

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Remoción de arsénico con zeolitas activadas del altiplano  
peruano en aguas de consumo humano**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autor:**

Idler Adolf Huaman Huisa  
Josue Enrique Humpire Mamani

**Asesor:**

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

**Juliaca, diciembre de 2024**

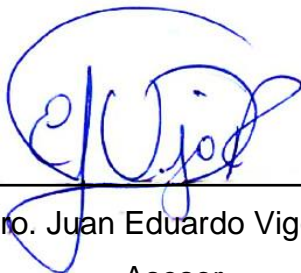
## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON ZEOLITAS ACTIVADAS DEL ALTIPLANO PERUANO EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO”** de los autores **Idler Adolf Huaman Huisa** y **Josue Enrique Humpire Mamani**, tiene un índice de similitud de 5% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 11 días del mes de diciembre del año 2024.



---

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a... 02... día(s) del mes de... diciembre... del año 20 24, siendo las... 10:00... horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Msc. Miguel Angel Salcedo Enriquez, el (la) secretario(a): Msc. Loayda Abigail Bondou Turpo y los demás miembros: Ing. Verónica Haydee Pari Mamani Msc. Franklin Elard Zapana Yucra y el (la) asesor(a) Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: "Remoción de arsénico con zeolitas activadas del altiplano peruano en aguas de consumo humano"

del(los) bachiller(es): a) Idler Adolf Huaman Huisa b) Josue Enrique Humpire Mamani

c) conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Idler Adolf Huaman Huisa

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente



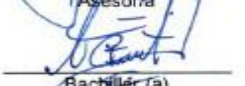


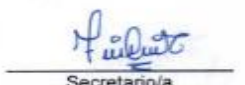

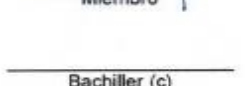
Bachiller (b): Josue Enrique Humpire Mamani

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior. Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente/a  
 Asesor/a  
 Bachiller (a)  
 Miembro  
 Bachiller (b)  
 Secretario/a  
 Miembro  
 Bachiller (c)

## **AGRADECIMIENTO**

### **Idler Adolf Huaman Huisa**

Agradezco a Dios por su guía y fortaleza en todo este proceso, a mis profesores de la Universidad Peruana Unión por su apoyo y dedicación, y a mi familia por su amor incondicional. Este logro marca el fin de una etapa académica y el inicio de un camino lleno de retos y oportunidades. Como Ingeniero Ambiental, me comprometo a seguir aprendiendo y trabajando por un futuro sostenible, reconociendo la formación de calidad que recibí en la universidad.

### **Josue Enrique Humpire Mamani**

Agradezco a Dios por su guía y fortaleza en todo este proceso, a mis profesores de la Universidad Peruana Unión por su apoyo y dedicación, y a mi familia por su amor incondicional. Este logro marca el fin de una etapa académica y el inicio de un camino lleno de retos y oportunidades. Como Ingeniero Ambiental, me comprometo a seguir aprendiendo y trabajando por un futuro sostenible, reconociendo la formación de calidad que recibí en la universidad.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
2.1. Preparación de agua para la sorción.....	14
2.2. Extracción de zeolita natural.....	15
2.3. Activación de las zeolitas.....	15
2.4. Análisis de difracción de rayos X (DRX) en zeolitas.....	16
2.5. Diseño de columnas de lecho empacado para el uso de zeolitas.....	16
2.6. Análisis del potencial de hidrógeno de agua.....	18
2.7. Análisis de la conductividad eléctrica del agua.....	18
2.8. Análisis de la turbidez del agua.....	19
2.9. Análisis de niveles de arsénico en agua.....	19
3. RESULTADOS.....	20
3.1. Caracterización del agua para sorción.....	20
3.2. Caracterización de zeolitas naturales activadas.....	21
3.3. Potencial de hidrógeno del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas.....	22

3.4. Conductividad eléctrica del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas .....	24
3.5. Turbiedad del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas .....	25
3.6. Niveles de arsénico del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas .....	26
4. DISCUSIONES .....	27
4.1. Caracterización del agua para Sorción .....	27
4.2. Caracterización de la Zeolita .....	28
4.3. Caracterización de la Zeolita .....	30
4.4. Conductividad eléctrica.....	32
4.5. Turbiedad del agua después del tratamiento.....	34
4.6. Niveles de arsénico del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas .....	36
5. CONCLUSIONES .....	38
6. REFERENCIAS .....	41
7. ANEXOS .....	46

# **Remoción de arsénico con zeolitas activadas del altiplano peruano en aguas de consumo humano**

*Idler Adolf Huaman Huisa<sup>1</sup>, Josue Enrique Humpire Maman<sup>2</sup>*

*Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP. Ingeniería*

*Ambiental, Juliaca, Perú*

## **RESUMEN**

El objetivo de este estudio es evaluar la eficiencia de zeolitas activadas del altiplano peruano en la remoción de arsénico de aguas de consumo humano. Se extrajeron zeolitas naturales de tres localidades (Atuncolla, Ocuvi y Crucero) y fueron sometidas a activación química (con ácido clorhídrico) y térmica. La metodología incluyó pruebas de adsorción en filtros de columna de lecho fijo bajo diferentes condiciones de pH y concentración de arsénico. Los resultados indicaron que las zeolitas activadas térmicamente mostraron mayor eficiencia en la remoción de arsénico, alcanzando concentraciones finales de 0.006 mg/L, mientras que las activadas químicamente redujeron el arsénico a 0.008 mg/L. Ambas técnicas lograron concentraciones por debajo del límite permitido por la OMS (0.01 mg/L). La procedencia de las zeolitas también influyó, siendo las de Crucero las más efectivas. En términos de calidad del agua, las zeolitas activadas térmicamente también redujeron mejor la turbidez y aumentaron ligeramente el pH. Este estudio demuestra el potencial de las zeolitas activadas como una solución eficiente y de bajo costo para la remoción de arsénico en aguas rurales del altiplano peruano.

**Palabras clave:** remoción de arsénico, zeolitas activadas, activación térmica, tratamiento de agua, altiplano peruano, adsorción.

## **Removal of arsenic with activated zeolites from the Peruvian highlands in waters for human consumption**

### **ABSTRACT**

The objective of this study is to evaluate the efficiency of activated zeolites from the Peruvian highlands in the removal of arsenic from drinking water. Natural zeolites were extracted from three locations (Atuncolla, Ocuvi, and Crucero) and subjected to chemical (hydrochloric acid) and thermal activation. The methodology included adsorption tests using fixed-bed column filters under different pH conditions and arsenic concentrations. The results indicated that thermally activated zeolites were more efficient in removing arsenic, achieving final concentrations of 0.006 mg/L, while chemically activated zeolites reduced arsenic to 0.008 mg/L. Both methods achieved concentrations below the WHO limit (0.01 mg/L). The origin of the zeolites also influenced the results, with those from Crucero being the most effective. In terms of water quality, thermally activated zeolites also better reduced turbidity and slightly increased the pH. This study demonstrates the potential of activated zeolites as an efficient and low-cost solution for arsenic removal in rural water sources in the Peruvian highlands.

**Keywords:** arsenic removal, activated zeolites, thermal activation, water treatment, Peruvian highlands, adsorption.

## 1. INTRODUCCIÓN

El arsénico es considerado uno de los contaminantes más peligrosos para la salud humana, siendo responsable de diversas afecciones no cancerígenas, como la hiperqueratosis en las palmas y plantas de los pies, así como alteraciones en la pigmentación de la piel en áreas como el rostro, el tórax y el cuello. También se ha asociado con la aparición de arritmias, malformaciones congénitas, aberraciones cromosómicas y trastornos en la actividad eléctrica del corazón (Narváez y Santes, 2009). La presencia de este metal en fuentes de agua para el consumo humano representa una importante preocupación tanto ambiental como de salud pública en muchas regiones del mundo como Bangladesh, Bengala Occidental, India, Myanmar, Vietnam, Estados Unidos, Nepal, Camboya, Pakistán y China son países donde aproximadamente 200 millones de personas están expuestas a niveles elevados de arsénico debido al consumo de agua potable contaminada (Asere et al., 2019).

El arsénico se encuentra comúnmente en regiones con actividad volcánica o minera, y su liberación al agua puede ser tanto de origen natural como antropogénico (Šiljeg et al., 2012). En particular, el altiplano peruano, con su geología rica en minerales volcánicos y actividad hidrotermal, presenta condiciones propicias para la movilización de arsénico hacia los cuerpos de agua, afectando especialmente las fuentes de agua utilizadas por las comunidades rurales para consumo humano (Peralta, 2021). Según estudios recientes, más de 170 millones de personas en el mundo se ven afectadas por el consumo de agua con altos niveles de arsénico, lo que subraya la necesidad urgente de tecnologías efectivas para su remoción en áreas vulnerables (Yeo et al., 2021).

A nivel mundial, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un límite máximo de 10 µg/L de arsénico en agua potable debido a los efectos adversos que puede

generar sobre la salud humana (Mora-Bueno et al., 2012). No obstante, en diversas zonas del altiplano peruano, se han registrado concentraciones que superan significativamente este umbral, alcanzando en algunos casos hasta 50  $\mu\text{g/L}$  o más, lo que incrementa el riesgo para las poblaciones locales. En el agua, el arsénico se presenta en dos estados de oxidación, As (V) y As (III), siendo el arsenito (As III) más tóxico que el arseniato (As V) (Calcina-Benique et al., 2022). El consumo prolongado de agua contaminada con arsénico ha sido vinculado con una serie de enfermedades, entre ellas diversos tipos de cáncer (especialmente de piel, pulmón y vejiga), además de trastornos cardiovasculares, daño neurológico, y problemas en el desarrollo infantil (Šiljeg et al., 2012).

Las zeolitas son minerales microporosos que poseen una estructura cristalina única, compuesta por tetraedros de silicio y aluminio, lo que les confiere una elevada capacidad de intercambio iónico (Palomino et al., 2022). Las zeolitas activadas tienen una eficacia mejorada para la adsorción de contaminantes como el arsénico, gracias a la sustitución de ciertos cationes y la presencia de canales específicos que facilitan la interacción con las especies contaminantes presentes en el agua (de Gennaro et al., 2020). Entre los tipos de zeolitas más estudiados se encuentran la clinoptilolita y la mordenita, ambas destacadas por su capacidad de eliminar tanto arsénico en estado trivalente (As III) como en estado pentavalente (As V), las formas más comunes de este elemento en el agua (Bilici Baskan y Pala, 2011).

La activación de las zeolitas implica un proceso que incluye la modificación física y química de su estructura. Este procedimiento tiene como objetivo mejorar sus propiedades adsorbentes al incrementar la superficie específica y optimizar los sitios activos para la adsorción de arsénico (Mayta et al., 2022). Un factor clave a considerar es el impacto de otras especies químicas en el agua que pueden competir con el arsénico por los sitios de adsorción en las zeolitas. Condiciones como el pH, la temperatura y la presencia de iones

como fosfatos y carbonatos pueden afectar la eficacia de las zeolitas activadas en la adsorción, lo que pone de manifiesto la necesidad de ajustar las condiciones operativas para maximizar la eficiencia de eliminación del arsénico (Yeo et al., 2021).

A lo largo de los años, se han desarrollado diversas tecnologías para eliminar arsénico del agua, abarcando procesos físicos, químicos y biológicos. Entre las más utilizadas se encuentran la coagulación-floculación, la adsorción (Francisca y Carro, 2014), la filtración mediante membranas y la ósmosis inversa (Revelli et al., 2014). Sin embargo, muchas de estas tecnologías presentan importantes limitaciones en su implementación. Entre estas limitaciones se incluyen altos costos de operación y mantenimiento, elevados requerimientos energéticos y la necesidad de personal especializado para su manejo.

