

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



**Uso de cal como método económico para el tratamiento de
arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en zonas
altiplánicas**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Martha Huillca Lima
Lourdes Apaza Mamani

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, febrero 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: **“USO DE CAL COMO MÉTODO ECONÓMICO PARA EL TRATAMIENTO DE ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA CONSUMO HUMANO EN ZONAS ALTIPLÁNICOS”** de los autores **Martha Huilca Lima** y **Lourdes Apaza Mamani** tiene un índice de similitud de 2% 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 8 días del mes de junio del año 2024.



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 09 día(s) del mes de febrero del año 2024, siendo las horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing. Enrique Mamani Luela, el (la) secretario(a): Ing. Verónica Naydei Pari Mamani y los demás miembros: Msc. Franklin Elard Zapana y Msc. Soayda Abigail Londeri Zurpa y el (la) asesor(a) Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: Uso de cal como método económico para el tratamiento de arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en zonas altiplánicas

del(los) bachiller(es): a) Martha Huilca Lima
b) Lourdes Apaza Mamani
c)

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

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): Martha Huilca Lima

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

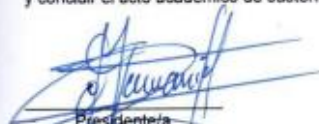
Bachiller (b): Lourdes Apaza Mamani


CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	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.

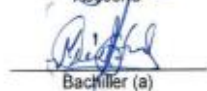


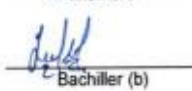
 Presidenta


 Asesor(a)


 Miembro


 Secretario/a


 Miembro


 Bachiller (a)


 Bachiller (b)

 Bachiller (c)

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi mentor y fuente de sabiduría. A mis padres Antonio y Lidia, a mi esposo José y a mi hijo Axel por ser el motor para el logro de esta investigación. De igual manera, extendiendo mi gratitud a los docentes y, en especial, a mi asesor, por su guía y apoyo constante en la realización de este trabajo. Sin ellos, no habría sido posible alcanzar mi tan anhelada meta.

Martha Huilca Lima

A Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza. A mis padres Romulo y Teodora por su amor y apoyo incondicional, y por inspirarme a buscar la excelencia. Agradezco a mi asesor por su valentía y orientación, sin los cuales este logro no habría sido posible. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Lourdes Apaza Mamani

INDICE

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS	9
2.1. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	9
2.2. DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL.....	9
2.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ENSAYOS DE LABORATORIO	11
2.4. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE CAL.....	11
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	11
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA	11
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA CAL CON DIFERENTES CONCENTRACIONES	13
3.3. RESULTADOS DE TURBIEDAD	14
3.4. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE METALES DEL AGUA SUBTERRÁNEA	18
4. CONCLUSIONES	24
5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	26
6. ANEXOS	28

Uso de cal como método económico para el tratamiento de arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en zonas altiplánicas

RESUMEN

La escasez de agua potable ha forzado a muchas comunidades a utilizar aguas subterráneas, algunas de las cuales contienen arsénico en concentraciones peligrosas para la salud. Esta investigación evaluó la eficacia del hidróxido de calcio (cal) en la remoción de arsénico de aguas subterráneas mediante diferentes concentraciones. Los adsorbentes fueron caracterizados con difracción de rayos X y las muestras de agua fueron recolectadas de Central Esquen – Nueva Jerusalén en Juliaca, presentando inicialmente 0.04570 mg/L de arsénico y 66 UNT de turbidez. Se utilizó el test de jarras con agitación rápida a 300 rpm durante 1 minuto y lenta a 40 rpm durante 20 minutos. El diseño experimental fue un arreglo factorial 2A x 2B x 12C con 3 repeticiones, totalizando 144 ensayos. La turbidez fue la variable de respuesta, identificándose cuatro dosis óptimas de cal para la evaluación de metales. Los mejores resultados de remoción de arsénico se obtuvieron con cal (94.03% NaOH) a 15°C, reduciendo el arsénico a 0.00003 mg/L, y a 10°C, reduciéndolo a 0.00040 mg/L. Con cal (97.62% NaOH), las remociones fueron de 0.00027 mg/L a 15°C y 0.00007 mg/L a 10°C. Los resultados demuestran que el hidróxido de calcio es altamente eficaz para la remoción de arsénico en aguas subterráneas de regiones altiplánicas. Además, la concentración de cal y la temperatura reducen significativamente la turbidez del agua, mientras que el tipo de cal no tiene un efecto notable. ANOVA y Tukey muestran que temperaturas de 15°C y concentraciones de cal de 2 y 3.5 mg/L son las más efectivas, resaltando la importancia de optimizar estos parámetros en el tratamiento de aguas residuales. Esta técnica ofrece una solución viable para mejorar la calidad del agua potable, ayudando a mitigar los riesgos para la salud asociados con la contaminación por arsénico en estas áreas.

Palabras clave: remoción de arsénico, hidróxido de calcio, tratamiento de aguas subterráneas, regiones de gran altitud.

Use of lime as an economic method for the treatment of arsenic in groundwater for human consumption in highlands areas

ABSTRACT

The scarcity of potable water has forced many communities to use groundwater, some of which contains arsenic in concentrations hazardous to health. This research evaluated the efficacy of calcium hydroxide (lime) in removing arsenic from groundwater at different concentrations. The adsorbents were characterized by X-ray diffraction, and water samples were collected from Central Esquen – Nueva Jerusalén in Juliaca, initially presenting 0.04570 mg/L of arsenic and 66 NTU of turbidity. The jar test was used with rapid agitation at 300 rpm for 1 minute and slow agitation at 40 rpm for 20 minutes. The experimental design was a factorial arrangement of 2A x 2B x 12C with 3 repetitions, totaling 144 trials. Turbidity was the response variable, identifying four optimal lime doses for metal evaluation. The best arsenic removal results were obtained with lime (94.03% NaOH) at 15°C, reducing arsenic to 0.00027 mg/L, and at 10°C, reducing it to 0.00007 mg/L. With lime (97.62% NaOH), the removals were 0.00003 mg/L at 15°C and 0.00040 mg/L at 10°C. The results demonstrate that calcium hydroxide is highly effective for arsenic removal in groundwater from high-altitude regions. Additionally, lime concentration and temperature significantly reduce water turbidity, while the type of lime shows no notable effect. ANOVA and Tukey tests show that temperatures of 15°C and lime concentrations of 2 and 2.5 mg/L are the most effective, highlighting the importance of optimizing these parameters in wastewater treatment. This technique offers a viable solution to improve drinking water quality, helping to mitigate health risks associated with arsenic contamination in these areas.

Key words: arsenic removal, calcium hydroxide. groundwater treatment, high-altitude regions

1. INTRODUCCIÓN

La creciente escasez de agua potable, impulsada por el aumento de la población y los cambios climáticos, ha llevado a un uso intensivo de aguas subterráneas para la agricultura y el consumo humano (Rodríguez de Robles, 2016). En algunas regiones, estas aguas son el único recurso hídrico disponible, pero a menudo contienen arsénico en concentraciones que superan el Límite Máximo Permisible (LMP) de 0.01 mg/L (10 µg/L) establecido tanto por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) como por la normativa peruana (D.S. N°031-2010-SA) (MINSA, 2010). El arsénico en el agua, incluso en altas concentraciones, no altera el sabor, color u olor del agua, pero representa un grave riesgo para la salud pública (Soto et al., 2013; Martínez y Gasquez, 2005). En aguas subterráneas, el arsénico se encuentra principalmente en las formas de As (III) y As (V).

La alta concentración de arsénico de origen geogénico en aguas subterráneas representa una seria amenaza para la salud humana a nivel global (Guo et al., 2024). Las aguas subterráneas constituyen una fuente vital de agua dulce, ya que representan aproximadamente el 95% del total de los recursos de agua dulce disponibles en la Tierra (Lall et al., 2020). Desde 1958, la OMS destacó los riesgos sanitarios del arsénico en el agua potable, subrayando la necesidad de normas internacionales (Carabantes y Fernicola, 2003). En América, países como Canadá, Estados Unidos, Chile, Perú, Bolivia, México y El Salvador han reportado altas concentraciones de arsénico en el agua potable, abordando el problema de manera parcial o total en distintas áreas (Londoño, 2017). Por ejemplo, en Guanajuato, México, se analizaron 246 pozos y se encontraron concentraciones de 0.30 mg/L de As inorgánico en aguas destinadas para el consumo humano (Ortega-Guerrero, 2009).

El contenido de arsénico en rocas varía significativamente según el tipo y origen geológico. En particular, las rocas volcánicas pueden presentar concentraciones notablemente altas de arsénico. Por ejemplo, se ha reportado que las rocas sedimentarias pueden contener hasta 64 mg/kg de arsénico, mientras que otras muestras de rocas muestran una variación en concentración desde 5.5 hasta 37.3 mg/kg (Mandal y Suzuki, 2002).

En el Perú, la región de Puno presenta uno de los mayores déficits de acceso al agua potable, alcanzando un 71.6%, lo que obliga a gran parte de la población a depender de pozos comunes o tubulares (Defensoría del Pueblo, 2022). Niveles elevados de arsénico se han reportado en las aguas subterráneas de la región, con concentraciones de hasta 0.0735 mg/L en Juliaca (Mamani Navarro, 2019). Estudios adicionales han

confirmado concentraciones superiores al límite máximo permisible en diferentes zonas: salía a Puno (0.068, 0.081, 0.082 mg/L As), salida a Lampa (0.046, 0.057, 0.066, 0.069 mg/L As) y salida a Arequipa (0.001, 0.005, 0.011 mg/L As) (Huaracha Astete y Quispe Flores, 2020). En las urbanizaciones Santa Adriana y Niño San Salvador de Juliaca, los 14 puntos muestreados superan el LMP (Apaza Quispe, 2020). En la asociación de viviendas Nueva Jerusalén, de los 10 pozos monitoreados, ocho superaban los LMP, con valores entre 0.106 y 0.108 mg/L As (Huillca Lima y Apaza Mamani, 2019).

