

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Remoción de arsénico de agua subterránea empleando arcilla natural (Chaco) del Altiplano Peruano

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Nelly Elizabeth Cañazaca Calle
Beto Reynerio Ramos Villazante

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, mayo de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

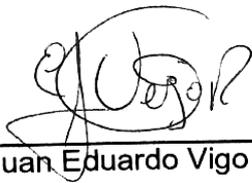
Juan Eduardo Vigo Rivera, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“REMOCIÓN DE ARSÉNICO DE AGUA SUBTERRANEA EMPLEANDO ARCILLA NATURAL (CHACO) DEL ALTIPLANO PERUANO”** constituye la memoria que presenta los Bachilleres Nelly Elizabeth Cañazaca Calle y Beto Reynerio Ramos Villazante para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 22 días del mes de mayo del año 2022



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera



158

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 20 día(s) del mes de mayo del año 2022, siendo las 11:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Miguel Angel Salcedo Enriquez, el secretario: Ing. Verónica Sydee Pari Mamani y los demás miembros: Msc. Rose Adeline Gallata Lhura y el asesor: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera.

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Remoción de arsénico de agua subterránea empleando arcilla natural (Lhaca) del Altiplano Peruano

de el(los)/a(la) bachiller(es): a) Nelly Elizabeth Sañazaca Calle b) Beto Reynerio Ramos Villazante conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental (Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(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 el(los)/a(la)(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:

Candidato (a): Nelly Elizabeth Sañazaca Calle

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Buena	Muy Buena

Candidato (b): Beto Reynerio Ramos Villazante

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Buena	Muy Buena

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(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.

Signatures of Presidente, Asesor, and Candidato/a (a)

Signature of Miembro

Signatures of Secretario and Candidato/a (b)

Remoción de arsénico de agua subterránea empleando arcilla natural (Chaco) del Altiplano Peruano

Removal of arsenic from groundwater using natural clay (Chaco) from the Peruvian highlands

Nelly Elizabeth Cañazaca Calle ^{a*}, Beto Reynerio Ramos Villazante^b y Juan Eduardo Vigo Rivera^c

^aBachiller en Ingeniería Ambiental de la E.P. de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión-Filial Juliaca

^bBachiller en Ingeniería Ambiental de la E.P. de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión-Filial Juliaca

^cMaestro de la E.P. de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión-Filial Juliaca

Resumen

La carencia de agua potable obliga a las poblaciones a recurrir a fuentes subterráneas, donde la mayoría presenta alta concentración de arsénico total, siendo este un metaloide altamente toxico, afectando la salud humana a largo plazo por su ingesta prolongada. Esta investigación tuvo como objetivo remover el arsénico de agua subterránea empleando arcilla natural “chaco” del altiplano peruano (Asillo y Conima). La arcillas se han sujeto a: secado durante 24 horas en una estufa a 100°C, triturado, tamizado en tamiz N°60 para 0,25 mm y caracterización por DRX y EDX; las aguas subterráneas se tomaron de la urbanización de Taparachi - Juliaca con presencia de arsénico total de 0,0689 mg/L, el As total se pre-oxidó hipoclorito de sodio al 5%, muestras que se trabajaron en el laboratorio en test de jarra a 150 rpm la mezcla rápida y 40 rpm la mezcla lenta con pH 5, 7.16 y 10 a tiempos de agitación de 30, 60 y 90 min.; siendo 18 tratamientos experimentales. La remoción fue optima a condiciones de pH 5 y a tiempo de contacto de 90 min., obteniendo capacidad de remoción de 69.9% con la arcilla A de Asillo y 82.81% con la arcilla B de Conima debido a su alto contenido de óxidos de Si, Al y Fe encontrados en esta. La arcilla “Chaco” remueve arsénico natural de las aguas subterráneas en el altiplano peruano.

Palabras clave: Arsénico, agua subterránea, arcilla natural, difracción de rayos X, fluorescencias de rayos X.