En este contexto, las zeolitas han ganado atención como una opción viable para la remoción de arsénico. Las zeolitas son minerales naturales que poseen una estructura porosa tridimensional de aluminosilicatos, lo que les otorga una alta capacidad de intercambio iónico y adsorción de contaminantes. Debido a su abundancia natural y a su relativa facilidad para ser modificadas o activadas, las zeolitas representan una opción de bajo costo y alta eficiencia para el tratamiento de aguas en zonas rurales (Quispe Díaz et al., 2022).

Las zeolitas naturales se encuentran ampliamente distribuidas en diferentes partes del mundo. No obstante, su capacidad para eliminar el arsénico de manera eficiente no siempre es suficiente, por lo que es necesario someterlas a activación a través de tratamientos físicos o químicos que optimicen sus propiedades adsorbentes (de Gennaro et al., 2020). Estos tratamientos pueden consistir en la modificación de la superficie de la zeolita con agentes químicos, incrementando de este modo su afinidad por los iones de arsénico presentes en el agua (Bilici Baskan y Pala, 2011).

El proceso de remoción de arsénico con zeolitas activadas se basa principalmente en mecanismos de adsorción e intercambio iónico. Las zeolitas tienen una estructura cristalina formada por una red tridimensional de tetraedros de silicio y aluminio que crean cavidades y canales de tamaño molecular. Estas cavidades permiten el intercambio de cationes y la adsorción de moléculas o iones en su superficie (Burgos et al., 2022). El uso de zeolitas en la remoción de arsénico ha sido ampliamente estudiado en diversas regiones del mundo, con resultados prometedores. En países como India y Bangladesh, donde las concentraciones de arsénico en agua potable superan los límites recomendados, las zeolitas naturales y activadas han sido utilizadas con éxito en proyectos a pequeña escala para el tratamiento de agua en comunidades rurales (Colmenero-Sujo y Villalba, 2023).

La activación de las zeolitas generalmente se lleva a cabo mediante la impregnación de metales como el hierro o el manganeso, que mejoran su capacidad para adsorber arsénico a través de reacciones redox o la formación de hidróxidos que funcionan como sitios activos para la adsorción de arsénico (Adilson et al., 2011). Así, las zeolitas activadas con hierro (Fe-zeolitas) han demostrado ser especialmente efectivas en la adsorción de arsenato (As(V)), ya que este metal promueve la oxidación del arsenito (As(III)) a arsenato, que se adsorbe más fácilmente (Palomino et al., 2022). El arsénico, en sus formas más comunes en el agua (arsenito, As (III) y arsenato, As(V)), puede ser adsorbido en la superficie de las zeolitas activadas mediante mecanismos como el intercambio de aniones, la formación de complejos superficiales, o la precipitación sobre la superficie del mineral. Dependiendo de la activación de la zeolita y de las condiciones del agua, se puede favorecer la adsorción de una especie particular de arsénico (As(III) o As(V)) (Colmenero-Sujo y Villalba, 2023)

Un enfoque basado en el uso de zeolitas activadas no solo representa una solución tecnológica eficiente, sino que también permite el aprovechamiento de recursos locales, lo

que reduce los costos de implementación y facilita la adopción de estas tecnologías por parte de las comunidades locales. Además, la activación de zeolitas es un proceso relativamente simple y de bajo costo, lo que lo hace accesible para contextos rurales con limitados recursos técnicos y financieros (Quispe Díaz et al., 2022). En el contexto del altiplano peruano, el uso de zeolitas locales no ha sido completamente explorado, aunque existen depósitos significativos de estos minerales en diversas zonas. Las zeolitas naturales de la región, que son en su mayoría clinoptilolitas, presentan una estructura porosa favorable para la adsorción de contaminantes, y su activación con metales como el hierro puede aumentar considerablemente su capacidad para remover arsénico (Quispe Díaz et al., 2022).

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la eficiencia de las zeolitas activadas del altiplano peruano en la remoción de arsénico de aguas destinadas al consumo humano. Para ello, se han utilizado zeolitas naturales de la región, que han sido sometidas a procesos de activación química para optimizar su capacidad adsorbente. Se llevarán a cabo experimentos bajo diferentes condiciones experimentales, tales como variación de pH, concentración inicial de arsénico, y tiempo de contacto, para determinar las condiciones óptimas de remoción. El estudio también busca establecer una base técnica y científica para la implementación de esta tecnología en zonas rurales del altiplano, contribuyendo así a la mejora de la calidad del agua y a la reducción de los riesgos asociados al consumo de agua contaminada con arsénico (Quispe Díaz et al., 2022).

Este estudio aporta una solución potencialmente sostenible y accesible para la remediación del arsénico en aguas de consumo humano en el altiplano peruano. Al emplear un recurso local como las zeolitas, activadas con procesos simples, se puede generar una tecnología de bajo costo que puede ser adoptada por las comunidades afectadas. Los resultados de esta investigación sirven como base para el desarrollo de sistemas de

tratamiento de agua a pequeña escala en zonas rurales, promoviendo la salud pública y el bienestar de las poblaciones locales (Franco y Magalí, 2014)

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Preparación de agua para la sorción

La muestra de agua subterránea para consumo humano fue recolectada en la ciudad de Juliaca, Perú, en el mes de julio de 2024. Las propiedades físicas y químicas del agua se presentan en la Tabla 1. Estos parámetros fueron registrados para caracterizar las características iniciales del agua antes de su pretratamiento. Luego, las muestras de agua se expusieron a la luz solar durante 8 horas para oxidar el arsénico, convirtiendo el arsenito (As+3) en arseniato (As+5).

**Tabla1**

*Valores promedio de las propiedades físicas y químicas del agua subterránea sin tratamiento de la ciudad de Juliaca.*

<b>Propiedades físicas y químicas</b>	<b>Valor</b>
Turbidez (UNT)	3.03
Conductividad eléctrica ( $\mu\text{mho/cm}$ )	780.00
pH a temperatura de 12.3 °C	7.20
Arsénico (mg/l)	0.3043

## **2.2. Extracción de zeolita natural**

En este trabajo, se extrajeron zeolitas naturales de tipo clinoptilolita de tres localidades diferentes del departamento de Puno, Perú: siendo del distrito de Ocuvi, distrito de Atuncolla y del distrito de Crucero. Las muestras de zeolita fueron trituradas y tamizadas en diferentes granulometrías, clasificándose en fracciones de tamaño de partícula a través de mallas numeradas 8, 10, 13 y 16. Posteriormente las zeolitas se lavaron con agua destilada para eliminar partículas superficiales y el polvo. Luego se pasó a secar en horno a temperatura de 100°C por 24 horas (Quispe Díaz et al., 2022).

## **2.3. Activación de las zeolitas**

La activación de zeolitas se llevó a cabo utilizando dos métodos: 1) Activación química, en la que se aplicó ácido clorhídrico (HCl) a una concentración de 1 M. Este tratamiento se seleccionó debido a que el HCl potencia la adsorción de cationes y mejora la eficiencia en la eliminación de arsénico. Se controló cuidadosamente la cantidad de ácido utilizado para evitar un exceso que pudiera comprometer la cristalinidad de la zeolita, lo cual podría disminuir su capacidad de adsorción de arsénico. Esta activación se realizó a temperatura ambiente (~20 °C) por un periodo de 24 horas con agitación continua (100 rpm) (Javier et al., 2015). Posteriormente, la zeolita fue lavada con abundante agua destilada hasta alcanzar un pH neutro, y luego se secó a 100 °C durante 4 horas (Palomino et al., 2022). 2) Activación térmica, en este método la zeolita se sometió a una temperatura de 400 °C en un horno durante 24 horas. Este proceso permite la eliminación de moléculas de agua y otras sustancias adsorbidas en los poros de la zeolita, incrementando su capacidad de adsorción. Tras el tratamiento, la zeolita se dejó enfriar gradualmente en un desecador para evitar una rehidratación rápida (Javier et al., 2015). Una vez activadas, las zeolitas se almacenaron en recipientes herméticos para protegerlas de la humedad y de otros

contaminantes ambientales (Guerra-González et al., 2021). Además, se registró la información en cada recipiente, indicando la fecha de activación y el tipo de activación utilizado.

#### **2.4. Análisis de difracción de rayos X (DRX) en zeolitas**

Se realizó el análisis de difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro de rayos X modelo Miniflex 600 de la marca Rigaku, el cual estuvo equipado con un tubo de cobre, operando a 40 kV y 15 mA, y con un detector D/teX Ultra2. Se prepararon las muestras de acuerdo a la consistencia granular y cantidad suficiente con el procedimiento estándar para asegurar una distribución homogénea en la superficie de la portamuestra. Luego se procedió a la medición en el rango de  $2\theta$ , que se estableció entre 3.00 y 90.00 grados. Durante la adquisición de datos, se configuraron los parámetros óptimos para obtener una resolución precisa de los picos de difracción. Finalmente, se empleó la base de datos Crystallography Open Database (COD) para identificar las fases cristalinas presentes en las muestras analizadas (Burgos et al., 2022).

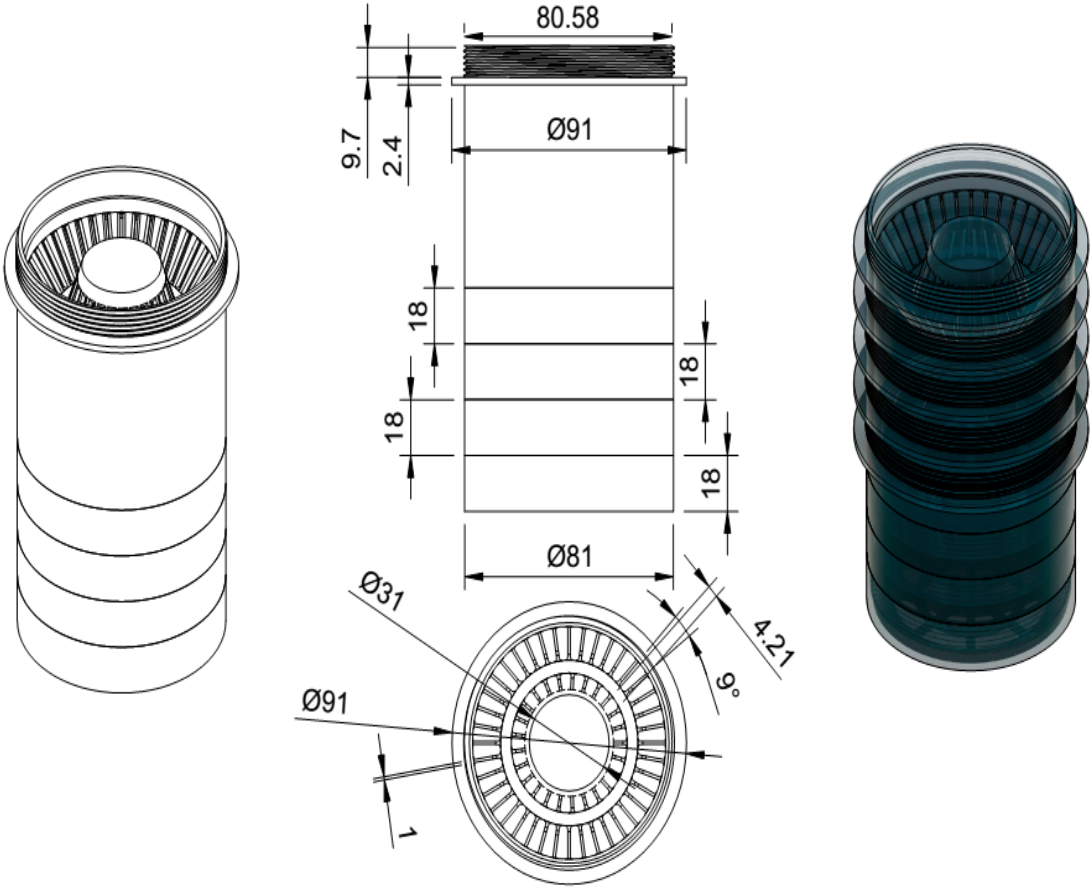
#### **2.5. Diseño de columnas de lecho empacado para el uso de zeolitas**

El diseño de las columnas de lecho empacado para el uso de zeolita fue realizado siguiendo las directrices de Burgos et al. (2022). Este diseño incluyó la determinación de las dimensiones de la columna según el tipo de zeolita utilizada (clinoptilolita), con una altura de 150.00 mm, un diámetro de entrada de 80.58 mm y un diámetro de salida de 81.00 mm (Figura 1). Además, se establecieron las condiciones óptimas de operación, que incluyeron la velocidad de flujo de salida de agua de 1000 ml/h, un tiempo de residencia de 15 minutos, una temperatura de  $\sim 30^{\circ}\text{C}$  y un pH de  $\sim 7.0$ , con el fin de maximizar la eficiencia de adsorción. El sistema fue equipado con distribuidores de entrada y salida para garantizar

un flujo uniforme y evitar la formación de canales y la pérdida de material (Quispe Díaz et al., 2022). Posteriormente, las zeolitas activadas térmicamente y químicamente fueron empacadas por separado en las columnas.