Ante esta situación, es esencial implementar tecnologías accesibles para reducir la concentración de arsénico en el agua subterránea. Este estudio se centra en la eliminación de arsénico mediante el uso de cal, utilizando diferentes concentraciones de hidróxido de calcio en la urbanización Central Esquen, Juliaca, Perú.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Recolección de muestras de aguas subterráneas

En el presente estudio, se obtuvieron muestras de agua subterránea de la urbanización central Esquen-Nueva Jerusalén, localizada en el distrito de Juliaca, región de Puno. Las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo se registraron en el sistema de coordenadas UTM, siendo estas: Este: 374208.45 y Norte: 8284274.80, dentro de la Zona 19L. El procedimiento de muestreo se llevó a cabo conforme a las directrices establecidas de acuerdo al Procedimientos para la toma de muestras, preservación, conservación, transporte, almacenamiento y recepción de agua para consumo humano de la Resolución Directoral N°160-2015-DIGESA-SA (MINSa, 2015). Las muestras recolectadas fueron debidamente acondicionadas y transportadas a las instalaciones del laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión, ubicado en Juliaca, donde fueron almacenadas bajo condiciones controladas para su posterior análisis.

2.2. Diseño estadístico experimental

La investigación experimental se realizó utilizando un arreglo factorial 2A x 2B x 12C con 3 repeticiones por tratamiento, sumando un total de 144 unidades experimentales. Se empleó la tecnología CEPIS para evaluar el proceso de coagulación-floculación-

sedimentación (Canepa de Vargas, 2004), siendo el porcentaje de remoción de la turbiedad la variable dependiente.

Tabla 1

Diseño experimental de un arreglo factorial

Factor A: Porcentaje de Cal	Factor B: temperatura	Factor C: Dosis de reactivos (hidróxido de calcio)
a1: Cal hidratada (97.62% NaOH)	b1: 10 °C	c1: 0.5 g/L; c2: 1.0 g/L; c3: 1.5 g/L; c4: 2.0 g/L; c5: 2.5 g/L; c6: 3.0 g/L; c7: 3.5 g/L; c8: 5.0 g/L; c9: 8.0 g/L, c10: 10.0 g/L, c11: 12.0 g/L, C12: 15.0 g/L
a2: Cal hidratada (94.03% NaOH)	b2: 15°C	

La determinación del porcentaje de remoción de arsénico se llevó a cabo en dos fases. En la primera fase, se establecieron los parámetros óptimos para el proceso de adsorción mediante el uso del test de jarras. Este proceso consideró dos tipos de concentraciones de cal, dos temperaturas (10 y 15°C) y 12 diferentes dosificaciones de las biomásas (c1: 0.5 g/L, c2: 1.0 g/L, c3: 1.5 g/L, c4: 2 g/L, c5: 2.5 g/L, c6: 3 g/L, c7: 3.5 g/L, c8: 5 g/L, c9: 8 g/L, c10: 10 g/L, c11: 12 g/L y c12: 15 g/L).

Para el test de jarras, se utilizaron vasos precipitados de 1L (seis unidades), en los cuales se añadió el adsorbente, hidróxido de calcio al 97.62% y 94.03%, respectivamente, para la remoción de turbidez. La configuración del equipo consistió en una etapa de mezcla rápida a 300 rpm durante 1 minuto, seguida de una etapa de mezcla lenta a 40 rpm durante 20 minutos, finalizando con una sedimentación de 20 minutos, manteniendo constante este procedimiento para ambas temperaturas

Posteriormente, se tomaron muestras de 30 mL para la medición de turbidez utilizando un medidor 2100Q de HACH. Se seleccionaron cuatro tratamientos óptimos, los cuales fueron enviados al laboratorio acreditado junto con una muestra inicial de la misma naturaleza, cada una con un volumen de 100 mL. Es importante destacar que el muestreo se realizó en estricto cumplimiento con la normativa NTP ISO/IEC 17025 y el Protocolo de Monitoreo de Agua, conforme a lo establecido en la Resolución Directoral N° 160-2015-DIGESA-SA. El análisis estadístico de los datos se llevó a cabo utilizando el software estadístico Microsoft Excel 2013, con un nivel de confianza del 95% ($p \leq 0.05$). La ecuación empleada para calcular el porcentaje de remoción de arsénico (R%) fue la siguiente:

$$R(\%) = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} * 100$$

Dónde: “R” es el porcentaje de remoción (%), C_0 es la concentración inicial (mg As/L) y C_f es la concentración final (mg As/L).

2.3. Métodos de análisis de ensayos de laboratorio

Los métodos de análisis de ensayo se aplicaron según normas técnicas nacionales e internacionales.

Tabla 2

Métodos de análisis para calidad de agua y caracterización de cal

Parámetros	Método de análisis
Caracterización de cal	Análisis de difracción de rayos X
Determinación de metales pesados en agua.	Espectrometría de masa (ICP-MS), (SENASA, 2020).
Determinación de turbiedad.	Nefelométrica, NTP 214.006 1999.

2.4. Caracterización fisicoquímica de cal

La caracterización de la cal hidratada se llevó a cabo en un laboratorio certificado por INACAL. Se enviaron 100 g de muestra de cal para su análisis de composición química mineralógica mediante el método de difracción de rayos X (RDX). Este procedimiento permitió examinar la composición química de las biomásas, centrándose en los siguientes parámetros: hidróxido de calcio, carbonato de calcio, silicato de calcio y óxido de calcio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Caracterización de la calidad de agua subterránea

Antes de aplicar los tratamientos con las 12 dosis de hidróxido de calcio, se realizaron análisis de las muestras extraídas de las aguas subterráneas de la Asociación Nueva Jerusalén. Los resultados revelaron una concentración inicial de arsénico de

0.04570 mg/L y una turbidez de 66 UNT, superando los límites máximos permisibles según los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017), como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3

Evaluación Inicial de la Calidad del Agua Subterránea en la Urbanización Central Esquen – Nueva Jerusalén, Juliaca – Puno

Parámetros analizados	Unidad	Valor inicial	D.S. N° 031-2010 S.A.	Organización Mundial de la Salud (WHO 2017)	Norma chilena oficial (NCh409/1)
Turbiedad	UNT	66	5	4	2
Hierro	mg/L	0.02	0.3	0.3	0.3
Manganeso	mg/L	0.43	0.4	0.1	0.1
Aluminio	mg/L	0.1	0.2	0.1	----
Cobre	mg/L	0.006	2	2	2
Zinc	mg/L	0.043	3	3	3
Sodio	mg/L	357.3	200	50	----
Arsénico	mg/L	0.0457	0.01	0.01	0.01
Mercurio	mg/L	<0.0005	0.001	0.006	0.001
Níquel	mg/L	0.0099	0.02	0.07	----
Plomo	mg/L	<0.0002	0.01	0.01	0.05
Cadmio	mg/L	0.00053	0.003	0.003	0.01
Boro	mg/L	7.523	1.5	2.4	----
Bario	mg/L	0.4432	0.7	1.3	----
Cromo	mg/L	0.00088	0.05	0.05	0.05
Selenio	mg/L	0.0001	0.01	0.04	0.01
Molibdeno	mg/L	0.0007	0.07	0.01	0.01
Uranio	mg/L	0.00034	0.015	0.03	----

Nota: La tabla 3 compara los valores iniciales con 2 normas internacionales (WHO, 2017) (Nch 409/1 Norma calidad del agua potable, 2006) y la norma peruana D.S. N° 031- 2010 S.A. (MINSAs, 2011).

Los resultados iniciales indican que la turbiedad del agua subterránea es alta (66 UNT) en comparación con los límites establecidos por las normativas internacionales y nacionales. El contenido de arsénico (0.0457 mg/L) excede los límites permisibles según el D.S. N° 031-2010 S.A., la OMS y la norma chilena (0.01 mg/L). El sodio también presenta

una concentración elevada (357.3 mg/L), muy por encima del límite de 200 mg/L establecido por el D.S. N° 031-2010 S.A. y mucho mayor que el límite de 50 mg/L recomendado por la OMS. Otros parámetros que superan los límites permisibles incluyen manganeso (0.43 mg/L) y boro (7.523 mg/L). Por otro lado, algunos elementos como el hierro (0.02 mg/L), el cobre (0.006 mg/L), y el níquel (0.0099 mg/L) se encuentran dentro de los límites permitidos por todas las normativas consideradas.

3.2. Caracterización de la cal con diferentes concentraciones

Tabla 4

Caracterización de compuestos de cal para tratamiento de agua potable

Componentes	Cal 1	Cal 2
	Hidróxido de calcio	Hidróxido de calcio
Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$	97.62	94.03
Carbonato de calcio (CaCO_3)	2.38	2.96
Silicato de Calcio (Larnita), Ca_2SiO_4	-	3.02

La Tabla 4 presenta una comparación de diferentes compuestos de cal utilizados en el tratamiento de agua para consumo humano, destacando dos tipos específicos: Cal 1 y Cal 2. Se detallan los porcentajes de los principales componentes químicos de cada tipo de cal, incluyendo hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), carbonato de calcio (CaCO_3) y silicato de calcio (Larnita, Ca_2SiO_4). Para Cal 1, se observa un contenido del 97.62% de hidróxido de calcio y un 2.38% de carbonato de calcio. Por otro lado, Cal 2 presenta un 94.03% de hidróxido de calcio, un 2.96% de carbonato de calcio y un 3.02% de silicato de calcio (Larnita). Esta información es crucial para comprender las propiedades y composiciones químicas de diferentes tipos de cal y su efectividad en el tratamiento de agua para asegurar su potabilidad y seguridad para el consumo humano.

El hidróxido de calcio es un agente comúnmente utilizado en el tratamiento de aguas para eliminar contaminantes, como el arsénico. Su alta alcalinidad puede promover la precipitación de compuestos de arsénico insolubles, lo que facilita su remoción por sedimentación o filtración. Además, el hidróxido de calcio tiene la capacidad de elevar el pH del agua, lo que puede favorecer la formación de especies de arsénico menos tóxicas y más fácilmente removibles (Meng et al., 2001; Nurmesniemi et al., 2022).