* Autor de correspondencia:
Av. Héroes de la Guerra del Pacifico, Juliaca, Puno
Cel: 984313465/910526216/961916567
E-mail: nelly.cc@upeu.edu.pe, betoramos@upeu.edu.pe

Abstract

The lack of drinking water forces populations to resort to underground sources, where most have a high concentration of total arsenic, this being a highly toxic metalloid, affecting long-term human health due to its prolonged intake. The objective of this research was to remove arsenic from groundwater using natural clay “Chaco” from the Peruvian highlands (Asillo and Conima). The clays have been subjected to: drying for 24 hours in an oven at 100°C, crushed, sieved in sieve N°60 for 0.25 mm and mineralogical chemical characterization by X-Ray Diffraction (XRD) and X-Ray Fluorescence (EDX); groundwater was taken from the urbanization of Taparachi - Juliaca with the presence of total arsenic of 0.0689 mg/L. The arsenic total was pre-oxidized with 5% sodium hypochlorite, samples that were worked in the laboratory in jar test at 150 rpm the fast mixing and 40 rpm slow mixing to pH 5, 7.16 and 10 at stirring times of 30, 60 and 90 minutes; being 18 experimental treatments. The removal was optimal at pH 5 conditions and at a contact time of 90 minutes, obtaining removal capacity of 69.9% with clay A from Asillo area and 82.81% with clay B from Conima area due to its high content of Si, Al and Fe oxides found in this. The natural “Chaco” clay from the Peruvian highlands removes natural arsenic from groundwater.

Keywords: Arsenic, groundwater, natural clay, X-ray diffraction, X-ray fluorescence.

1. Introducción

El agua subterránea es una fuente importante para el consumo doméstico, la agricultura y las actividades industriales. Sin embargo, la contaminación por arsénico y nitrato en las aguas subterráneas es un gran problema mundial y una preocupación para la salud pública (Solgi y Jalili, 2021). Más de 2 500 millones de personas en el mundo dependen del agua subterránea para beber, aunque, el agua subterránea se considera segura, las altas concentraciones de metales pesados como el arsénico (As) puede presentar problemas y peligros potenciales para la salud humana (Shaji et al. 2021).

La atención mundial se centra principalmente en la presencia de arsénico más allá de su límite máximo permisible en el agua de 0,01 mg/L (OMS 2018), principalmente en las aguas subterráneas, ya que la mayor parte de la población mundial de países como India, Bangladesh, China, Nepal, Tailandia, Brasil, Estados Unidos, Canadá e Inglaterra depende de las aguas

subterráneas para abastecerse de agua para consumo. El consumo incesante de agua rica en arsénico causa diferentes tipos de enfermedades crónicas como la enfermedad del pie negro, pigmentación, queratosis, náuseas y, lo más importante, cáncer en humanos. Los compuestos de arsénico inorgánico tienen más efectos tóxicos que las formas orgánicas (Sarkar y Paul, 2016). La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer ha clasificado el arsénico como cancerígeno para los humanos, el arsénico absorbido se distribuye ampliamente en el cuerpo y está relacionado con diversas enfermedades, como trastornos neurológicos, enfermedades cardiovasculares, enfermedades gastrointestinales y muchos tipos de cáncer (Chakraborti et al. 2017).

En la ciudad de Juliaca-Perú la cobertura del servicio de agua potable brindado por la Empresa Prestadora de Servicio “SEDA Juliaca” es de 77.01 % sirviendo a una población de 229 592 habitantes, existiendo 53 575 conexiones totales de Agua Potable, 13 012 medidores operativos a 4 horas diaria de servicio de agua (SEDAJULIACA 2018), sin embargo, el resto de la población no cuenta con el servicio, ante esta escasez, poca cobertura de agua, los fallos de tuberías y mal funcionamiento del servicio de agua, los pobladores prefirieron obtenerla del subsuelo, por medio de instalaciones de pozos tubulares, el problema de este tipo de fuente de agua subterránea es que tienen altísimos niveles de arsénico, como lo ha revelado la investigación de Mamani Maquera (2019), se muestrearon 12 pozos de agua subterránea aleatorios en agosto de 2018 en la ciudad de Juliaca, de los cuales el valor más alto de concentración de arsénico fue de 0.165 mg/L y en el estudio de Huaracha Astete y Quispe Flores (2020), determinaron concentraciones de arsénico en aguas subterráneas del distrito de Juliaca en 2019, recolectando 10 muestras en total, de las cuales la zona de salida a Puno de la ciudad de Juliaca obtuvieron concentraciones de 0.068, 0.081, 0.082 mg/L As, superando el límite máximo permisible de 0.01 mg/L As, establecido por la normativa peruana del DS. N ° 031-2010-SA y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