**Figura 1**

*Esquema de la columna de lecho empacado con zeolitas. Las dimensiones se indican en milímetros.*



## **2.6. Análisis del potencial de hidrógeno de agua**

Para el análisis del pH del agua, se empleó un multímetro portátil HQ40D de la marca HACH, previamente calibrado con soluciones tampón de pH 4.0, 7.0 y 10.0 a 25°C para asegurar exactitud en el rango de interés. La muestra de agua (100 ml) fue recolectada en un vaso precipitado, minimizando su exposición al aire para evitar cambios en el contenido de CO<sub>2</sub> disuelto que pudieran alterar el pH. Se mantuvo la muestra a temperatura ambiente y se agitó suavemente antes de la medición para asegurar su homogeneidad (Chambilla y Allcca, 2022). El electrodo fue sumergido completamente en la muestra, y el valor de pH se registró una vez estabilizada la lectura.

## **2.7. Análisis de la conductividad eléctrica del agua**

La conductividad eléctrica del agua se evaluó usando un multímetro portátil HQ40D de la marca HACH. El equipo se calibró empleando soluciones estándar de conductividad, siguiendo las especificaciones del fabricante para asegurar precisión en el rango de conductividad requerido. Se recolectaron muestras de agua (100 ml) en vasos precipitados, cuidando de evitar cualquier contaminación externa que pudiera afectar los resultados (Chambilla y Allcca, 2022). Cada muestra fue suavemente homogeneizada antes de proceder con la medición. El electrodo de conductividad del HQ40D se sumergió completamente en la muestra, verificando que no quedaran burbujas adheridas. La medición se registró cuando el valor de conductividad ( $\mu\text{mho/cm}$ ) alcanzó estabilidad en la pantalla del dispositivo.

## **2.8. Análisis de la turbidez del agua**

El análisis de turbidez del agua se realizó utilizando un turbidímetro 2100Q de la marca HACH calibrado previamente con soluciones estándar de turbidez para asegurar la precisión de las mediciones. Se recolectaron muestras de agua en recipientes limpios, evitando cualquier contaminación que pudiera afectar los resultados. Las muestras fueron colocadas en cubetas adecuadas para la medición, y el turbidímetro determinó la cantidad de luz dispersada por las partículas suspendidas en el agua, con la detección de la luz dispersada a 90 grados con respecto a la fuente de luz. Los resultados se expresaron en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) (Chambilla y Allcca, 2022).

## **2.9. Análisis de niveles de arsénico en agua**

El análisis de los niveles de arsénico en agua se realizó según la metodología de Burgos et al. (2022). Las muestras fueron recolectadas en vasos precipitados limpios y estériles, con el fin de garantizar su representatividad y calidad. Posteriormente, se acidificaron con ácido nítrico para evitar la precipitación del arsénico y mantenerlo en su forma disuelta. Además, se realizó un filtrado previo para eliminar partículas que pudieran interferir en el análisis. La determinación de arsénico se llevó a cabo mediante espectrofotometría de absorción atómica (LAAS-A22 Labtron) con generación de hidruros a una longitud de onda entre 530 nm y 540 nm, con celdas de 1 cm. Esta técnica permite detectar el arsénico mediante la medición de la intensidad de luz absorbida en diferentes longitudes de onda, proporcionando así información sobre su concentración en la muestra. Los resultados obtenidos fueron comparados con curvas de calibración estándar para cuantificar el nivel de arsénico presente.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización del agua para sorción

La muestra de agua subterránea para consumo humano fue recolectada en la ciudad de Juliaca, Perú, en el mes de julio de 2024. Las propiedades físicas y químicas del agua se presentan en la Tabla 1. Estos parámetros fueron registrados para caracterizar las características iniciales del agua antes de su pretratamiento. Luego, las muestras de agua se expusieron a la luz solar durante 8 horas para oxidar el arsénico, convirtiendo el arsenito (As+3) en arseniato (As+5).

**Tabla 1**

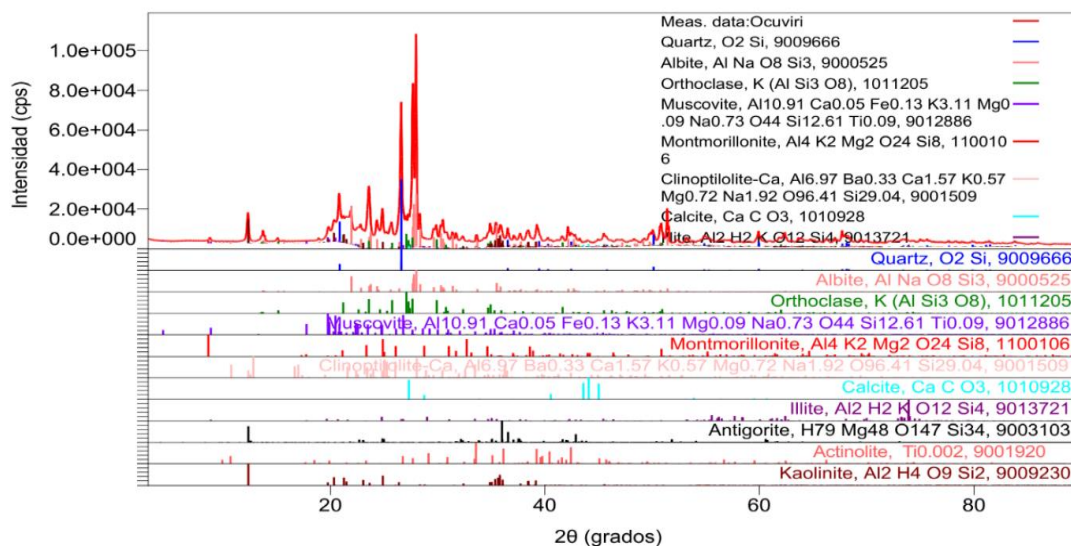
*Valores promedio de las propiedades físicas y químicas del agua subterránea sin tratamiento de la ciudad de Juliaca.*

<b>Propiedades físicas y químicas</b>	<b>Valor</b>	<b>Normativa DS N° 031-2010-SA.</b>
Turbidez (UNT)	3.03	5 (UNT)
Conductividad eléctrica (µmho/cm)	780.00	1500 (µmho/cm)
pH a temperatura de 12.3 °C	7.20	6.5 a 8.5 (pH)
Arsénico (mg/l)	0.3043	0,010 (As)

### 3.2. Caracterización de zeolitas naturales activadas

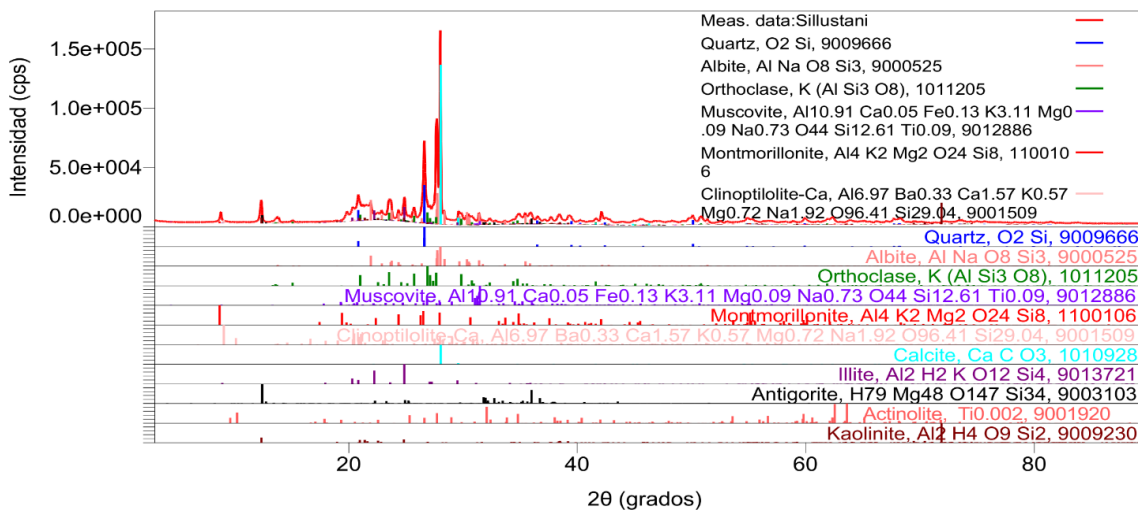
**Figura 2**

Composición mineralógica de la zeolita de Ocuviiri determinada mediante difracción de rayos X.



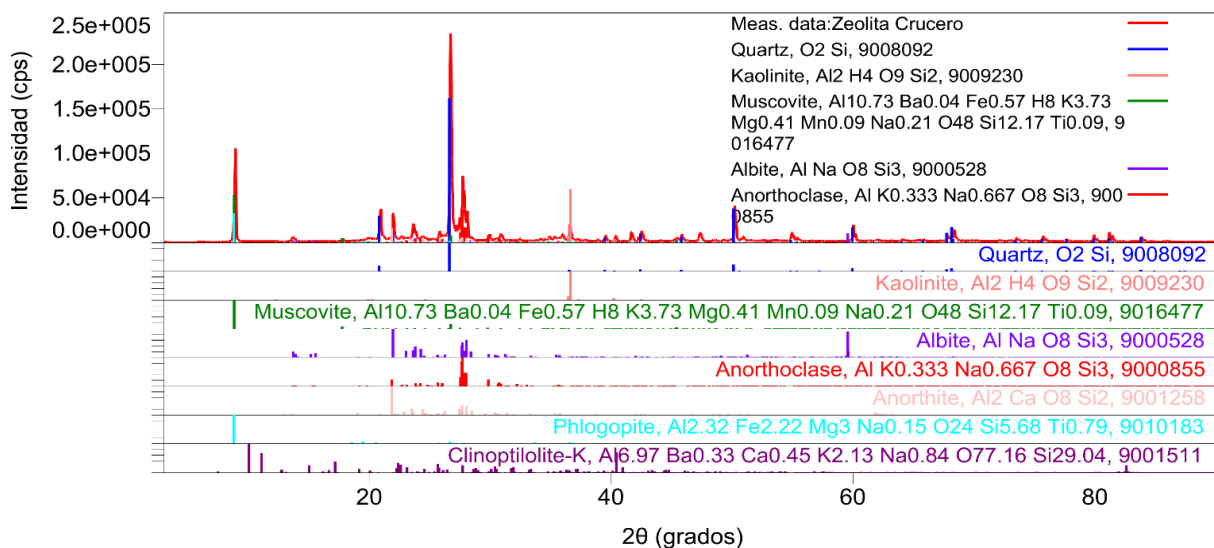
**Figura 3**

Composición mineralógica de la zeolita de Atuncolla obtenida mediante difracción de rayos X.