En cuanto al carbonato de calcio, aunque no es tan efectivo como el hidróxido de calcio para la remoción directa de arsénico, su presencia en la composición de la cal puede tener beneficios adicionales. Por ejemplo, el carbonato de calcio puede actuar como un agente estabilizante del pH, ayudando a mantener condiciones favorables para los procesos de tratamiento posteriores. Además, puede contribuir a la formación de compuestos insolubles de arsénico en condiciones específicas de pH y alcalinidad (Appelo y Postma, 1993).

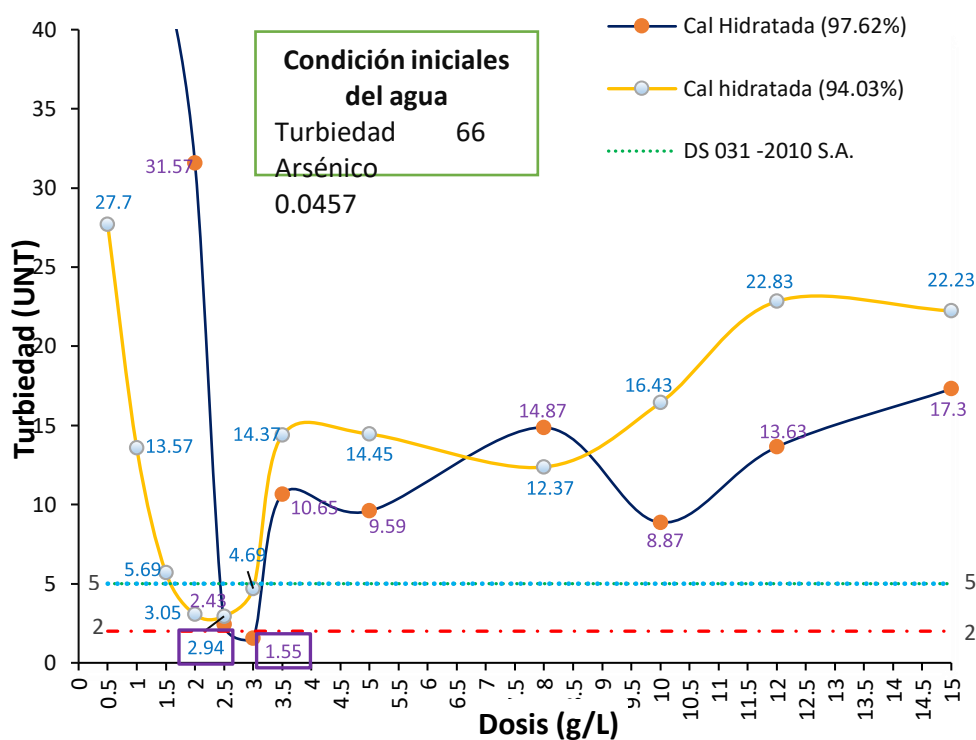
Por último, el silicato de calcio (Larnita) es un componente menos común en las formulaciones de cal para el tratamiento de agua. Sin embargo, su presencia en la Cal 2 puede ofrecer ventajas adicionales en términos de estabilidad y capacidad de adsorción. Los silicatos pueden formar complejos con el arsénico, lo que puede mejorar su remoción en ciertos casos (Nikolaidis et al., 2003). Además, los silicatos pueden, contrariamente a lo que se pensaba, favorecer la eliminación del arsénico (Fang et al., 2021)

3.3. Resultados de turbiedad

La Figura 1 muestra la relación entre la dosis de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y la turbidez residual del agua subterránea contaminada a una temperatura de 10 °C, con una concentración inicial de arsénico de 0.0457 mg/L y una turbidez inicial de 66 UNT. Se comparan dos tipos de cal hidratada: una con una pureza del 97.62% y otra con el 94.03%.

Figura 1

Remoción de turbiedad con cal a temperatura de 10°C

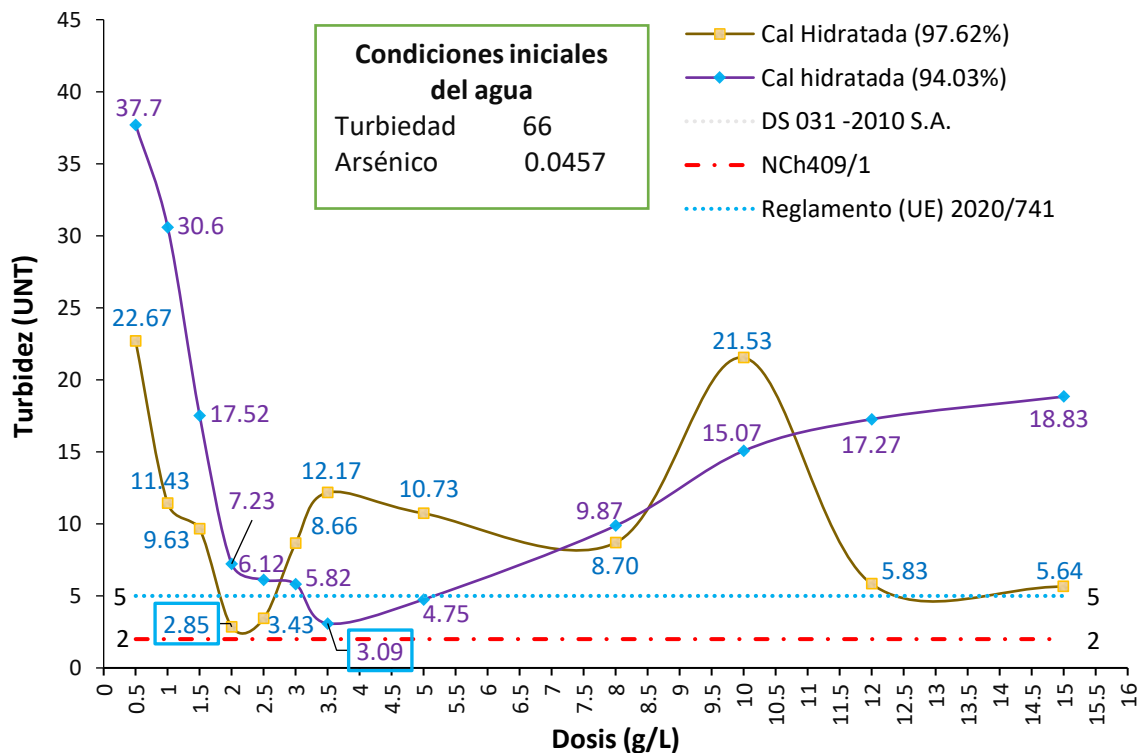


Para la cal hidratada al 97.62%, la reducción más significativa de la turbidez se observa a dosis de 3 g/L, alcanzando un valor de 1.55 UNT, respectivamente. En el caso de la cal hidratada al 94.03%, se lograron reducciones notables de la turbidez a dosis de 2.5, obteniendo un valor de 2.94 UNT, respectivamente. Los resultados indican que ambas cales pueden reducir la turbidez por debajo de los límites establecidos por las normativas DS 031-2010 S.A., NCh409/1 y Reglamento (UE) 2020/741. Sin embargo, la cal al 97.62% muestra una mayor eficacia a dosis más bajas, alcanzando valores mínimos de turbidez más cercanos al umbral permisible. Este fenómeno se puede atribuir a la presencia de silicatos en la cal de menor pureza, que pueden favorecer la floculación y sedimentación de partículas, incluyendo el arsénico.

La Figura 2 muestra la relación entre la dosis de cal (en g/L) y la turbidez (en UNT) del agua tratada con dos tipos de cal: cal hidratada al 97.62% y cal hidratada al 94.03% a 15 °C. Las condiciones iniciales del agua presentan una turbidez de 66 UNT y una concentración de arsénico de 0.0457 mg/L.

Figura 2

Remoción de turbiedad con cal a temperatura de 15°C



La figura 3 muestra la variación de la turbidez del agua a 15°C en función de diferentes dosis de cal hidratada (97.62% y 94.03%) y su cumplimiento con los estándares de turbidez establecidos por diferentes normativas (DS 031-2010 S.A., NCh409/1 y Reglamento (UE) 2020/741). Se observa que, al incrementar la dosis de cal hidratada, la turbidez del agua disminuye notablemente, alcanzando dosis óptimas de 2 g/L para Cal 97.62% y 3.5 g/Cal para 94.03% L, donde la turbidez se reduce por debajo de los 5 UNT, cumpliendo con los estándares de calidad del agua para consumo humano. En particular, la cal hidratada al 94.03% logra una reducción más consistente de la turbidez en comparación con la cal al 97.62%, alcanzando valores mínimos de 3.09 UNT y 2.85 UNT respectivamente, a dosis de 2 y 3.5 g/L. Con las dosis óptimas para ambas cales se cumple con el Reglamento (UE) 2020/741, y el DS. 031-2010 SA que establece una turbidez máxima de 5 UNT.

Tabla 5*Análisis de Varianza multifactorial*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de Cal	1	272	271.98	2.79	0.097
Temperaturas	1	1746.5	1746.54	17.91	0.000
Concentración de cal (mg/L)	11	13774.1	1252.19	12.84	0.000
Error	130	12680	97.54		
Total	143	28472.7			

El análisis de varianza se utilizó para determinar si los factores "Tipo de Cal", "Temperaturas" y "Concentración de cal (mg/L)" tienen un efecto significativo en la turbidez del agua. Los resultados más relevantes son los siguientes: para el tipo de cal, se obtuvo un valor F de 2.79 y un valor p de 0.097, lo que indica que el tipo de cal no tiene un efecto significativo en la turbidez del agua, dado que el valor p es mayor que el nivel de significancia comúnmente usado (0.05). En cuanto a las temperaturas, se obtuvo un valor F de 17.91 y un valor p de 0.000, demostrando que la temperatura tiene un efecto significativo en la turbidez del agua, ya que el valor p es menor que 0.05. Por último, para la concentración de cal (mg/L), se obtuvo un valor F de 12.84 y un valor p de 0.000, indicando que la concentración de cal también tiene un efecto significativo en la turbidez del agua.

