determinar si se puede alcanzar una eficiencia aún mayor o si el sistema llega a un límite en su capacidad de intercambio iónico.

4. Conclusiones

La alta dureza del agua en la zona Salida Arequipa – Juliaca representa un serio problema para la salud y calidad de vida de sus residentes, especialmente en las residencias estudiantiles. Este fenómeno, generado por formaciones geológicas ricas en carbonatos y silicatos, eleva los niveles de calcio y magnesio en las aguas subterráneas, convirtiéndolas en inapropiadas para el consumo humano sin tratamiento previo. Frente a esta problemática, el uso de zeolita natural activada ha demostrado ser una solución técnica eficaz y de bajo costo. El tratamiento experimental realizado evidenció una reducción progresiva de la dureza total del agua: desde 840 mg/L hasta 404 mg/L al aplicar 45 gramos de zeolita, logrando una eficiencia de remoción de hasta el 51.90%. Esto indica que la zeolita, adecuadamente activada con KOH y tratada térmicamente, es capaz de retener eficientemente los iones de calcio y magnesio. Los resultados también revelan que la eficiencia del tratamiento se incrementa con la cantidad de zeolita utilizada, aunque con una tendencia no lineal, lo cual sugiere la existencia de un límite de saturación del material. No obstante, incluso en cantidades moderadas, el material ya muestra beneficios notables, lo cual lo convierte en una opción viable para implementar en sistemas de tratamiento doméstico o comunitario. Por lo tanto, se concluye que la aplicación de zeolita natural activada en la zona Salida Arequipa – Juliaca no solo es efectiva desde el punto de vista técnico, sino también sostenible y replicable en contextos similares. Su implementación permitiría mejorar significativamente la calidad del agua en comunidades vulnerables, contribuyendo así al derecho al acceso a agua segura y de calidad.

Referencias

- Barreto Soto, R. (2021). Influencia de la temperatura y tiempo de activación térmica en la solubilidad alcalina de las zeolitas del yacimiento Caimanes. SCIELO. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852021000300638
- Burgos Ibañez, J. D. (2024). Influencia de la zeolita natural en la reducción de la dureza del agua subterránea de la Universidad Nacional de Trujillo [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo].
- Condori Ccallo, A., & Córdova Mamani, E. (2020). Aplicación de una batería de filtros empacados en zeolita (Clinoptilolita), para la remoción de hierro y manganeso del agua de la microcuenca Juninguillo la Mina a escala piloto Moyobamba – 2016 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio UNSM. <https://repositorio.unsm.edu.pe/item/a08e583d-9acc-4018-8d7e-d5846d83a4ca>
- Organización Mundial de la Salud. (2011). Guías para la calidad del agua potable (4.a ed.). OMS.
- Ozekmekci, S. (2015). Applications of natural zeolites in water treatment: A short review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2480–2487. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3736-2>

Anexos