**Figura 4**

*Composición mineralógica de la zeolita de Crucero determinada por difracción de rayos X.*



### 3.3. Potencial de hidrógeno del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas

**Tabla 2**

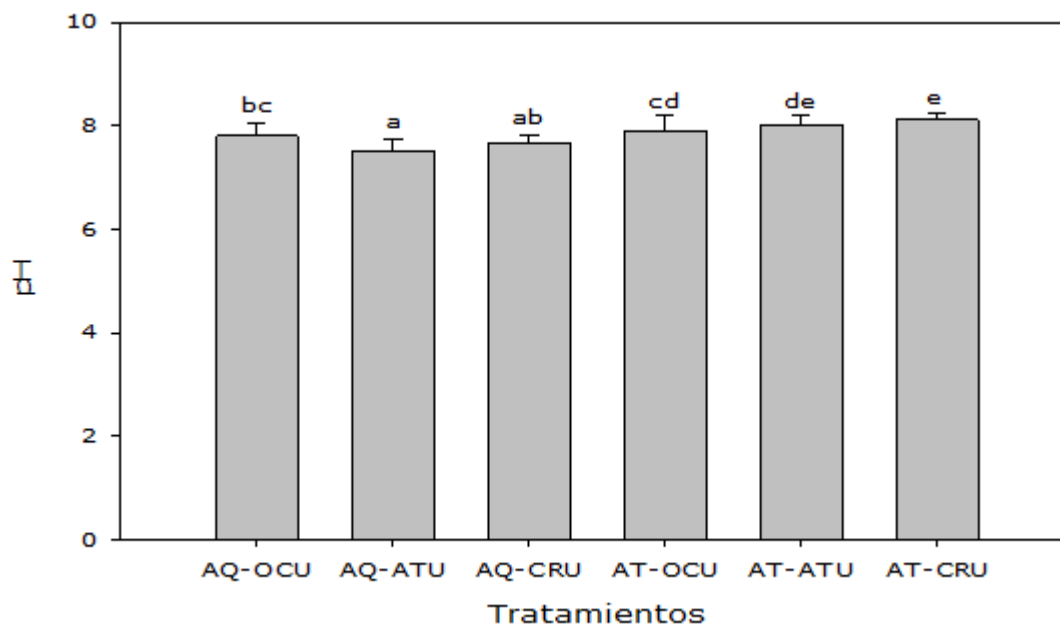
*Resultados de pH del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas.*

Tipo de activación en zeolitas	pH del agua
Activación química (AQ)	7.66 ± 0.02a
Activación térmica (AT)	8.01 ± 0.02b

*Nota:* la tabla 2. Muestra valores de pH del agua después del tratamiento en columna de lecho fijo empacada con zeolitas activadas químicamente (AQ) y térmicamente (AT). Las letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

**Figura 5**

valores de pH del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado con zeolitas, tanto activadas químicamente como térmicamente.



*Nota:* La Figura 5. Muestra Valores de pH del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado con zeolitas, tanto activadas químicamente (AQ-OCU: Ocuvi, AQ-ATU: Atuncolla, AQ-CRU: Crucero) como térmicamente (AT-OCU: Ocuvi, AT-ATU: Atuncolla, AT-CRU: Crucero). Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 3.4. Conductividad eléctrica del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas

**Tabla 3**

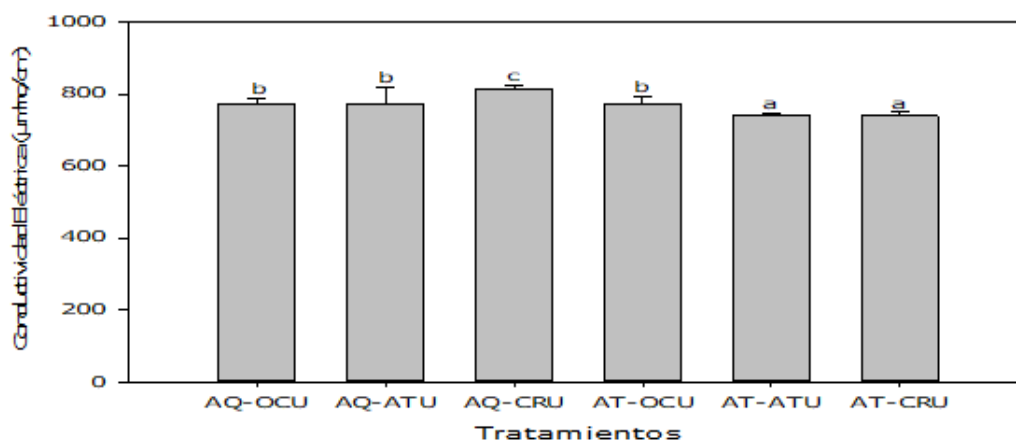
*Resultados de la conductividad eléctrica del agua tratada mediante una columna de lecho empacado con zeolitas activadas químicamente (AQ) y térmicamente (AT).*

Tipo de activación en zeolitas	Conductividad eléctrica del agua ( $\mu\text{mho/cm}$ )
Activación química (AQ)	749.5 $\pm$ 2.48b
Activación térmica (AT)	786.26 $\pm$ 2.48a

Nota. La Tabla 3. Muestra valores de la conductividad eléctrica del agua después del tratamiento en columna de lecho empacados con zeolitas activadas químicamente (AQ) y térmicamente (AT). Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

**Figura 6**

*valores de conductividad eléctrica del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado con zeolitas, activadas químicamente y térmicamente.*



Nota: La Figura 6. Muestra valores de conductividad eléctrica del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado con zeolitas, activadas químicamente (AQ-OCU: Ocuvirí, AQ-ATU: Atuncolla, AQ-CRU: Crucero) y térmicamente (AT-OCU: Ocuvirí, AT-ATU: Atuncolla, AT-CRU: Crucero). Letras diferentes muestran diferencias significativas para la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 3.5. Turbiedad del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas

**Tabla 4**

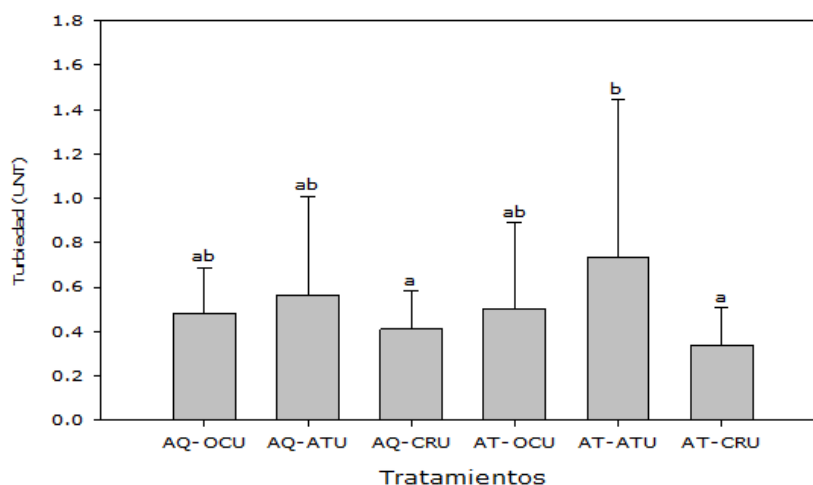
Valores de turbidez del agua después del tratamiento en una columna de lecho empacado de zeolitas con activación química (AQ) y activación térmica

Tipo de activación en zeolitas	Turbidez del agua (UNT)
Activación química (AQ)	0.49 ± 0.04a
Activación térmica (AT)	0.53 ± 0.04a

Nota. En la Tabla 4. Muestra valores de turbidez del agua después del tratamiento en columna de lecho fijo empacados con zeolitas activadas químicamente (AQ) y activadas térmicamente (AT). Letras diferentes muestran diferencias significativas para la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

**Figura 7**

Diferencias significativas en los valores de turbidez para el agua tratada según el tipo de activación y la procedencia geológica de las zeolitas.



Nota. La Figura 7. Muestra valores de turbidez del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado con zeolitas. Activadas químicamente (AQ-OCU: Ocuveri, AQ-ATU: Atuncolla, AQ-CRU: Crucero) y activadas térmicamente (AT-OCU: Ocuveri, AT-ATU: Atuncolla, AT-CRU: Crucero). Letras diferentes muestran diferencias significativas para la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 3.6. Niveles de arsénico del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas

**Tabla 5**

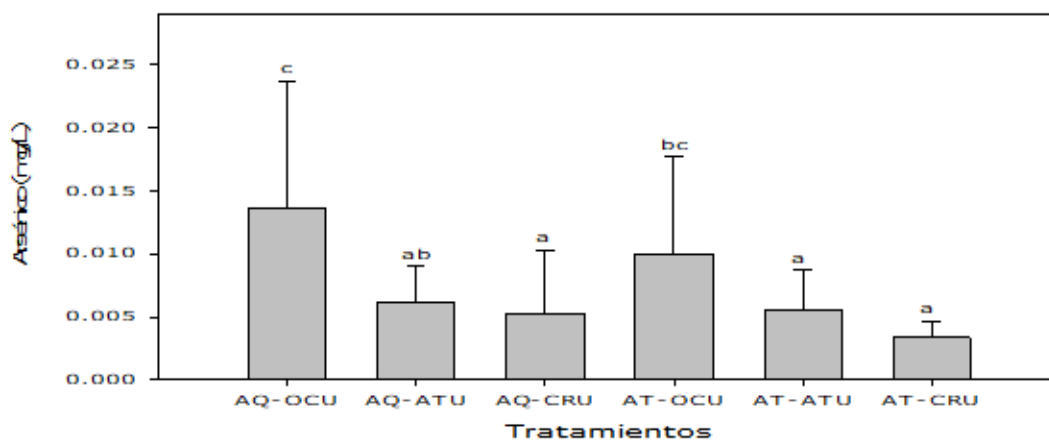
*niveles de arsénico del agua después del tratamiento en columna de lecho fijo empacados con zeolitas activadas químicamente y activadas térmicamente.*

Tipo de activación en zeolitas	Arsénico en el agua (mg/L)
Activación Térmica (AT)	0.006±0.001 <sup>a</sup>
Activación Química (AQ)	0.008±0.001 <sup>b</sup>

*Nota.* La Tabla 5. Muestra niveles de arsénico del agua después del tratamiento en columna de lecho fijo empacados con zeolitas activadas químicamente (AQ) y activadas térmicamente (AT). Letras diferentes muestran diferencias significativas para la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

**Figura 8**

*Variaciones en los niveles de arsénico según el tipo de activación y la procedencia geológica de las zeolitas.*



*Nota.* La Figura 8. Muestra niveles de arsénico en el agua tras el tratamiento en columna de lecho empacado con zeolitas, activadas tanto químicamente (AQ-OCU: Ocuvi, AQ-ATU: Atuncolla, AQ-CRU: Crucero) como térmicamente (AT-OCU: Ocuvi, AT-ATU: Atuncolla, AT-CRU: Crucero). Letras diferentes muestran diferencias significativas para la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

## 4. DISCUSIONES

### 4.1. Caracterización del agua para Sorción

La caracterización del agua subterránea recolectada en Juliaca, Perú, muestra condiciones iniciales que justifican la necesidad de un tratamiento para garantizar su potabilidad y conformidad con las normativas establecidas. En este contexto, se analizaron los parámetros físicos y químicos del agua, comenzando por el valor de turbidez registrado (3.03 UNT), el cual se encuentra dentro del límite establecido por la normativa peruana (DS N° 031-2010-SA:  $\leq 5$  UNT). Aunque el agua es visualmente aceptable, este nivel de turbidez podría contener partículas coloidales y materia suspendida que interfieran en el proceso de sorción de arsénico (Zoroufchi Benis et al., 2023). Por ello, aunque la turbidez no representa un desafío significativo, es esencial reducirla en etapas posteriores, ya que altas concentraciones de partículas pueden disminuir la eficiencia en la remoción de contaminantes en el lecho empacado con zeolita (Fu et al., 2012).