Tabla 6*Comparaciones por parejas de Tukey a 95%*

Tipo de Cal	N	Media	Agrupación			
1 (97.62% NaOH)	72	16.6728	A			
2 (94.03% NaOH)	72	13.9242	A			
Temperaturas	N	Media	Agrupación			
1 (10 °C)	72	18.7811	A			
2 (15 °C)	72	11.8158	B			
Concentración de cal (mg/L)	N	Media	Agrupación			
0.5	12	42.16	A			
1	12	24.68	B			
1.5	12	18.90	B C			
15	12	16.00	B C D			
10	12	15.48	B C D			
12	12	14.89	B C D			
8	12	11.45	B C D			
2	12	11.17	C D			
3.5	12	10.07	C D			

5	12	9.88	C	D
3	12	5.18		D
2.5	12	3.73		D

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

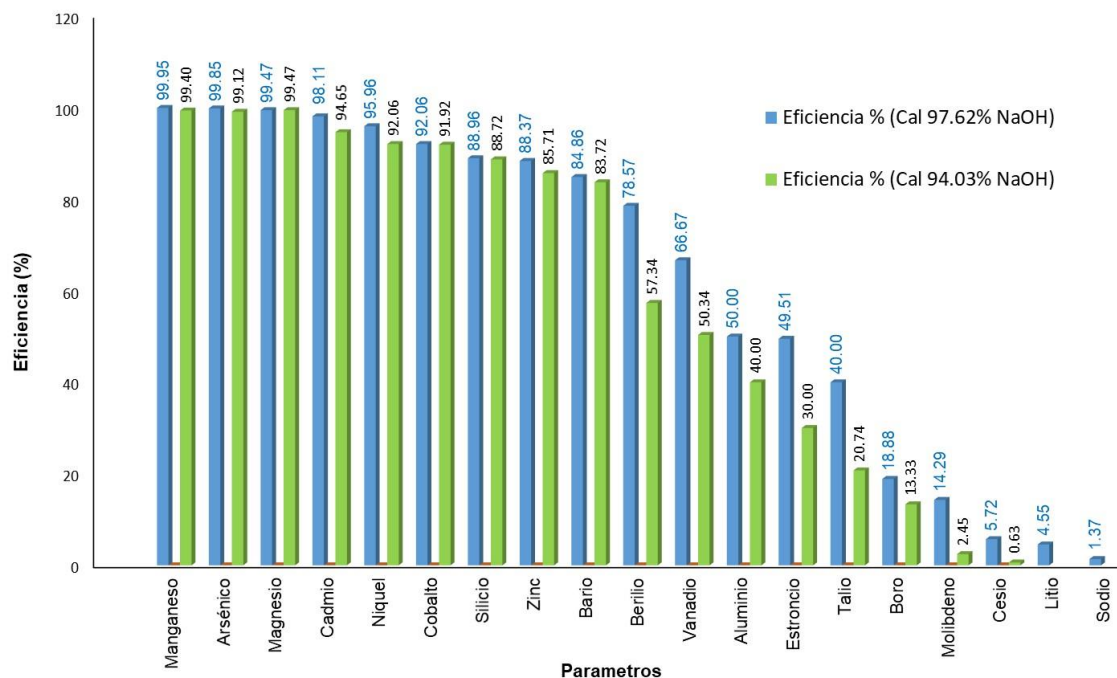
Las comparaciones múltiples de Tukey se utilizaron para identificar cuáles niveles específicos de los factores son diferentes entre sí. En cuanto al tipo de cal, no se encontraron diferencias significativas, ya que ambos tipos compartieron la misma letra "A". Respecto a las temperaturas, se encontró una diferencia significativa entre las mismas, con medias de 18.7811 para Temperatura 1 y 11.8158 para Temperatura 2. En relación a la concentración de cal (mg/L), Las concentraciones de cal más bajas (0.5 mg/L) y más altas (2.5 y 3 mg/L) muestran diferencias significativas en la turbidez del agua, con las concentraciones de 2.5 mg/L logrando la mayor reducción en turbidez. Las concentraciones intermedias (1-15 mg/L) tienden a agruparse, mostrando efectos similares en la turbidez del agua.

3.4. Porcentaje de remoción de metales del agua subterránea

La figura 3 muestra la eficiencia de remoción a 10 °C de las dosis óptimas (3g/L Cal hidratada 97.62% - 2.5g/L Cal hidratada al 94.03%) de diversos parámetros contaminantes en el agua subterránea utilizando dos tipos de cal hidratada: una con una pureza del 97.62% (indicada en azul) y otra con una pureza del 94.03% (indicada en verde). Los parámetros analizados incluyen metales pesados y elementos traza como manganeso, arsénico, mercurio, cadmio, entre otros.

Figura 3

Eficiencia de remoción de contaminantes con dosis óptimas de cal hidratada (3g/L al 97.62% y 2.5g/L al 94.03%) a 10°C

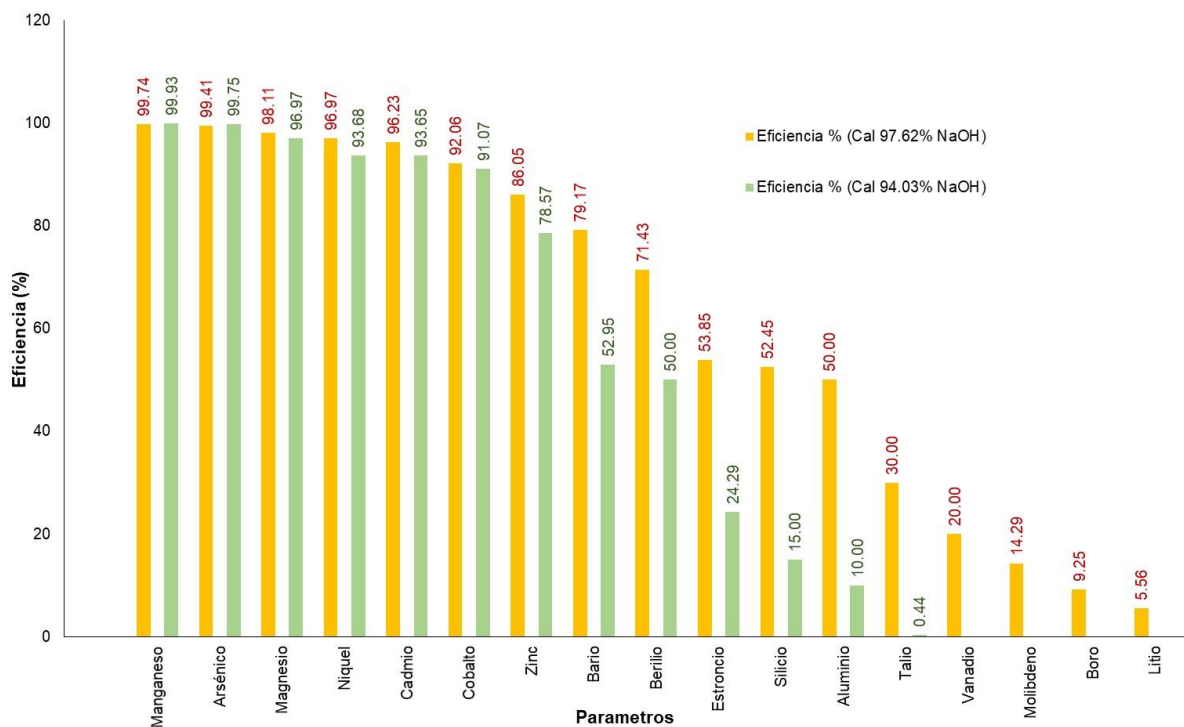


Para el Manganeso, ambas cales lograron una remoción casi total del manganeso, con eficiencias del 99.55% para la cal al 97.62% y del 99.45% para la cal al 94.03%. Para el arsénico, se observó una alta eficiencia de remoción de arsénico, alcanzando el 99.02% con la cal al 97.62% y el 98.67% con la cal al 94.03%. La remoción de mercurio y cadmio fue igualmente eficaz, con eficiencias superiores al 90% para ambas cales. Para el Níquel, Cobalto, Silicio, Zinc, Bario: Estos parámetros también mostraron altos niveles de remoción, con eficiencias cercanas o superiores al 85%. Para el Vanadio y Aluminio, la remoción de vanadio y aluminio fue menos eficiente en comparación con los metales anteriores, pero aún significativa, con eficiencias alrededor del 50% y 67%, respectivamente. Para el Estroncio, Talio, Boro, Molibdeno, la eficiencia de remoción para estos elementos fue menor, especialmente para el boro, con valores de 27% y 22.04% para las cales al 97.62% y al 94.03%, respectivamente. Otros elementos como el Cesio, Litio, Sodio presentaron las menores eficiencias de remoción, con valores que varían entre el 1.97% y el 15.37%.

La Figura 4 muestra la eficiencia de remoción de diversos contaminantes en agua utilizando dos tipos de cal hidratada: una con una pureza del 97.62% a una dosis óptima de 2g/L y otra con una pureza del 94.03% a una dosis óptima de 3.5g/L, ambas a una temperatura de 15°C. Los contaminantes analizados incluyen manganeso, arsénico, magnesio, cadmio, níquel, cobalto, silicio, zinc, bario, vanadio, aluminio, estroncio, boro, molibdeno, cesio, litio y sodio.