El As (III) es una de las formas de arsénico predominantes y ampliamente disponible en las aguas subterráneas naturales, para ello se han desarrollado varios métodos de tratamiento para eliminar el arsénico del agua contaminada, como la oxidación-precipitación (Borho y Wilderer, 1996; Zaw y Emett, 2002) y la coagulación, electrocoagulación y coprecipitación (Hansen, Núñez, and Grandon 2006; Parga et al. 2005; Wickramasinghe et al. 2004) procesos por membranas y adsorción por carbón activado. Sin embargo, la eficiencia de estos procesos depende del grado de disociación del As, las constantes de disociación para el As(III) son menores que las del As (V) por lo que su grado de disociación es mayor (Sharma, Dutta, and Ray 2007). Por lo que, la remoción del As(V) es mayor en comparación con la del As (III), lo

que justifica la oxidación del arsénico antes de su tratamiento. La pre-oxidación seguida de adsorción y coprecipitación se considera un método eficaz para eliminar el arsénico (Leupin y Hug, 2005), este proceso de adsorción resulta una alternativa muy prometedora debido a su fácil operación; costo reducido; ningún requisito químico; sin generación de lodos; bajo consumo de energía y capacidad de regeneración (Burakov et al. 2018), en la que se emplea un sólido como adsorbente para eliminar sustancias disueltas en el agua, las cuales se unen a la superficie mediante fuerzas electrostáticas o de Van der Waals y adherencia por carga negativa y positiva. Dentro de los materiales con capacidades más altas de adsorción están el carbón activado, alúmina activada, arcillas, zeolitas naturales, entre otros (Goel et al. 2004).

Varios autores investigaron el uso de suelos (Boglione et al. 2019), diatomitas (Danil de Namor et al. 2012), arena, arcillas (Manning 1996; Zehhaf et al. 2015) y zeolitas, en procesos de adsorción. Sin embargo, la mayoría de los estudios se centraron en la modificación de estos adsorbentes naturales mediante diversas técnicas (impregnación, tratamientos, ácido/base) y no se ha estudiado con igual profundidad el uso de las materias primas.

En tanto el presente trabajo de investigación busca remover la concentración de arsénico en aguas subterráneas utilizando la arcilla natural “Chaco” de las zonas de Asillo y Conima de Puno, Perú.

2. Materiales y métodos

2.1. Recolección de muestras

Se tomó muestras de agua subterránea (pozo tubular) de la urbanización de Taparachi con coordenadas UTM (WGS - 84, Zona 19 Sur) Este: 379143, Norte: 8283751 y Altitud: 3 804.10 msnm para los análisis fisicoquímicos se realizaron de acuerdo a la Resolución Directoral N° 160-2015-DIGESA-SA “Protocolo de procedimientos para la toma de muestras, preservación, conservación, transporte, almacenamiento y recepción de agua para consumo humano” aprobado por el Decreto Supremo. N° 031-2010-SA/ Ministerio de Salud, para enviar al laboratorio acreditado y otras muestras del efluente en 3 bidones de 20L para los ensayos en laboratorio de la Universidad Peruana Unión Filial Juliaca.

En cuanto a las arcillas naturales (Chaco) utilizada en los experimentos fue extraído de los yacimientos de la zona de Asillo - Comunidad de Catawicuchu (A) y Conima - Parcialidad Cambria (B) con coordenadas UTM (WGS - 84, Zona 19 Sur) Este: 358242, Norte: 8363944, Altitud: 3 850 msnm y Este: 452022, Norte: 8293761, Altitud: 4 172.00 msnm con una cantidad aproximada de 02 kilogramos cada una.

2.2. Preparación del adsorbente “Chaco”

Las arcillas se secaron a 100°C durante 24 horas en una estufa BINDER-ED 53, luego fue trituradas en mortero y se usó tamiz W.S. TYLER N°60 (tamaño de partícula inferior a 0,25 mm) obteniendo 500 gramos de cada arcilla A y B, de las cuales se enviaron 50g de muestra de cada una a un laboratorio certificado, los análisis que se realizó fue la composición química por fases por el método de Difracción de Rayos X (DRX) y composición química expresados en óxidos y elementos por el método Fluorescencia de Rayos X (EDX).