De manera similar, la conductividad eléctrica inicial (780.00  $\mu\text{mho/cm}$ ) está por debajo del límite permitido ( $\leq 1500$   $\mu\text{mho/cm}$ ), lo que sugiere una baja salinidad del agua subterránea. Este aspecto es favorable para los procesos de tratamiento, ya que niveles elevados de salinidad podrían interferir con la eficiencia tanto de la oxidación como de la adsorción de arsénico (John y Das, 2020). Sin embargo, la conductividad eléctrica, aunque no crítica, actúa como un indicador indirecto de la presencia de iones disueltos (Roziková et al., 2020), los cuales podrían competir con el arsénico por los sitios activos de la zeolita. En cuanto al pH registrado (7.20 a 12.3 °C), este se encuentra dentro del rango recomendado (6.5–8.5), siendo ideal para favorecer la oxidación del arsenito ( $\text{As}^{3+}$  a  $\text{As}^{5+}$ ) y su posterior adsorción en el lecho de zeolita (Ma et al., 2020). El pH no solo afecta la especiación del arsénico, sino también la capacidad de adsorción de la zeolita (Sharma y

Sohn, 2009); por lo tanto, un pH inadecuado podría reducir significativamente la eficiencia del tratamiento (Jeon et al., 2009).

Por otro lado, la concentración de arsénico (0.3043 mg/L) excede dramáticamente el límite permisible de 0.010 mg/L para agua potable según la normativa vigente, evidenciando un problema crítico de contaminación en el agua subterránea de Juliaca (Tapia et al., 2019). Este nivel elevado de arsénico en el agua destinada al consumo humano requiere un tratamiento intensivo (Thirunavukkarasu et al., 2005). En este sentido, el proceso de oxidación asistido por radiación ultravioleta se presenta como una solución esencial, ya que convierte el arsenito ( $As^{3+}$ ), más móvil y difícil de remover, en arseniato ( $As^{5+}$ ), que puede ser más fácilmente adsorbido por la zeolita en el lecho empacado (Ryu et al., 2013).

Finalmente, la exposición a la radiación solar durante 8 horas para oxidar  $As^{3+}$  a  $As^{5+}$  ha demostrado ser un método efectivo y sostenible para el pretratamiento del agua. Este proceso no solo reduce la toxicidad del arsénico, sino que también mejora la compatibilidad con el siguiente paso del tratamiento: la sorción en zeolita. No obstante, la eficiencia de esta oxidación depende de factores como la intensidad de la radiación solar, la temperatura y la presencia de otros compuestos competidores (García et al., 2020). Este proceso de oxidación, asistido por radiación ultravioleta, demuestra el potencial de la oxidación, asimismo facilita la remoción del arsénico en el lecho empacado con zeolita (Colmenero-Sujo y Villalba, 2023).

#### **4.2. Caracterización de la Zeolita**

La muestra contiene una alta proporción de albita (32.63%), seguida de muscovita (20.26%), ortoclasa (11.18%) y cuarzo (10.28%), minerales típicos de ambientes con procesos de alteración hidrotermal y sedimentaria (Costafreda et al., 2018). La presencia

de montmorillonita (10.98%) y clinoptilolita-Ca (6.29%) indica condiciones de formación en medios alcalinos y a bajas temperaturas, condiciones que favorecen la formación de minerales con propiedades de adsorción e intercambio iónico (Quispe Díaz et al., 2022). Además, se observan fases menores de caolinita (5.59%), actinolita (1%), antigorita (0.7%), calcita (0.9%) e illita (0.2%), lo que indica influencias de metamorfismo leve y posibles condiciones hidrotermales de baja temperatura, las cuales contribuyen a la diversidad mineralógica de la muestra (Costafreda et al., 2018). La mezcla de estos minerales indica un origen influenciado por alteración hidrotermal, sedimentación y cambios químicos y térmicos, resaltando el potencial de adsorción de la zeolita de Ocuvi para aplicaciones industriales.

La alta proporción de clinoptilolita-Ca (6.29%), una de las zeolitas naturales más comunes, y su estructura rica en aluminosilicatos de calcio confirman su utilidad en procesos de adsorción y purificación (Hernández et al., 2010). La presencia de clinoptilolita junto con montmorillonita, cuarzo y feldespatos indica un origen en un entorno sedimentario o volcánico alterado, un ambiente común para las clinoptilolitas naturales (Morante et al., 2005). Por lo tanto, la zeolita de Ocuvi puede clasificarse como clinoptilolita cálcica, reconocida por su capacidad de intercambio iónico, usada en purificación de aguas, adsorción de metales pesados y catálisis.

El difractograma de rayos X de la zeolita de Atuncolla (Figura 3) muestra una composición mineralógica diversa, destacando una elevada concentración de albita (30.13%), ortoclasa (12.91%), cuarzo (11.51%) y clinoptilolita-Ca (12.01%), siendo esta última una zeolita cálcica con aplicaciones en intercambio iónico y adsorción (Quispe Díaz et al., 2022). La calcita (11.31%) y caolinita (9.11%) presentes indican condiciones de sedimentación y alteración hidrotermal en un medio alcalino. También se identificaron minerales metamórficos como actinolita (5.01%) y antigorita (3.8%), además de trazas de

illita (2.1%), montmorillonita (1.1%) y muscovita (1%), lo que revela influencias de metamorfismo a bajas o moderadas temperaturas y transformación de rocas volcánicas (Costafreda et al., 2018). Esta composición mineralógica apunta a un origen en ambientes volcánicos y sedimentarios alterados, característicos de clinoptilolitas formadas bajo condiciones hidrotermales alcalinas (Morante et al., 2005). La zeolita de Atuncolla contiene clinoptilolita cálcica en un 12.01%, lo cual refuerza su utilidad en procesos industriales de purificación, adsorción y remoción de metales pesados.

#### **4.3. Caracterización de la Zeolita**

La Figura 4, el difractograma de la zeolita de Crucero presenta una composición elevada en albita (28.33%) y cuarzo (25.93%), junto con feldespatos como anortoclasa (12.01%) y anortita (10.71%), indicando un entorno de formación con altos contenidos de silicatos y aluminio, típicos de ambientes sedimentarios y volcánicos alterados (Costafreda Mustelier et al., 2018). La presencia de micas como muscovita (10.31%) y flogopita (7.81%) sugiere un metamorfismo de leve a moderado. Además, se identificó clinoptilolita-K (1.2%), una zeolita potásica en menor proporción, lo que indica una fase zeolítica útil en adsorción e intercambio iónico (Frazao-Ndumba & Coello-velázquez, 2007). Esta combinación mineralógica sugiere un origen en rocas volcánicas y sedimentarias alteradas, donde la presencia de clinoptilolita-K indica una zeolita de tipo potásico. Aunque la proporción de clinoptilolita-K es baja, define el tipo de zeolita en la muestra, siendo eficaz en la adsorción y remoción de iones, especialmente en aplicaciones ambientales (Quispe Díaz et al., 2022).

Los datos revelan que las zeolitas activadas térmicamente (AT) generan un valor de pH alto (8.01) en comparación con las zeolitas activadas químicamente (AQ), cuyo pH fue de 7.66 (ver Tabla 2). Este aumento de pH en el agua podría estar asociado a modificaciones en la superficie de las zeolitas debido al tratamiento térmico, lo que a su vez

podría alterar su capacidad de intercambio iónico. Estudios previos de Burgos et al. (2022); Yeo et al. (2021) han señalado que la activación térmica de las zeolitas puede favorecer una mayor liberación de cationes alcalinos, como el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) o el potasio ( $\text{K}^+$ ), aumentando así la alcalinidad del agua filtrada.

La Figura 5, muestra que los valores de pH del agua varían significativamente dependiendo de la procedencia y tipo de activación de las zeolitas. En el caso de la activación química (AQ), las zeolitas de clinoptilolita-Ca de Ocuvi (AQ-OCU) mostraron el valor de pH más elevado para el agua (7.80), mientras que las zeolitas de Atuncolla (AQ-ATU) y Crucero (AQ-CRU) presentaron valores más bajos (7.52 y 7.67, respectivamente). Estos resultados indican que las características geoquímicas de las zeolitas de Ocuvi, como su mayor contenido de calcio intercambiable, favorecen un comportamiento ligeramente más alcalino en comparación con las zeolitas de Atuncolla y Crucero.

Por otro lado, en la activación térmica (AT), las zeolitas provenientes de Crucero (AT-CRU) mostraron el pH más elevado para el agua (8.12), seguidas por las de Atuncolla (AT-ATU) con un pH de 8.03 y las de Ocuvi (AT-OCU) con 7.90. Este patrón resalta la importancia de las características geológicas y mineralógicas de las zeolitas en su capacidad para modificar el pH del agua. Las zeolitas de Crucero, que son del tipo clinoptilolita-K, mostraron un aumento más pronunciado del pH tras el tratamiento térmico, lo que indica que factores como la proporción de cationes intercambiables y la estructura de la zeolita influyen directamente en su capacidad de alcalinización (de Gennaro et al., 2020; Šiljeg et al., 2012). La presencia de minerales específicos, como el potasio, puede contribuir a este efecto, como se ha observado en investigaciones previas que destacan la influencia de la composición mineral de las zeolitas en la modificación del pH en aplicaciones ambientales (Bilici Baskan y Pala, 2011; Colmenero-Sujo y Villalba, 2023).

Además, la Figura 5 muestran la relevancia de la procedencia de las zeolitas en el diseño de procesos de tratamiento para la remoción de contaminantes como el arsénico, dado que el pH del agua puede influir en la eficiencia de la adsorción de arsénico y otros contaminantes. Tal como señalan Asere et al. (2019), las alteraciones en el pH pueden modificar la carga superficial de las zeolitas, lo cual es un factor clave para el desempeño del proceso de adsorción. Además, la alcalinización del agua puede tener implicaciones en otros aspectos del tratamiento, como la formación de compuestos precipitados o la interacción con otros contaminantes presentes en el agua.

Según las normativas del Ministerio de Salud de Perú (MINSA, 2011), los valores de pH obtenidos en este estudio (entre 7.52 y 8.12) se encuentran dentro del rango permitido para el agua potable (6.5 a 8.5), lo que indica que el agua tratada es apta para el consumo humano. Este hallazgo refuerza la viabilidad de utilizar zeolitas, especialmente aquellas activadas térmicamente, como materiales para el tratamiento de agua, no solo en términos de la remoción de arsénico, sino también en cuanto a su capacidad para mantener la calidad del agua dentro de los parámetros establecidos para consumo humano.

#### **4.4. Conductividad eléctrica**

La tabla 3 muestra la conductividad eléctrica de las zeolitas activadas térmicamente (AT) registran una conductividad eléctrica menor en el agua, con un valor de 749.50  $\mu\text{mho/cm}$ , en comparación con las zeolitas activadas químicamente (AQ), cuya conductividad fue 786.26  $\mu\text{mho/cm}$ . Este comportamiento indica que la activación química favorece la liberación de iones en el agua, posiblemente debido a la presencia de residuos de reactivos químicos en la superficie de las zeolitas o a alteraciones estructurales que facilitan el intercambio iónico. Según otros estudios se menciona que la activación química puede genera sitios adicionales para el intercambio iónico al modificar la estructura

cristalina del material, aumentando la movilidad de los iones en la superficie (Francisca y Carro, 2014; Yeo et al., 2021).