Figura 4

Eficiencia de remoción de contaminantes con dosis óptimas de cal hidratada (2g/L al 97.62% y 3.5g/L al 94.03%) a 15°C



La cal hidratada al 97.62% muestra una alta eficiencia de remoción para la mayoría de los contaminantes, superando el 90% en varios casos: manganeso (99.74%), arsénico (99.51%), magnesio (99.41%) y níquel (98.67%). Sin embargo, la eficiencia disminuye significativamente para algunos elementos como molibdeno (9.25%), cesio (5.56%), litio (0.44%) y boro (1.42%). La cal hidratada al 94.03%, aunque ligeramente menos pura, también muestra alta eficiencia de remoción para contaminantes como manganeso (99.74%), arsénico (99.51%) y magnesio (99.41%), pero tiene una eficiencia

significativamente baja para molibdeno (9.25%), cesio (5.56%), litio (0.44%) y boro (1.42%). En general, ambos tipos de cal hidratada son efectivos para la remoción de metales pesados y otros contaminantes a altas concentraciones, aunque su eficiencia varía dependiendo del contaminante específico. La cal al 97.62% tiende a tener una eficiencia ligeramente superior en la mayoría de los casos. La Tabla 7 presenta los valores iniciales y finales de diversos parámetros analizados en el tratamiento de agua con cal hidratada al 97.62% y al 94.03% a una temperatura de 10°C. Los parámetros incluyen concentraciones de metales pesados, minerales y otros elementos, con sus respectivas eficiencias de remoción, y se comparan con los estándares del D.S. N° 031-2010 S.A. y la Organización Mundial de la Salud (OMS 2011).

Tabla 7

Valores finales de los parámetros analizados con las dosis óptimas a 10°C

Parámetros analizados	Unidad	Valor inicial	Cal hidratada 97.62%	Remoción (%)	Cal hidratada 94.03%	Remoción (%)	D.S. N° 031-2010-S.A	Organización Mundial de la Salud (OMS 2011)
Plata	mg/L	<0.00005	<0.00005	ND	<0.00005	ND	.....	.....
Aluminio	mg/L	0.1	0.05	50	0.06	40	.....	0.2
Arsénico	mg/L	0.0457	0.00007	99.85	0.0004	99.12	0.01	0.01
Boro	mg/L	7.523	6.103	18.88	5.963	20.74	1.5	0.3
Bario	mg/L	0.4432	0.0671	84.86	0.0237	94.65	0.7	0.7
Berilio	mg/L	0.00014	0.00003	78.57	0.00002	85.71	.....	.....
Bismuto	mg/L	<0.0001	<0.0001	ND	<0.0001	ND	.....	.....
Calcio	mg/L	117.3	294.72	-151.25	182.27	-55.39	.....	.....
Cadmio	mg/L	0.00053	0.00001	98.11	<0.00001	ND	0.0003	0.003
Cerio	mg/L	<0.00002	<0.00002	ND	<0.00002	ND	.....	.....
Cobalto	mg/L	0.00063	0.00005	92.06	0.00005	92.06	.....	.....
Cromo	mg/L	0.00088	0.00202	-129.55	0.00206	-134.09	0.05	0.05
Cesio	mg/L	0.01887	0.01779	5.72	0.01888	-0.05	.....	.....
Cobre	mg/L	0.006	<0.001	ND	0.002	66.67	.....	2
Hierro	mg/L	0.02	<0.01	ND	<0.01	ND	.....	0.3
Mercurio	mg/L	<0.0005	<0.0005	ND	<0.0005	ND	0.001	0.001
Potasio	mg/L	18.32	19.69	-7.48	24.39	-33.13	.....	.....
Litio	mg/L	0.64195	0.61274	4.55	0.62621	2.45	.....	.....
Magnesio	mg/L	28.11	0.15	99.47	3.17	88.72	.....	.....
Manganeso	mg/L	0.43	0.0002	99.95	0.0026	99.4	.....	0.5

Molibdeno	mg/L	0.0007	0.0006	14.29	0.0011	-57.14	0.07	0.07
Sodio	mg/L	357.3	352.4	1.37	355.06	0.63	.....	200
Niquel	mg/L	0.0099	0.0004	95.96	0.0008	91.92	..020	0.02
Fosforo	mg/L	0.45	<0.02	ND	<0.02	ND	.....	.....
Plomo	mg/L	<0.0002	<0.0002	ND	<0.0002	ND	0.01	0.01
Antimonio	mg/L	<0.0001	<0.0001	ND	<0.0001	ND	0.02	0.005
Selenio	mg/L	0.0001	0.0002	-100	<0.0001	ND	0.01	0.01
Silicio	mg/L	26.54	2.93	88.96	13.18	50.34	.....	.....
Estaño	mg/L	<0.0001	<0.0001	ND	<0.0001	ND	.....	.....
Estroncio	mg/L	1.022	0.516	49.51	0.436	57.34	.....	.....
Titanio	mg/L	0.0019	<0.0002	ND	<0.0002	ND	.....	.....
Talio	mg/L	0.0001	0.00006	40	0.00007	30	.....	.....
Uranio	mg/L	0.00034	<0.00002	ND	<0.00002	ND	0.015	0.03
Vanadio	mg/L	0.0015	0.0005	66.67	0.0013	13.33	.....	.....
Zinc	mg/L	0.043	0.005	88.37	0.007	83.72	.....	3

Nota: D.S. N° 031-2010 S.A. Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano.

La eficiencia de remoción de arsénico es notablemente alta para ambas cales, alcanzando un 99.85% con cal al 97.62% y 99.93% con cal al 94.03%, reduciendo las concentraciones muy por debajo del límite de 0.01 mg/L establecido por las normativas. Otros contaminantes, como manganeso y magnesio, también muestran eficiencias de remoción superiores al 99%, cumpliendo con los estándares de calidad del agua. Sin embargo, ciertos parámetros presentan comportamientos adversos. El sodio y el calcio, por ejemplo, presentan incrementos en sus concentraciones post-tratamiento, lo que indica una posible disolución de componentes de la cal en el agua tratada. Además, la remoción de elementos como el molibdeno, cesio, litio y potasio fue ineficaz o incluso negativa, sugiriendo que estos elementos no se eliminan efectivamente mediante el tratamiento con cal hidratada y podrían requerir métodos complementarios. La eficiencia de remoción del cromo es particularmente preocupante, mostrando valores negativos (-129.55% y -134.09%), lo que sugiere una posible contaminación cruzada o interferencias químicas durante el proceso de tratamiento.

La Tabla 8 presenta los valores iniciales y finales de diversos parámetros analizados en el tratamiento de agua con cal hidratada al 97.62% y al 94.03% a una temperatura de 15°C. Los parámetros incluyen concentraciones de metales pesados, minerales y otros elementos, con sus respectivas eficiencias de remoción y comparación con los estándares del D.S. N° 031-2010 S.A. y la Organización Mundial de la Salud (OMS 2011).

Tabla 8

Valores finales de los parámetros analizados con las dosis óptimas a 15°C

Parámetros analizados	Unidad	Valor inicial	Cal hidratada (97.62%)	Remoción (%)	Cal hidratada (94.03%)	Remoción (%)	D.S. N° 031201 S.A	Organización Mundial de la Salud (OMS 2011)
Plata	mg/L	<0.00005	<0.00005	ND	<0.00005	ND	.....	.....
Aluminio	mg/L	0.1	0.05	50	0.05	50	.....	0.2
Arsénico	mg/L	0.0457	0.00027	99.41	0.00003	99.93	0.01	0.01
Boro	mg/L	7.523	6.827	9.25	5.696	24.29	1.5	0.3
Bario	mg/L	0.4432	0.0923	79.17	0.028	93.68	0.7	0.7
Berilio	mg/L	0.00014	0.00004	71.43	0.00003	78.57	.....	.....
Bismuto	mg/L	<0.0001	<0.0001	ND	<0.0001	ND	.....	.....
Calcio	mg/L	117.3	212.99	-81.58	351.62	-199.76	.....	.....
Cadmio	mg/L	0.00053	0.00002	96.23	<0.00001	ND	0.0003	0.003
Cerio	mg/L	<0.00002	<0.00002	ND	0.00003	ND	.....	.....
Cobalto	mg/L	0.00063	0.00005	92.06	0.00004	93.65	.....	.....
Cromo	mg/L	0.00088	0.00194	-120.45	0.0022	-150.00	0.05	0.05
Cesio	mg/L	0.01887	0.02175	-15.26	0.02096	-11.08	.....	.....
Cobre	mg/L	0.006	<0.001	ND	<0.001	ND	.....	2
Hierro	mg/L	0.02	<0.01	ND	0.017	15.00	.....	0.3
Mercurio	mg/L	<0.0005	<0.0005	ND	<0.0005	ND	0.001	0.001
Potasio	mg/L	18.32	19.42	-6.00	27.11	-47.98	.....	.....
Litio	mg/L	0.64195	0.60623	5.56	0.63915	0.44	.....	.....
Magnesio	mg/L	28.11	0.53	98.11	0.07	99.75	.....	.....
Manganeso	mg/L	0.43	0.0011	99.74	<0.0002	ND	.....	0.5
Molibdeno	mg/L	0.0007	0.0006	14.29	0.0041	-485.71	0.07	0.07
Sodio	mg/L	357.3	358.82	-0.43	361.43	-1.16	.....	200
Niquel	mg/L	0.0099	0.0003	96.97	0.0003	96.97	..020	0.02
Fosforo	mg/L	0.45	<0.02	ND	<0.02	ND	.....	.....
Plomo	mg/L	<0.0002	<0.0002	ND	<0.0002	ND	0.01	0.01
Antimonio	mg/L	<0.0001	<0.0001	ND	0.0005	ND	0.02	0.005
Selenio	mg/L	0.0001	0.0003	-200.00	0.0002	-100.00	0.01	0.01
Silicio	mg/L	26.54	12.62	52.45	2.37	91.07	.....	.....
Estaño	mg/L	<0.0001	<0.0001	ND	0.0003	ND	.....	.....
Estroncio	mg/L	1.022	0.4717	53.85	0.4809	52.95	.....	.....
Titanio	mg/L	0.0019	<0.0002	ND	<0.0002	ND	.....	.....

Talio	mg/L	0.0001	0.00007	30.00	0.00009	10.00	.....	.....
Uranio	mg/L	0.00034	<0.0000	ND	<0.0000	ND	0.015	0.03
			2		2			
Vanadio	mg/L	0.0015	0.0012	20.00	<0.0004	ND	.....	.....
Zinc	mg/L	0.043	0.006	86.05	<0.003	ND	.....	3

Nota: D.S. N° 031-2010 S.A. Reglamento de Calidad de Agua para Consumo

Humano.

La eficiencia de remoción de arsénico es notablemente alta para ambas cales, alcanzando un 99.41% con cal al 97.62% y 99.93% con cal al 94.03%, reduciendo las concentraciones muy por debajo del límite de 0.01 mg/L establecido por las normativas. Otros elementos, como el manganeso y el magnesio, también muestran eficiencias de remoción superiores al 98%, cumpliendo con los estándares de calidad del agua. Sin embargo, ciertos parámetros como el sodio y el calcio muestran incrementos en sus concentraciones post-tratamiento, indicando una posible disolución de componentes de la cal en el agua tratada. Además, la remoción de elementos como el molibdeno, cesio, litio y potasio fue ineficaz o incluso negativa, lo que sugiere que estos elementos no se eliminan efectivamente mediante el tratamiento con cal hidratada y podrían requerir métodos complementarios. La eficiencia de remoción de cromo es particularmente preocupante, mostrando valores negativos (-120.45% y -150%), lo que sugiere una posible contaminación cruzada o interferencias químicas durante el proceso de tratamiento.

4. CONCLUSIONES

La concentración de arsénico en el agua (0.0457 mg/L) excede los límites establecidos por las normativas chilenas, la OMS y el D.S. N° 031-2010 S.A., que fijan un máximo de 0.01 mg/L. Además, Cal 1, con un 97.62% de hidróxido de calcio, es más pura que Cal 2, que contiene un 94.03% de hidróxido de calcio y 3.02% de silicato de calcio. Esta mayor pureza hace que Cal 1 sea más adecuada para aplicaciones que requieren alta calidad de Ca(OH)_2 . A 10°C, las dosis óptimas son 3 g/L para cal al 97.62% (1.55 UNT) y 2.5 g/L para cal al 94.03% (2.94 UNT), cumpliendo ambas con las normas de calidad del agua para consumo humano. La aplicación de cal hidratada al 97.62% y al 94.03% es altamente eficaz para remover más del 99% de arsénico, así como para la remoción de manganeso y magnesio. Sin embargo, la eficiencia de remoción es baja para molibdeno, cesio, litio y boro, lo que sugiere la necesidad de métodos complementarios. La cal al

97.62% muestra una mayor eficiencia general y es preferible para la remoción de arsénico y otros contaminantes críticos.

Por otro lado, a 15°C, las dosis óptimas son de 2 g/L para cal al 97.62% (3.09 UNT) y 3.5 g/L para cal al 94.03% (2.85 UNT), cumpliendo ambas con las normas de calidad del agua para consumo humano. La aplicación de cal hidratada al 97.62% y al 94.03% es igualmente eficaz para remover más del 99% de arsénico, así como para la remoción de manganeso y magnesio. La cal al 97.62% muestra una ligera superioridad en la remoción de la mayoría de los contaminantes. Sin embargo, la eficiencia es baja para elementos como molibdeno, cesio, litio y boro, lo que sugiere la necesidad de métodos complementarios. La concentración de cal y la temperatura reducen significativamente la turbidez del agua, mientras que el tipo de cal no tiene un efecto notable. ANOVA y Tukey muestran que temperaturas de 15°C y concentraciones de cal de 2 mg/L y 3.5 mg/L son las más efectivas, resaltando la importancia de optimizar estos parámetros en el tratamiento de aguas residuales. Finalmente, es importante destacar que las aguas subterráneas de Central Esquen - Juliaca no son aptas para el consumo humano debido a la presencia de contaminantes que exceden los límites establecidos por las normativas de calidad del agua.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Apaza Quispe, T. L. (2020). *Evaluación de arsénico, dureza, coliformes termotolerantes y E. coli en aguas subterráneas, de las urbanizaciones de Santa Adriana y Niño San Salvador, del distrito de Juliaca, Puno 2019*. Universidad Peruana Unión.
- Appelo, C. A. J., y Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. En *Geochemistry, groundwater and pollution* (2.^a ed.). [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90585-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90585-1)
- Canepa de Vargas, L. (2004). Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades. En CEPIS/OPS (Ed.), *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo II* (pp. 216-281).
- Carabantes, A. G., y Fernicola, N. A. G. G. de. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 39(4), 365-372. <https://doi.org/10.1590/s1516-93322003000400003>
- Defensoría del Pueblo. (2022). Boletín sobre cobertura de agua potable Región Puno. En *Informe de Adjuntía N° 006-2022-DP/AMASPPI*.
- Fang, Z., Li, Z., Zhang, X., Pan, S., Wu, M., y Pan, B. (2021). Enhanced Arsenite Removal from Silicate-containing Water by Using Redox Polymer-based Fe(III) Oxides Nanocomposite. *Water Research*, 189, 116673. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116673>
- Guo, J., Cao, W., Lang, G., Sun, Q., Nan, T., Li, X., Ren, Y., y Li, Z. (2024). Worldwide Distribution, Health Risk, Treatment Technology, and Development Tendency of Geogenic High-Arsenic Groundwater. *Water (Switzerland)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/w16030478>
- Huaracha Astete, J. A., y Quispe Flores, L. (2020). Determinación de la concentración de arsénico en aguas subterráneas en las salidas: Puno, Lampa y Arequipa de la ciudad de Juliaca - 2019. En *Universidad Peruana Unión*. Universidad Peruana Unión.
- Huillca Lima, M., y Apaza Mamani, L. (2019). Evaluación de la concentración de arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en la Asociación Nueva Jerusalén, Juliaca - Puno. En *Universidad Peruana Unión*. Universidad Peruana Unión.
- Nch 409/1 Norma calidad del agua potable, Diario oficial 1 (2006).
- Lall, U., Josset, L., y Russo, T. (2020). A snapshot of the world's groundwater challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 171-194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800>
- Londoño, C. A. (2017). *Análisis científico*.
- Mamani Navarro, W. (2019). Contaminación de las Aguas Subterráneas por Arsénico (As) el Distrito de Juliaca - Perú. *Nawparisun*, 1(4), 36.
- Mandal, B. K., y Suzuki, K. T. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 58(1), 201-235. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0)
- Martinez, L. D., y Gasquez, J. A. (2005). Determinación de Arsénico en aguas: diferentes técnicas y metodologías. *Sitio Argentino de Producción Animal*, llii, 1-6.

- Meng, X., Korfiatis, G. P., Jing, C., y Christodoulatos, C. (2001). Redox transformations of arsenic and iron in water treatment sludge during aging and TCLP extraction. *Environmental Science and Technology*, 35(17), 3476-3481. <https://doi.org/10.1021/es010645e>
- MINSAs, M. de S. (2010). Digesa. *Reglamento de Calidad del Agua Para Consumo Humano*, 9, 1689-1699.
- MINSAs, M. de S. (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA*.
- MINSAs, M. de S. (2015). Protocolo de Procedimientos para la toma de muestras, preservación, conservación, transporte, almacenamiento y recepción de agua para consumo humano. *Resolución Directoral N° 160-2015/DIGESA/SA*.
- Nikolaidis, N. P., Dobbs, G. M., y Lackovic, J. A. (2003). Arsenic removal by zero-valent iron: field, laboratory and modeling studies. *Water Research*, 37(6), 1417-1425. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00483-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00483-9)
- Nurmesniemi, E. T., Huhta, M., Derkani, M., Isteri, V., Hanein, T., Hu, T., Tanskanen, P., y Lassi, U. (2022). Removal of sulphate and arsenic from wastewater using calcium sulfoaluminate (ye'elinite). *Frontiers in Materials*, 9(September), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.943486>
- Organización Mundial de la Salud. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. *Organización Mundial de la Salud*, 4, 608.
- Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143-161.
- Rodríguez de Robles, B. E. (2016). Metodología de análisis en el tiempo para evaluar la escasez de agua dulce en función de la oferta y de la demanda. Caso de estudio: Los países de la región del golfo de Guinea. *Universidad Politécnica de Cataluña*, 228.
- Senasa, E. D. E. L. (2020). *Esta versión está vigente en tanto esté publicada en la Intranet. En caso de imprimir este documento con fines didácticos, una vez utilizado debe destruirlo bajo su responsabilidad.* 1. 8, 1-56.
- Soto, E. L., Gonzalez, M. J., Thomas, H. J., Schalamuk, I. B., y Botto, I. L. (2013). Eliminación de arsénico en aguas subterráneas: diseño tecnológico para su aplicación en zonas rurales. *Augmdomus*, 5(1900), 11.
- WHO, W. H. O. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum.*

6. ANEXOS

Anexo A. Evidencia de Sumisión

[tca] Acuse de recibo de envío

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

Miércoles 20/12/2023 16:56

Para: Juan Eduardo Vigo Rivera <eduardo.vigo@upeu.edu.pe>

Hola Juan Eduardo Vigo Rivera:

Gracias por enviar el manuscrito "Uso de cal como método económico para el tratamiento de arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en zonas altiplánicas: Use of lime as an economic method for the treatment of arsenic in groundwater for human consumption in highlands areas" a Tecnología y ciencias del agua para posible publicación.

Con nuestro sistema de gestión en línea podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial:

URL del manuscrito:

<https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/authorDashboard/submission/3811>

Nombre de usuario/a: jevr72

Quedo a sus órdenes.