Por otro lado, la activación térmica (AT) genera una menor liberación de iones en el agua, lo cual muestra una conductividad de 749.50  $\mu\text{mho/cm}$  para el agua. Este efecto está relacionado con el impacto del calor en la estructura de las zeolitas, lo cual induce fenómenos como la sinterización o la reducción de sitios activos, disminuyendo la capacidad de la zeolita para interactuar con los iones en el agua (de Gennaro et al., 2020; Šiljeg et al., 2012). Aunque los tratamientos térmicos alteran la superficie de las zeolitas, también pueden reducir la cantidad de cationes disponibles para el intercambio iónico, lo que explica los valores de conductividad más bajos en el agua en comparación con el agua tratadas con las zeolitas activadas químicamente.

La Figura 6 muestra los valores de conductividad eléctrica del agua después del tratamiento en la columna de lecho empacado, destacando que, dentro de las zeolitas activadas térmicamente (AT), las provenientes de Ocuvi (AT-OCU) muestra un valor más elevado de conductividad para el agua (771.03  $\mu\text{mho/cm}$ ). Esto indica una mayor liberación de iones en comparación con las zeolitas de Atuncolla (AT-ATU) y Crucero (AT-CRU), que presentan valores menores con 738.97  $\mu\text{mho/cm}$  y 738.50  $\mu\text{mho/cm}$ , respectivamente. Estas variaciones están relacionadas con diferencias en la composición mineralógica y la estructura cristalina de las zeolitas, factores que afectan su capacidad de intercambio iónico (Calcina-Benique et al., 2022; Quispe Díaz et al., 2022).

Por otro lado, para las zeolitas activadas químicamente (AQ), las de procedencia Crucero (AQ-CRU) presentan la mayor conductividad eléctrica para el agua (812.63  $\mu\text{mho/cm}$ ), superando significativamente a los valores observados para las zeolitas de Ocuvi (AQ-OCU) y Atuncolla (AQ-ATU), con conductividades de 773.50  $\mu\text{mho/cm}$  y 772.63  $\mu\text{mho/cm}$ , respectivamente. Esto indica que la activación química en las zeolitas de Crucero

potencia su capacidad de intercambio iónico, esto debido a la composición mineralógica que permite mayor alteración estructural durante el tratamiento, facilitando la adsorción y liberación de iones en el agua (Burgos et al., 2022; Colmenero-Sujo y Villalba, 2023).

Los resultados observados de conductividad eléctrica del agua después de su tratamiento según el tipo de activación y el origen de las zeolitas, todos los valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido para agua potable (1500  $\mu\text{mho/cm}$ ) de acuerdo con la normativa del Ministerio de Salud del Perú (MINSA, 2011). Esto indica que el agua tratada con estas zeolitas es apta para el consumo humano, lo que respalda la viabilidad de utilizar zeolitas activadas térmicamente o químicamente en el tratamiento del agua, especialmente en procesos donde se requiere un control adecuado de la conductividad y calidad del agua.

#### **4.5. Turbiedad del agua después del tratamiento**

Los resultados muestran que tanto las zeolitas activadas químicamente como térmicamente presentan valores de turbidez similares (Tabla 4), con 0.49 UNT para AQ y 0.53 UNT para AT. Estos valores indican que ambos tipos de activación tienen una eficacia comparable en la reducción de la turbidez del agua subterránea. Según otros estudios, se describen que la activación química y térmica mejoran las propiedades de adsorción de las zeolitas, lo que contribuye a la reducción de la turbidez al adsorber las partículas suspendidas (Asere et al., 2019; Burgos et al., 2022).

La Figura 7, muestra diferencias significativas en los valores de turbidez para el agua tratada según el tipo de activación y la procedencia geológica de las zeolitas. Para las zeolitas activadas químicamente (AQ), las zeolitas provenientes de Crucero (AQ-CRU) presentan la turbidez más baja para el agua (0.41 UNT), lo que indica una mayor capacidad para remover partículas en suspensión en comparación con las zeolitas de Atuncolla (AQ-

ATU), que muestran un valor más alto (0.57 UNT), aunque sin diferencias significativas respecto a las de Ocuvi (AQ-OCU) (0.48 UNT). Esto indica que las zeolitas de Crucero tienen una mayor capacidad para adsorber las partículas suspendidas, lo que podría estar relacionado con su mayor proporción de sitios activos y composición mineralógica específica que favorece la adsorción (Chambilla & Allcca, 2022; Costafreda et al., 2018).

Por otro lado, para las zeolitas activadas térmicamente (AT), las zeolitas de Crucero (AT-CRU) también muestran la mejor capacidad de reducción de turbidez en el agua (0.34 UNT), la cual se indica que la activación térmica mejora la eficiencia de las zeolitas en la remoción de partículas. Las zeolitas de Atuncolla (AT-ATU), presentan un valor más alto de turbidez (0.73 UNT), seguido por las de Ocuvi (AT-OCU) con 0.50 UNT, por tanto, se puede manifestar que el tipo de activación, combinado con las características geológicas, afecta la capacidad de las zeolitas para eliminar partículas suspendidas. Estos resultados son consistentes con estudios que han demostrado que la activación térmica puede mejorar las propiedades de adsorción de las zeolitas al modificar su estructura superficial, aunque la capacidad de adsorción puede variar según la composición mineralógica de las zeolitas (Quispe Díaz et al., 2022; Šiljeg et al., 2012).

Según los resultados obtenidos, los valores de turbidez se encuentran por debajo del límite máximo permitido de 5 UNT, según la normativa del Ministerio de Salud de Perú (MINSA, 2011), lo que indica que el agua tratada con zeolitas activadas químicamente o térmicamente es adecuada para el consumo humano. Esto subraya el potencial de las zeolitas, tanto en su forma química como térmica, como una opción viable para el tratamiento de agua en aplicaciones de purificación, especialmente en contextos donde se requiere una mejora de la calidad del agua sin exceder los límites de turbidez establecidos por las autoridades sanitarias.

#### **4.6. Niveles de arsénico del agua después del tratamiento en columna de lecho empacado de zeolitas**

Los niveles de arsénico en el agua después del tratamiento con una columna de lecho empacado de zeolitas se muestran en la Tabla 5. Se observa que las zeolitas activadas térmicamente (AT) presentan una mayor eficacia en la remoción de arsénico, alcanzando una concentración de 0.006 mg/L, mientras que las zeolitas activadas químicamente (AQ) logran reducir la concentración a 0.008 mg/L. Este comportamiento sugiere que la activación térmica potencia las propiedades adsorbentes de las zeolitas, probablemente debido a la modificación de su estructura superficial y la mejora en la distribución de los sitios activos, lo que favorece la captura del arsénico presente en el agua. Estos resultados coinciden con estudios previos donde se ha demostrado que la modificación térmica aumenta la capacidad de adsorción de las zeolitas para metales pesados, como el arsénico (Asere et al., 2019; Burgos et al., 2022).

Ambos tratamientos (AQ y AT) mostraron eficiencia en la remoción del arsénico en el agua subterránea, ya que las concentraciones de arsénico obtenidas son inferiores al límite máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable, que es de 0.01 mg/L (MINSAs, 2011). Este hallazgo resalta el potencial de las zeolitas como adsorbentes en la remoción de contaminantes peligrosos en el tratamiento de agua. La activación térmica y química de las zeolitas permite reducir la concentración de arsénico a niveles seguros para el consumo humano, lo que es importante para su implementación en sistemas de purificación de agua, como se ha señalado en estudios de zeolitas naturales aplicadas a la remoción de arsénico (Bilici Baskan y Pala, 2011; Mayta et al., 2022).

La Figura 8, muestra variaciones en los niveles de arsénico según el tipo de activación y la procedencia geológica de las zeolitas. Para las zeolitas activadas térmicamente (AT), las de Crucero (AT-CRU) presentaron la concentración más baja de arsénico en el agua (0.0034 mg/L), lo que indica una mayor eficiencia en la remoción de este contaminante. Este resultado puede atribuirse a la mayor capacidad de intercambio iónico y mayor área superficial de las zeolitas de Crucero, lo que favorece la adsorción del arsénico de acuerdo con lo señalado por Costafreda et al. (2018); Hernández et al. (2010). Por otro lado, las zeolitas de Atuncolla (AT-ATU) y Ocuvi (AT-OCU) presentaron concentraciones más altas de arsénico en el agua con 0.0056 mg/L y 0.0100 mg/L, respectivamente.

Además, las zeolitas de Atuncolla y Ocuvi, que son de tipo clinoptilolita-Ca, presentan una estructura que, si bien permite la remoción de arsénico, no es tan eficiente como la zeolita clinoptilolita-K de Crucero, lo que puede estar relacionado con diferencias en la estructura mineralógica y la composición iónica de las zeolitas de cada región (Burgos et al., 2022; Yeo et al., 2021). Según los hallazgos de Chambilla y Allcca (2022) y Quispe et al. (2022), el tipo de clinoptilolita influye en la capacidad de intercambio iónico, lo que determina su eficiencia en la remoción de arsénico. La variabilidad observada entre las zeolitas de diferentes fuentes refleja la importancia de elegir zeolitas específicas en función de la calidad del agua a tratar y la concentración de contaminantes presentes.

En cuanto a las zeolitas activadas químicamente (AQ), las de Crucero (AQ-CRU) mostraron la mayor remoción de arsénico en el agua, alcanzando una concentración de 0.0045 mg/L, lo que puede estar relacionado con los cambios estructurales inducidos por los tratamientos químicos, los cuales pueden mejorar la accesibilidad de los sitios activos en las zeolitas, como se ha observado en investigaciones de Šiljeg et al. (2012). Este tipo de activación modifica la superficie de las zeolitas, aumentando su capacidad de adsorción

y haciendo que se desempeñen de manera más eficiente en la captura del arsénico. Estos resultados confirman la eficacia de las zeolitas modificadas químicamente para la remoción de arsénico en agua, tal como se ha documentado en varios estudios (Bilici Baskan y Pala, 2011; de Gennaro et al., 2020).

Según los resultados, las concentraciones de arsénico se encuentran por debajo del límite permisible de 0.01 mg/L establecido por la normativa del Ministerio de Salud de Perú (MINSA, 2011). Esto confirma que, independientemente del tipo de activación o la procedencia de las zeolitas, los tratamientos realizados son adecuados para reducir la concentración de arsénico a niveles seguros para el consumo humano.

## 5. CONCLUSIONES

El agua subterránea de Juliaca presenta niveles críticos de arsénico (0.3043 mg/L), excediendo los límites normativos, aunque parámetros como turbidez, conductividad y pH están dentro de lo permitido. El pretratamiento solar para oxidar  $As^{3+}$  a  $As^{5+}$  se demuestra como una estrategia sostenible y efectiva para facilitar su posterior adsorción.

Por otro lado, la composición mineralógica de las zeolitas de Ocuvi, Atuncolla y Crucero revela su potencial para aplicaciones de adsorción e intercambio iónico. En particular, las zeolitas de Crucero, ricas en clinoptilolita-K, destacan por su capacidad superior de remoción de arsénico, mientras que las de Ocuvi y Atuncolla, con clinoptilolita-Ca, también presentan buena eficacia, aunque en menor medida. Además, tanto la activación térmica como la química optimizan las propiedades adsorbentes de estas zeolitas, aumentando su eficacia en los procesos de purificación de agua.

Asimismo, el tratamiento con zeolitas activadas químicamente y térmicamente mantiene el pH del agua dentro del rango permisible (6.5–8.5), con valores más altos en las zeolitas activadas térmicamente. Este incremento en el pH favorece la adsorción de arsénico y otros contaminantes, lo que resalta la influencia de la procedencia geológica y del tipo de activación en la modificación de este parámetro. En este sentido, las zeolitas de Crucero activadas térmicamente (AT-CRU) alcanzaron el mayor valor de pH, indicando su potencial en procesos de tratamiento más alcalinos.

En cuanto a la conductividad eléctrica, esta disminuyó significativamente tras el tratamiento con zeolitas activadas térmicamente, mientras que la activación química generó mayores valores debido a la liberación de iones residuales. A pesar de estas diferencias, todas las conductividades permanecieron por debajo del límite permisible (1500  $\mu\text{mho/cm}$ ), garantizando la potabilidad del agua tratada. Cabe destacar que las zeolitas de Crucero activadas químicamente presentaron la mayor conductividad, lo que refleja su alta capacidad de intercambio iónico.