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 artículo



“AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO”

RESOLUCIÓN N° 0598-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 17 de octubre de 2023

VISTO:

El expediente de **Martha Huilca Lima**, identificado(a) con Código Universitario N° 201520867 y **Lourdes Apaza Mamani**, identificado(a) con Código Universitario N° 201520882, 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 aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Martha Huilca Lima** y **Lourdes Apaza Mamani**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Uso de cal como método económico para el tratamiento de arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en zonas altiplánicas" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 17 de octubre de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Uso de cal como método económico para el tratamiento de arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en zonas altiplánicas" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera** como **ASESOR** para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **MSc. Franklyn Elard Zapana Yucra** y **MSc. Loayda Condori Turpo**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Mg. Ketty Magaly Arellano Lino
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

Anexo C: Difractogramas de las cales

Figura 5

Difractograma de la Cal 97.62% de NaOH

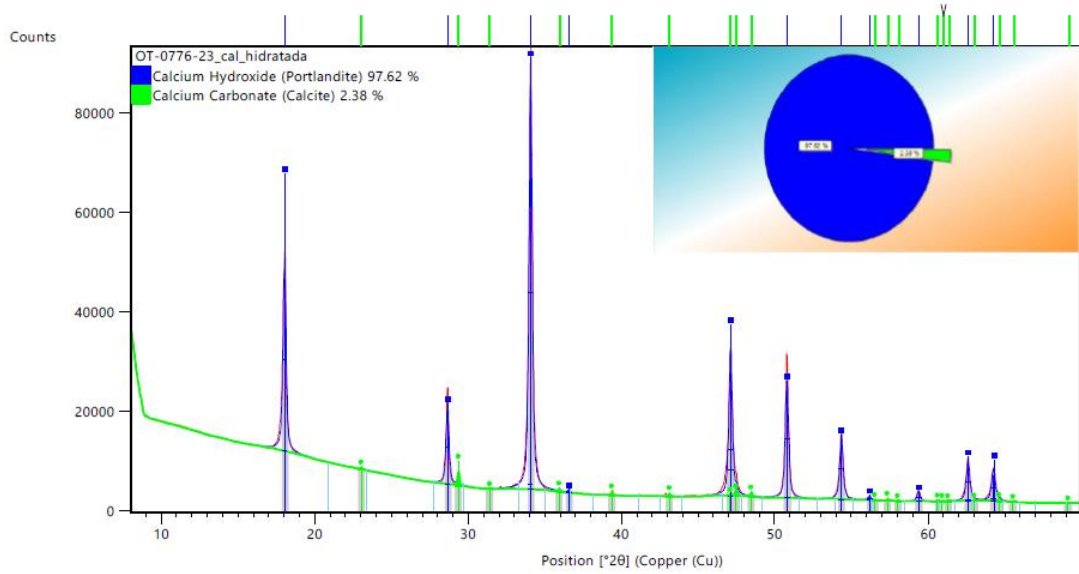
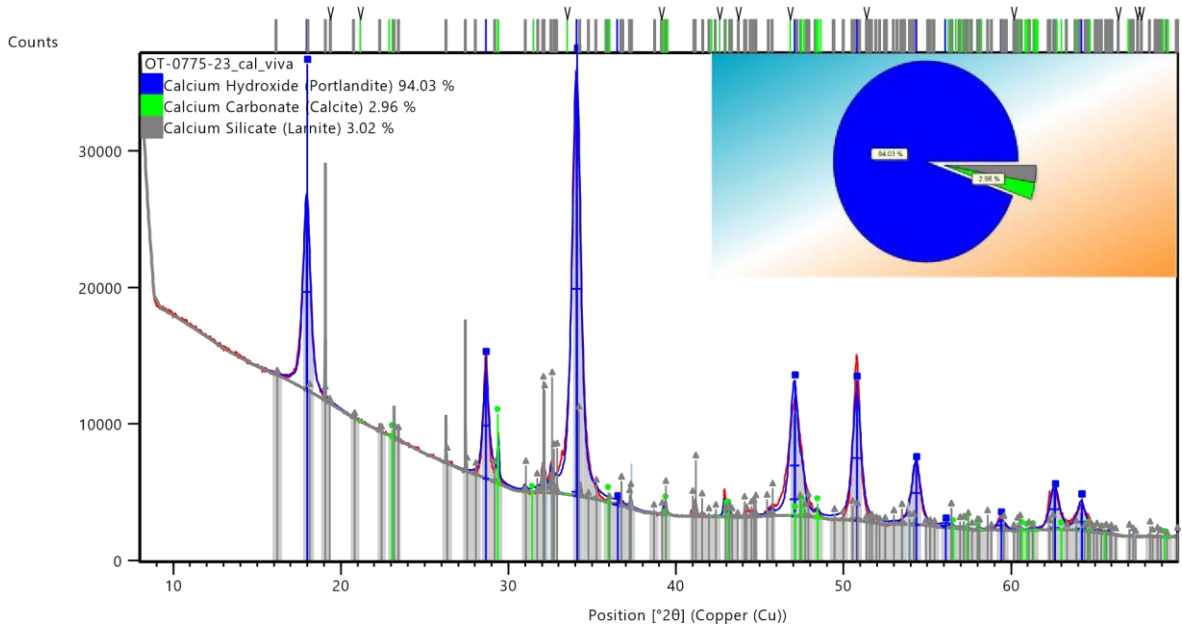


Figura 6

Difractograma de la Cal 94.03% NaOH



Anexo D: Análisis de barrido del laboratorio

Anexo D1: Análisis de la muestra inicial de agua

INFORME DE ENSAYOS Nº 7389- 2023

PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	AGUA SUBTERRÁNEA Muestra inicial. (M-01)	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0,00001	0,00005	<0.00005	mg/L
FQ	Al (Aluminio)	0,004	0,020	0.10	mg/L
FQ	As (Arsénico)	0,000004	0,00002	0.04570	mg/L
FQ	B (Boro)	0,001	0,005	7.523	mg/L
FQ	Ba (Bario)	0,0001	0,0004	0.4432	mg/L
FQ	Be (Berilio)	0,000003	0,00002	0.00014	mg/L
FQ	Bi (Bismuto)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Ca (Calcio)	0,010	0,050	117.30	mg/L
FQ	Cd (Cadmio)	0,000001	0,00001	0.00053	mg/L
FQ	Ce (Cerio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	Co (Cobalto)	0,000001	0,00001	0.00063	mg/L
FQ	Cr (Cromo)	0,00001	0,00005	0.00088	mg/L
FQ	Cs (Cesio)	0,000002	0,00001	0.01887	mg/L
FQ	Cu (Cobre)	0,0002	0,001	0.006	mg/L
FQ	Fe (Hierro)	0,002	0,010	0.020	mg/L
FQ	Hg (Mercurio)	0,0001	0,0005	<0.0005	mg/L
FQ	K (Potasio)	0,004	0,020	18.32	mg/L
FQ	Li (Litio)	0,00002	0,00008	0.64195	mg/L
FQ	Mg (Magnesio)	0,004	0,020	28.11	mg/L
FQ	Mn (Manganeso)	0,00003	0,0002	0.4300	mg/L
FQ	Mo (Molibdeno)	0,00002	0,0001	0.0007	mg/L
FQ	Na (Sodio)	0,010	0,050	357.30	mg/L
FQ	Ni (Niquel)	0,00001	0,00006	0.0099	mg/L
FQ	P (Fosforo)	0,004	0,020	0.45	mg/L
FQ	Pb (Plomo)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Sb (Antimonio)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Se (Selenio)	0,00002	0,0001	0.0001	mg/L
FQ	Si (Silicio)	0,020	0,100	26.54	mg/L
FQ	Sn (Estaño)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Sr (Estroncio)	0,0001	0,0004	1.022	mg/L
FQ	Ti (Titanio)	0,00004	0,0002	0.0019	mg/L
FQ	Tl (Talio)	0,000004	0,00002	0.00010	mg/L
FQ	U (Uranio)	0,000003	0,00002	0.00034	mg/L
FQ	V (Vanadio)	0,0001	0,0004	0.0015	mg/L
FQ	Zn (Zinc)	0,001	0,003	0.043	mg/L

ABREVIATURAS:

mg/L : Miligramos por litro

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS : EPAMETHOD6020B, Rev. 2, July 2014 (VALIDADO -Modificado) (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2020 Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

Cualquier valor precedido por "<" indica menor al limite de cuantificación del método

LC: Limite de cuantificación del método.

LD: Limite de detección del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 25/11/2023 al 30/11/2023

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 01/12/2023

INFORME DE ENSAYOS N° 7390- 2023
PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	AGUA SUBTERRÁNEA Con Cal Hidratada 2g T° 15. (M-02)	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0,00001	0,00005	<0.00005	mg/L
FQ	Al (Aluminio)	0,004	0,020	0.05	mg/L
FQ	As (Arsénico)	0,000004	0,00002	0.00027	mg/L
FQ	B (Boro)	0,001	0,005	6.827	mg/L
FQ	Ba (Bario)	0,0001	0,0004	0.0923	mg/L
FQ	Be (Berilio)	0,000003	0,00002	0.00004	mg/L
FQ	Bi (Bismuto)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Ca (Calcio)	0,010	0,050	212.99	mg/L
FQ	Cd (Cadmio)	0,000001	0,00001	0.00002	mg/L
FQ	Ce (Cerio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	Co (Cobalto)	0,000001	0,00001	0.00005	mg/L
FQ	Cr (Cromo)	0,00001	0,00005	0.00194	mg/L
FQ	Cs (Cesio)	0,000002	0,00001	0.02175	mg/L
FQ	Cu (Cobre)	0,0002	0,001	<0.001	mg/L
FQ	Fe (Hierro)	0,002	0,010	<0.01	mg/L
FQ	Hg (Mercurio)	0,0001	0,0005	<0.0005	mg/L
FQ	K (Potasio)	0,004	0,020	19.42	mg/L
FQ	Li (Litio)	0,00002	0,00008	0.60623	mg/L
FQ	Mg (Magnesio)	0,004	0,020	0.53	mg/L
FQ	Mn (Manganeso)	0,00003	0,0002	0.0011	mg/L
FQ	Mo (Molibdeno)	0,00002	0,0001	0.0006	mg/L
FQ	Na (Sodio)	0,010	0,050	358.82	mg/L
FQ	Ni (Niquel)	0,00001	0,00006	0.0003	mg/L
FQ	P (Fosforo)	0,004	0,020	<0.02	mg/L
FQ	Pb (Plomo)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Sb (Antimonio)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Se (Selenio)	0,00002	0,0001	0.0003	mg/L
FQ	Si (Silicio)	0,020	0,100	12.62	mg/L
FQ	Sn (Estaño)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Sr (Estroncio)	0,0001	0,0004	0.4717	mg/L
FQ	Ti (Titanio)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Tl (Talio)	0,000004	0,00002	0.00007	mg/L
FQ	U (Uranio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	V (Vanadio)	0,0001	0,0004	0.0012	mg/L
FQ	Zn (Zinc)	0,001	0,003	0.006	mg/L

ABREVIATURAS:

mg/L : Miligramos por litro

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS : EPA METHOD 6020 B, Rev. 2, July 2014 (VALIDADO - Modificado) (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2020 Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

Cualquier valor precedido por "<" indica menor al limite de cuantificación del método

LC: Límite de cuantificación del método.