Por su parte, la turbidez del agua tratada con zeolitas activadas químicamente y térmicamente disminuyó considerablemente, alcanzando valores muy por debajo del límite máximo permitido (5 UNT). En este aspecto, las zeolitas de Crucero, especialmente las activadas térmicamente, fueron las más eficaces en la remoción de partículas suspendidas. Este comportamiento se atribuye a su composición mineralógica y mayor proporción de sitios activos, lo que confirma la idoneidad de estas zeolitas para mejorar la claridad del agua en procesos de purificación.

Asimismo, el tratamiento con columnas de lecho empacado de zeolitas activadas térmicamente redujo la concentración de arsénico hasta 0.006 mg/L, siendo más eficiente que las activadas químicamente (0.008 mg/L). Todas las concentraciones finales estuvieron por debajo del límite permisible de 0.01 mg/L, asegurando la seguridad del agua para

consumo humano. De manera destacada, las zeolitas de Crucero activadas térmicamente mostraron el mejor rendimiento en la remoción de arsénico, lo que subraya la influencia de la procedencia geológica y del tipo de activación en la eficiencia del tratamiento.

Finalmente, el uso de zeolitas naturales activadas térmicamente o químicamente constituye una estrategia eficiente y sostenible para la remoción de arsénico en agua subterránea contaminada, cumpliendo con los estándares de calidad para consumo humano. Las zeolitas activadas térmicamente (AT) demostraron un mejor desempeño general, destacándose en la reducción de conductividad eléctrica (749.5  $\mu\text{mho/cm}$ ) y arsénico (0.006 mg/L), en comparación con las activadas químicamente (AQ), que alcanzaron 786.26  $\mu\text{mho/cm}$  y 0.008 mg/L, respectivamente. En particular, las zeolitas de Crucero mostraron la mayor eficacia en la remoción de turbidez (0.34 UNT) y arsénico (0.0034 mg/L), independientemente del tipo de activación. Todos los parámetros evaluados se mantuvieron dentro de los límites permisibles para agua potable, lo que resalta la idoneidad de las zeolitas, especialmente las de Crucero, como material clave para mejorar la calidad del agua en Juliaca y otras regiones con problemas similares de contaminación.

## 6. REFERENCIAS

- Asere, T. G., Stevens, C. V., y Du Laing, G. (2019). Use of (modified) natural adsorbents for arsenic remediation: A review. En *Science of the Total Environment* (Vol. 676, pp. 706-720). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.237>
- Bilici Baskan, M., y Pala, A. (2011). Removal of arsenic from drinking water using modified natural zeolite. *Desalination*, 281(1), 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.015>
- Burgos, H., Gárfias, J., Martel, R., y Salas, J. (2022). Remoción de arsénico (V) utilizando zeolita natural: pruebas de columna de lecho fijo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(3), 174-241. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-03-05>
- Calcina-Benique, M. E., Calcina-Rondán, L. E., Huaraya-Chambi, F. R., Salas-Camargo, A. R., y Tejada-Meza, K. (2022). Arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame y su impacto en suelos agrícolas en Desaguadero, Puno – Perú. *DYNA (Colombia)*, 89(221), 178-184. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.98319>
- Chambilla, D. S., y Allcca, E. E. (2022). *Efecto de hierro y ph en el método soras sobre la remoción de arsénico del agua obtenida en la captación del centro poblado Tolapalca, distrito de Ichuña, región Moquegua, 2019*. Universidad José Carlos Mariategui.
- Colmenero-Sujo, L. H., y Villalba, M. de L. (2023). Remoción de arsénico en agua con zeolitas naturales provenientes del norte y centro de México. *TECNOCIENCIACHIHUAHUA*, 17(3), e1261. <https://doi.org/10.54167/tch.v17i3.1261>
- Costafreda, J. L., Martín, D. A., Rosell, M. B., y Costafreda, J. L. (2018). Las zeolitas naturales de Cuba. *Las zeolitas naturales en los países de iberoamérica*, 1-26.

- Costafreda Mustelier, J. L., Martín Sánchez, D. A., Rosell Lam, M., y Costafreda Velázquez, J. L. (2018). Las zeolitas naturales de Cuba. En *Las zeolitas naturales en los países de iberoamérica* (pp. 190-215).
- de Gennaro, B., Aprea, P., Liguori, B., Galzerano, B., Peluso, A., y Caputo, D. (2020). Zeolite-rich composite materials for environmental remediation: Arsenic removal from water. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(19), 1-20.  
<https://doi.org/10.3390/app10196939>
- Francisca, F. M., y Carro, M. E. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2), 177-190.
- Frazao-Ndumba, M., y Coello-velázquez, A. L. (2007). Caracterización mineralógica de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes para su beneficio por molienda diferencial. *Minería y Geología ISSN:*, 23(4), 1-18.
- Fu, H.-Y., Cheng, G.-W., Xu, Z.-H., Jiang, C.-C., Ye, Q.-W., y Zhang, L.-H. (2012). Experimental research of ammonia nitrogen in micro-polluted water by zeolite with enhanced coagulation. *Proceedings - 2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, CDCIEM 2012*, 312-315.  
<https://doi.org/10.1109/CDCIEM.2012.80>
- García, A., Rodríguez, B., Quintero, Y., Montserrat, S., y Cardemil, J. (2020). Arsenic removal technology from water based on nanomaterials and sunlight. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019*, 2351-2357.  
<https://doi.org/10.18086/swc.2019.47.01>
- Guerra-González, Y., Crespo-Caballero, M., Guardiola-Romero, R. L., y Leyva-Rodríguez, C. A. Almenares-Reyes, R. S. (2021). Influencia de la temperatura y tiempo de

- activación térmica en la solubilidad alcalina de las zeolitas del yacimiento Caimanes. *Tecnología Química*, 41(3), 638-657.
- Hernández, M. A., Rojas, F., Lara, V. H., Portillo, R., Castelán, R., Pérez, G., y Salas, R. (2010). Estructura porosa y propiedades estructurales de mordenita y clinoptilolita. *Superficies y vacío ISSN:*, 23, 51-56.
- Jeon, C.-S., Baek, K., Park, J.-K., Oh, Y.-K., y Lee, S.-D. (2009). Adsorption characteristics of As(V) on iron-coated zeolite. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 804-808. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.052>
- John, B., y Das, S. (2020). Role of Electrical Conductivity on Salinity and Mineralization due to Groundwater Level Fluctuations in Kolkata City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 505(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012021>
- Ma, L., Cai, D., y Tu, S. (2020). Arsenite simultaneous sorption and oxidation by natural ferruginous manganese ores with various ratios of Mn/Fe. *Chemical Engineering Journal*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123040>
- Mayta, A., Canchanya, Y., Bendezú, Y., y Ramos, J. A. (2022). *Remoción de arsénico mediante zeolita tipo 5A en agua de consumo humano de la fuente de captación de Quero, Jauja, Junín*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- MINSA. (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *D.S N° 031-2010-SA*.
- Mora-Bueno, D., Sánchez-Peña, L. del C., del Razo, L. M., González-Arias, C. A., Medina-Díaz, I. M., Robledo-Marengo, M. de L., y Rojas-García, A. E. (2012). Presencia de arsénico y coliformes en agua potable del municipio de Tecuala, Nayarit, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 28(2), 127-135.

- Morante, F., Ramos, V., Montalván, J., y Guerrero, J. (2005). Obtención de zeolita sintética clinoptilolita en condiciones de laboratorio. *Revista Tecnológica ESPOL*, 18(1), 113-118.
- Narváez, D. A., y Santes, V. F. (2009). *Evaluación de zeolitas sintetizadas a partir de residuos de carbón, en la remoción de arsénico en agua para consumo humano. Estudio de caso: Zimapán, Hidalgo*. Instituto Politécnico Nacional.
- Palomino, A. A., Tipismana, P. A., y Cano, F. (2022). *Estudio para la remoción de arsénico en el tratamiento de distintos tipos de aguas con el empleo de zeolitas naturales*.
- Peralta, E. (2021). *Remoción de Arsénico (As) aplicando cáscara de arroz modificado químicamente, de las aguas superficiales de la comunidad de Upina, Carabaya-Puno*. Universidad Nacional de Juliaca.
- Quispe Díaz, I. K., Ccama Vilca, J. W., Turpo Turpo, R. E., Vigo Rivera, J. E., Lozada Vilca, R. A., Argota Pérez, G., y Prada Vega, S. P. L. (2022). Ingeniería de tratamiento para la filtración y remoción del arsénico en las aguas subterráneas mediante zeolitas naturales. *Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres*, 27(33), 43-56.  
<https://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista33/articulo3.pdf>
- Revelli, G. R., Seuchuc, M. T., Tonutti, F. G., y Costa, G. V. (2014). Método Económico De Remoción De Arsénico En Aguas Para Comunidades Rurales. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 7(3), 228-242.
- Roziková, M., Vičarová, M., Thirstrup, C., Dumaňska, J., Gonzaga, F. B., da Cruz Cunha, K., Galli, A., Stoica, D., WANG, H., Seitz, S., Haraldsson, C., y Smirnov, A. (2020). Electrolytic conductivity at pure water level final report. *Metrologia*, 58(1 A).  
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/58/1A/08001>

- Ryu, J., Monllor-Satoca, D., Kim, D.-H., Yeo, J., y Choi, W. (2013). Photooxidation of arsenite under 254 nm irradiation with a quantum yield higher than unity. *Environmental Science and Technology*, 47(16), 9381-9387.  
<https://doi.org/10.1021/es402011g>
- Sharma, V. K., & Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment International*, 35(4), 743-759.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.01.005>
- Šiljeg, M., Foglar, L., y Gudelj, I. (2012). The removal of arsenic from water with natural and modified clinoptilolite. *Chemistry and Ecology*, 28(1), 75-87.  
<https://doi.org/10.1080/02757540.2011.619531>
- Tapia, J., Murray, J., Ormachea, M., Tirado, N., y Nordstrom, D. K. (2019). Origin, distribution, and geochemistry of arsenic in the Altiplano-Puna plateau of Argentina, Bolivia, Chile, and Perú. *Science of the Total Environment*, 678, 309-325.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.084>
- Thirunavukkarasu, O. S., Viraraghavan, T., Subramanian, K. S., Chaalal, O., y Islam, M. R. (2005). Arsenic removal in drinking water - Impacts and novel removal technologies. *Energy Sources*, 27(1-2), 209-219.  
<https://doi.org/10.1080/00908310490448271>
- Yeo, K. F. H., Li, C., Zhang, H., Chen, J., Wang, W., y Dong, Y. (2021). Arsenic Removal from Contaminated Water Using Natural Adsorbents: A Review. *Coatings*, 11(11), 1-18. <https://doi.org/10.3390/COATINGS11111407>
- Zoroufchi Benis, K., McPhedran, K., y Soltan, J. (2023). Treatment of Aqueous Arsenite Using Modified Biomass-Based Sorbent. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 363 LNCE, 961-976. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-34593-7\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-031-34593-7_61)

## 7. ANEXOS

### Anexo A. Evidencias de sumisión

17/11/24, 22:27

Gmail - [tca] Acuse de recibido coautor(es)



Idler Huaman Huisa <idlerhh2015@gmail.com>

#### [tca] Acuse de recibido coautor(es)

1 mensaje

Helena Rivas López <tyca.ojs@gmail.com>

17 de noviembre de 2024, 21:50

Para: Huaman-Huisa <idlerhh2015@gmail.com>, Humpire-Mamani <josue.humpire@upeu.edu.pe>

Estimado(a):

Hola Juan Eduardo Vigo Rivera a enviado el manuscrito, "Remoción de arsénico con zeolitas activadas del altiplano peruano en aguas de consumo humano: Removal of arsenic with activated zeolites from the Peruvian highlands in waters for human consumption" a Tecnología y ciencias del agua.

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Helena Rivas López

-----  
En cumplimiento con la Ley General de Protección de Datos Personales en Posesión de Sujetos Obligados, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con domicilio en Paseo Cuauhnáhuac número 8532, Col. Progreso, C.P. 62550 Jiutepec, Morelos, es el responsable del tratamiento de los datos personales que nos proporcione de carácter personal a través de este medio; dichos datos serán protegidos conforme a lo dispuesto por la citada Ley y demás normatividad que resulte aplicable. Se entiende el consentimiento expreso del titular de los datos personales para utilizarlos en actividades propias de su objeto social como lo es la revista *Tecnología y ciencias del agua*. Para mayor información, lo invitamos a consultar el Aviso de Privacidad en nuestro portal <https://www.gob.mx/imta/acciones-y-programas/avisos-de-privacidad-del-imta>

## Anexo B. Resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato articulo.



“AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO”

RESOLUCIÓN N° 0794-2024/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 22 de octubre de 2024

### VISTO:

El expediente de **Idler Adolf Huaman Huisa**, identificado(a) con código universitario N° 201520889 y **Josue Enrique Humpire Mamani**, identificado(a) con código universitario N° 201712503, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

### CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la designación del Comité Dictaminador del proyecto de tesis;

Que **Idler Adolf Huaman Huisa** y **Josue Enrique Humpire Mamani**, han concluido el desarrollo de la tesis en formato articulo y con la opinión favorable de su asesor, solicitan la designación del Comité Dictaminador respectivo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 22 de octubre de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

### SE RESUELVE:

Designar el Comité Dictaminador encargado de administrar el proceso de dictamen correspondiente a la tesis en formato articulo, titulada “Remoción de arsénico con zeolitas activadas del altiplano peruano en aguas de consumo humano”, presentado por **Idler Adolf Huaman Huisa** y **Josue Enrique Humpire Mamani**, otorgándoles un plazo máximo de diez (10) hábiles, posterior a la fecha de recepción de la presente resolución, para emitir el dictamen respectivo a través de la plataforma oficial.

Dictaminador 1: Ing. Veronika Haydeé Pari Mamani  
Dictaminador 2: Mg. Franklyn Elard Zapana Yucra

Regístrese, comuníquese y archívese.



  
Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
DECANA



  
Ph.D. Silvia Pilco Quesada  
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:  
-Interesado  
-Jurado (02)  
-Archivo



“AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA  
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO”

RESOLUCIÓN N° 0878-2024/UPeU-FIA-CF

Lima, Ñaña, 19 de noviembre de 2024

**VISTO:**

El expediente de los (las) bachilleres **Idler Adolf Huaman Huisa** identificado(a) con código universitario N° 201520889 y **Josue Enrique Humpire Mamani** identificado(a) con código universitario N° 201712503, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

**CONSIDERANDO:**

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Remoción de arsénico con zeolitas activadas del altiplano peruano en aguas de consumo humano", presentado por los (las) bachilleres **Idler Adolf Huaman Huisa** y **Josue Enrique Humpire Mamani**, reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 19 de noviembre de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

**SE RESUELVE:**

1. Declarar expedito a los (las) bachilleres **Idler Adolf Huaman Huisa** y **Josue Enrique Humpire Mamani**, para que sustenten la tesis en formato artículo titulada "Remoción de arsénico con zeolitas activadas del altiplano peruano en aguas de consumo humano", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental, el 02 de diciembre, a las 10:00 horas, en el Auditorio Pedro Kalbermatter.
2. Designar el Jurado de Sustentación, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: MSc. Miguel Angel Salcedo Enriquez  
Secretario: MSc. Loayda Abigail Condori Turpo  
Asesor: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera  
Vocal 1: Ing. Veronika Haydeé Pari Mamani  
Vocal 2: MSc. Franklin Elard Zapana Yuca

Regístrese, comuníquese y archívese.



  
Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
DECANA



  
Ph.D. Silvia Pilco Quesada  
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:  
-Interesado  
-Jurado (04)  
-Secretaría General  
-Archivo

## Anexo C. Análisis de Laboratorio



**UNIVERSIDAD PERUANA UNION**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL**  
 Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquiani, Autopista Héroes de la Guerra del Pacifico

### ANALISIS DE AGUA

Solicitante: Idler Adolf Huaman Huisa

Josue Enrique Humpire Mamani

Análisis: Agua

Fecha de extracción: 06/09/2024

Fecha de recepción: 06/09/2024

Condiciones de llegada: Buenas

Extraídas por: El solicitante

Lugar de muestreo: Autopista Héroes de la guerra del pacifico KM. 8

Muestra conservada: Sí

PH					
QUIMICO	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
MUESTRA			PH-F1	PH-F2	PH-F3
1		Método Electrométrico	7.2	7.2	7.4
2		Método Electrométrico	7.6	7.4	7.4
3		Método Electrométrico	7.8	7.4	7.8
4		Método Electrométrico	7.9	7.3	7.7
5		Método Electrométrico	7.9	7.7	7.8
6		Método Electrométrico	8.0	7.6	7.6
7		Método Electrométrico	8.0	7.6	7.6
8		Método Electrométrico	7.9	7.7	7.8
9		Método Electrométrico	7.9	7.7	7.8
10		Método Electrométrico	7.8	7.6	7.8

PH					
TERMICO	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
MUESTRA			PH-F1	PH-F2	PH-F3
1		Método Electrométrico	7.5	7.7	8.0
2		Método Electrométrico	8.1	7.7	8.0
3		Método Electrométrico	8.3	8.0	8.0
4		Método Electrométrico	8.0	8.1	8.1
5		Método Electrométrico	8.0	8.1	8.0
6		Método Electrométrico	7.8	8.0	8.1
7		Método Electrométrico	7.9	8.1	8.3
8		Método Electrométrico	7.9	8.1	8.1
9		Método Electrométrico	7.9	8.2	8.2
10		Método Electrométrico	7.7	8.2	8.3

**ADVERTENCIA:**

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 27/09/2024

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.



**UNIVERSIDAD PERUANA UNION**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL**  
 Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunqui, Autopista Héroes de la Guerra del Pacifico

**ANALISIS DE AGUA**

Solicitante: Idler Adolf Huaman Huisa  
 Josue Enrique Humpire Mamani

Análisis: Agua

Fecha de extracción: 06/09/2024      Fecha de recepción: 06/09/2024

Condiciones de llegada: Buenas      Extraídas por: El solicitante

Lugar de muestreo: Autopista Héroes de la guerra del pacifico KM. 8

Muestra conservada: Sí

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA					
QUIMICO MUESTRA	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
			C.E-F1	C.E-F2	C.E-F3
1	µS/cm	Método Electrométrico	731	690	787
2	µS/cm	Método Electrométrico	766	730	818
3	µS/cm	Método Electrométrico	777	742	817
4	µS/cm	Método Electrométrico	780	747	828
5	µS/cm	Método Electrométrico	777	754	809
6	µS/cm	Método Electrométrico	776	775	808
7	µS/cm	Método Electrométrico	774	802	805
8	µS/cm	Método Electrométrico	784	811	819
9	µS/cm	Método Electrométrico	785	835	819
10	µS/cm	Método Electrométrico	785	840	816

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA					
TERMICO MUESTRA	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
			C.E-F1	C.E-F2	C.E-F3
1	µS/cm	Método Electrométrico	812	750	745
2	µS/cm	Método Electrométrico	804	739	740
3	µS/cm	Método Electrométrico	773	734	723
4	µS/cm	Método Electrométrico	772	727	721
5	µS/cm	Método Electrométrico	749	739	731
6	µS/cm	Método Electrométrico	761	730	744
7	µS/cm	Método Electrométrico	760	742	745
8	µS/cm	Método Electrométrico	760	743	746
9	µS/cm	Método Electrométrico	762	741	746
10	µS/cm	Método Electrométrico	757	744	743

**ADVERTENCIA:**

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

**FECHA:** 27/09/2024

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.



**UNIVERSIDAD PERUANA UNION**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL**  
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquián, Autopista Héroes de la Guerra del Pacifico

**ANALISIS DE AGUA**

Solicitante: Idler Adolf Huaman Huisa

Josue Enrique Humpire Mamani

Análisis: Agua

Fecha de extracción: 06/09/2024

Fecha de recepción: 06/09/2024

Condiciones de llegada: Buenas

Extraídas por: El solicitante

Lugar de muestreo: Autopista Héroes de la guerra del pacifico KM. 8

Muestra conservada: Sí

TURBIEDAD					
QUIMICO MUESTRA	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
			TURB-F1	TURB-F2	TURB-F3
1	NTU	nefelometría	0.76	1.64	0.77
2	NTU	nefelometría	0.40	0.76	0.55
3	NTU	nefelometría	0.39	0.61	0.44
4	NTU	nefelometría	0.32	0.80	0.51
5	NTU	nefelometría	0.50	0.64	0.38
6	NTU	nefelometría	0.51	0.24	0.35
7	NTU	nefelometría	0.67	0.28	0.26
8	NTU	nefelometría	0.43	0.24	0.30
9	NTU	nefelometría	0.36	0.24	0.29
10	NTU	nefelometría	0.47	0.20	0.26

TURBIEDAD					
TERMICO MUESTRA	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
			TURB-F1	TURB-F2	TURB-F3
1	NTU	nefelometría	1.16	2.72	0.72
2	NTU	nefelometría	0.88	0.86	0.33
3	NTU	nefelometría	0.64	0.57	0.29
4	NTU	nefelometría	0.32	0.55	0.25
5	NTU	nefelometría	0.47	0.95	0.48
6	NTU	nefelometría	0.24	0.43	0.31
7	NTU	nefelometría	0.23	0.36	0.26
8	NTU	nefelometría	0.18	0.29	0.30
9	NTU	nefelometría	0.60	0.30	0.27
10	NTU	nefelometría	0.31	0.29	0.20

**ADVERTENCIA:**

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

**FECHA:** 27/09/2024

**Nota:** La firma Institucional avata que el Informe técnico pertenece a la Institución.

**ANALISIS DE AGUA**

Solicitante: Idler Adolf Huaman Huisa  
 Josue Enrique Humpire Mamani

Análisis: Agua

Fecha de extracción: 06/09/2024 Fecha de recepción: 06/09/2024

Condiciones de llegada: Buenas Extraídas por: El solicitante

Lugar de muestreo: Autopista Héroes de la guerra del pacifico KM. 8

Muestra conservada: Sí

ARSENICO					
QUIMICO MUESTRA	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
			ARS-F1	ARS-F2	ARS-F3
1	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0352	0.0119	0.0165
2	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0268	0.0098	0.0129
3	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0179	0.0084	0.0047
4	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0145	0.0066	0.0037
5	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0126	0.0038	0.0033
6	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0060	0.0033	0.0029
7	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0077	0.0047	0.0025
8	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0066	0.0037	0.0014
9	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0027	0.0033	0.0014
10	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0025	0.0029	0.0024

ARSENICO					
TERMICO MUESTRA	Unidad	Método analítico	FILTRO 1-OCU	FILTRO 2-ATU	FILTRO-CRU 3
			ARSE-F1	ARSE-F2	ARSE-F3
1	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0287	0.0079	0.0056
2	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0163	0.0096	0.0033
3	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0133	0.0077	0.0047
4	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0096	0.0048	0.0037
5	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0090	0.0055	0.0033
6	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0076	0.0046	0.0028
7	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0066	0.0036	0.0023
8	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0027	0.0020	0.0021
9	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0028	0.0018	0.0019
10	mg/l	diétil ditiocarbamato de plata	0.0022	0.0023	0.0024

**ADVERTENCIA:**

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 27/09/2024

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.