LD: Límite de detección del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 25/11/2023 al 30/11/2023

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 01/12/2023

INFORME DE ENSAYOS N° 7391 - 2023
PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	AGUA SUBTERRÁNEA Con Cal Hidratada 3g T° 10. (M-03)	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0,00001	0,00005	<0.00005	mg/L
FQ	Al (Aluminio)	0,004	0,020	0.05	mg/L
FQ	As (Arsénico)	0,000004	0,00002	0.00007	mg/L
FQ	B (Boro)	0,001	0,005	6.103	mg/L
FQ	Ba (Bario)	0,0001	0,0004	0.0671	mg/L
FQ	Be (Berilio)	0,000003	0,00002	0.00003	mg/L
FQ	Bi (Bismuto)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Ca (Calcio)	0,010	0,050	294.72	mg/L
FQ	Cd (Cadmio)	0,000001	0,00001	<0.00001	mg/L
FQ	Ce (Cerio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	Co (Cobalto)	0,000001	0,00001	0.00005	mg/L
FQ	Cr (Cromo)	0,00001	0,00005	0.00202	mg/L
FQ	Cs (Cesio)	0,000002	0,00001	0.01779	mg/L
FQ	Cu (Cobre)	0,0002	0,001	<0.001	mg/L
FQ	Fe (Hierro)	0,002	0,010	<0.01	mg/L
FQ	Hg (Mercurio)	0,0001	0,0005	<0.0005	mg/L
FQ	K (Potasio)	0,004	0,020	19.69	mg/L
FQ	Li (Litio)	0,00002	0,00008	0.61274	mg/L
FQ	Mg (Magnesio)	0,004	0,020	0.15	mg/L
FQ	Mn (Manganeso)	0,00003	0,0002	0.0002	mg/L
FQ	Mo (Molibdeno)	0,00002	0,0001	0.0006	mg/L
FQ	Na (Sodio)	0,010	0,050	352.40	mg/L
FQ	Ni (Niquel)	0,00001	0,00006	0.0004	mg/L
FQ	P (Fosforo)	0,004	0,020	<0.02	mg/L
FQ	Pb (Plomo)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Sb (Antimonio)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Se (Selenio)	0,00002	0,0001	0.0002	mg/L
FQ	Si (Silicio)	0,020	0,100	2.93	mg/L
FQ	Sn (Estaño)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Sr (Estroncio)	0,0001	0,0004	0.5160	mg/L
FQ	Ti (Titanio)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Tl (Talio)	0,000004	0,00002	0.00006	mg/L
FQ	U (Uranio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	V (Vanadio)	0,0001	0,0004	0.0005	mg/L
FQ	Zn (Zinc)	0,001	0,003	0.005	mg/L

ABREVIATURAS:

mg/L : Miligramos por litro

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS : EPA METHOD 6020 B, Rev. 2, July 2014 (VALIDADO - Modificado) (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2020 Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

Cualquier valor precedido por "<" indica menor al limite de cuantificación del método

LC: Límite de cuantificación del método.

LD: Límite de detección del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 25/11/2023 al 30/11/2023

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 01/12/2023

INFORME DE ENSAYOS N° 7392- 2023
PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	AGUA SUBTERRÁNEA Con Cal viva 3.5g T° 15. (M-04)	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0,00001	0,00005	<0.00005	mg/L
FQ	Al (Aluminio)	0,004	0,020	0.05	mg/L
FQ	As (Arsénico)	0,000004	0,00002	0.00003	mg/L
FQ	B (Boro)	0,001	0,005	5.696	mg/L
FQ	Ba (Bario)	0,0001	0,0004	0.0280	mg/L
FQ	Be (Berilio)	0,000003	0,00002	0.00003	mg/L
FQ	Bi (Bismuto)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Ca (Calcio)	0,010	0,050	351.62	mg/L
FQ	Cd (Cadmio)	0,000001	0,00001	<0.00001	mg/L
FQ	Ce (Cerio)	0,000003	0,00002	0.00003	mg/L
FQ	Co (Cobalto)	0,000001	0,00001	0.00004	mg/L
FQ	Cr (Cromo)	0,00001	0,00005	0.00220	mg/L
FQ	Cs (Cesio)	0,000002	0,00001	0.02096	mg/L
FQ	Cu (Cobre)	0,0002	0,001	<0.001	mg/L
FQ	Fe (Hierro)	0,002	0,010	0.017	mg/L
FQ	Hg (Mercurio)	0,0001	0,0005	<0.0005	mg/L
FQ	K (Potasio)	0,004	0,020	27.11	mg/L
FQ	Li (Litio)	0,00002	0,00008	0.63915	mg/L
FQ	Mg (Magnesio)	0,004	0,020	0.07	mg/L
FQ	Mn (Manganeso)	0,00003	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Mo (Molibdeno)	0,00002	0,0001	0.0041	mg/L
FQ	Na (Sodio)	0,010	0,050	361.43	mg/L
FQ	Ni (Niquel)	0,00001	0,00006	0.0003	mg/L
FQ	P (Fosforo)	0,004	0,020	<0.02	mg/L
FQ	Pb (Plomo)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Sb (Antimonio)	0,00002	0,00010	0.0005	mg/L
FQ	Se (Selenio)	0,00002	0,0001	0.0002	mg/L
FQ	Si (Silicio)	0,020	0,100	2.37	mg/L
FQ	Sn (Estaño)	0,00002	0,00010	0.0003	mg/L
FQ	Sr (Estroncio)	0,0001	0,0004	0.4809	mg/L
FQ	Ti (Titanio)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Tl (Talio)	0,000004	0,00002	0.00009	mg/L
FQ	U (Uranio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	V (Vanadio)	0,0001	0,0004	<0.0004	mg/L
FQ	Zn (Zinc)	0,001	0,003	<0.003	mg/L

ABREVIATURAS:

mg/L : Miligramos por litro

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS : EPA METHOD 6020 B, Rev. 2, July 2014 (VALIDADO - Modificado) (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2020 Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

Cualquier valor precedido por "<" indica menor al limite de cuantificación del método

LC: Límite de cuantificación del método.

LD: Límite de detección del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 25/11/2023 al 30/11/2023

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 01/12/2023

INFORME DE ENSAYOS N° 7393 - 2023
PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	AGUA SUBTERRÁNEA Con Cal viva 2.5g T° 10. (M-05)	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0,00001	0,00005	<0.00005	mg/L
FQ	Al (Aluminio)	0,004	0,020	0.06	mg/L
FQ	As (Arsénico)	0,000004	0,00002	0.00040	mg/L
FQ	B (Boro)	0,001	0,005	5.963	mg/L
FQ	Ba (Bario)	0,0001	0,0004	0.0237	mg/L
FQ	Be (Berilio)	0,000003	0,00002	0.00002	mg/L
FQ	Bi (Bismuto)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Ca (Calcio)	0,010	0,050	182.27	mg/L
FQ	Cd (Cadmio)	0,000001	0,00001	<0.00001	mg/L
FQ	Ce (Cerio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	Co (Cobalto)	0,000001	0,00001	0.00005	mg/L
FQ	Cr (Cromo)	0,00001	0,00005	0.00206	mg/L
FQ	Cs (Cesio)	0,000002	0,00001	0.01888	mg/L
FQ	Cu (Cobre)	0,0002	0,001	0.002	mg/L
FQ	Fe (Hierro)	0,002	0,010	<0.01	mg/L
FQ	Hg (Mercurio)	0,0001	0,0005	<0.0005	mg/L
FQ	K (Potasio)	0,004	0,020	24.39	mg/L
FQ	Li (Litio)	0,00002	0,00008	0.62621	mg/L
FQ	Mg (Magnesio)	0,004	0,020	3.17	mg/L
FQ	Mn (Manganeso)	0,00003	0,0002	0.0026	mg/L
FQ	Mo (Molibdeno)	0,00002	0,0001	0.0011	mg/L
FQ	Na (Sodio)	0,010	0,050	355.06	mg/L
FQ	Ni (Níquel)	0,00001	0,00006	0.0008	mg/L
FQ	P (Fosforo)	0,004	0,020	<0.02	mg/L
FQ	Pb (Plomo)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Sb (Antimonio)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Se (Selenio)	0,00002	0,0001	<0.0001	mg/L
FQ	Si (Silicio)	0,020	0,100	13.18	mg/L
FQ	Sn (Estaño)	0,00002	0,00010	<0.0001	mg/L
FQ	Sr (Estroncio)	0,0001	0,0004	0.4360	mg/L
FQ	Ti (Titanio)	0,00004	0,0002	<0.0002	mg/L
FQ	Tl (Talio)	0,000004	0,00002	0.00007	mg/L
FQ	U (Uranio)	0,000003	0,00002	<0.00002	mg/L
FQ	V (Vanadio)	0,0001	0,0004	0.0013	mg/L
FQ	Zn (Zinc)	0,001	0,003	0.007	mg/L

ABREVIATURAS:

mg/L : Miligramos por litro

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS : EPA METHOD 6020 B, Rev. 2, July 2014 (VALIDADO - Modificado) (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2020 Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

Cualquier valor precedido por "<" indica menor al limite de cuantificación del método

LC: Límite de cuantificación del método.

LD: Límite de detección del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 25/11/2023 al 30/11/2023

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 01/12/2023