2.3. Pre-oxidación del arsénico

La oxidación del arsénico As total de agua subterránea se realizó colocando las muestras de agua a cantidad de 1000 ml en vasos precipitados, seguidamente se añade 2 gotas de hipoclorito de sodio al 5% al mismo tiempo agitando con una varilla de vidrio para su mezcla, luego se dejó actuar por una hora, de esta manera se realizó a 54 vasos antes de los tratamientos.

2.4. Experimentación de remoción de arsénico

Con el objeto de remover la concentración de arsénico encontrado en agua subterránea se realizó experimentos con variables de tiempo de contacto, pH y a condiciones de trabajo constante de agitación de 150 rpm por 01 minutos (mezcla rápida), 40 rpm (mezcla lenta) y cantidad de adsorbente de 18 gramos de las muestras de arcillas de Asillo (A) y Conima (B).

Después de la pre-oxidación en los vasos precipitados se ajustó el pH natural del agua a tratar de 7.16 a 5 ó 10 empleando soluciones concentradas de Ácido Clorhídrico (HCl) o Hidróxido de Sodio (NaOH) a 0.5 M agitándose manualmente con una varilla de vidrio, seguidamente los vasos se colocaron en el equipo de prueba de jarra VELT, luego se agregó el adsorbente arcilla en seguida se puso a programar el equipo VELT a mezcla rápida de 150 rpm durante 1 min y mezcla lenta de 40 rpm con tiempos de 30,60 o 90 min, con tiempo de sedimentación de 1 hora.

Luego de los tratamientos, por medio de sifones se tomaron las muestras de 500 ml de cada vaso, para la recepción por parte del laboratorio, el procedimiento, preservación y materiales utilizados se llevaron a cabo de acuerdo a la Resolución Directoral N° 160-2015-DIGESA-SA.

2.5. Procesamiento de datos experimentales

La capacidad de remoción de las arcillas se determinó de acuerdo a la Ecuación 1 (Leyva Ramos et al. 2001).

$$R(\%) = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} * 100 \quad (1)$$

Donde R es el porcentaje de remoción (%), Co es la concentración inicial (mg/L As) y Cf es la concentración final (mg/L As).

Los datos se insertaron al programa IBM SPSS Statistics 21 utilizando el diseño factorial $2A \times 3B \times 3C$ con interacciones A*B, A*C, B*C y A*B*C a fin de observar los efectos entre los factores y la significancia en la remoción del arsénico (Bao 2020).

3. Resultados y discusión

3.1. Calidad del agua subterránea utilizada en los experimentos

La Tabla 1 presenta los resultados de análisis de los parámetros de calidad del agua subterránea utilizada en los experimentos, donde el parámetro a intervenir As presenta un valor de 0.0698 ppm siendo mayor de lo recomendado para consumo humano por la Organización Mundial de la Salud (WHO 2011) y por Decreto Supremo. N° 031-2010-SA/Ministerio de Salud/Perú, así mismo este valor encontrando de As es mayor en las muestras de caracterización de agua subterránea realizadas en la Región Autónoma de Mongolia, China, (Zhao et al. 2022) y en las muestras de agua subterránea de los pozos entubados domésticos y comunitarios del distrito de Murshidabad de Bengala Occidental, India (Das et al. 2021), con valores de 0.0200mg/L y 0.0100 mg/L de As respectivamente. Este contenido elevado de As en las aguas subterráneas se reconoce como una amenaza tanto para los riesgos cancerígenos como no cancerígenos para la salud humana (WHO 2011) y su exposición como agua potable para consumo humano puede aumentar un riesgo de enfermedades crónicas cardiovasculares y otros problemas de salud para los residentes de la zona (Wade et al. 2015).

Tabla 1

Análisis de la calidad del agua subterránea de la urbanización Taparachi-Juliaca-Puno

Parámetro físico-químico	Unidad	Valor	Estándares de calidad del agua para consumo humano	
			Organización Mundial de la Salud (WHO 2011)	Decreto Supremo N° 031-2010-SA/Perú (DIGESA 2011)
Conductividad	uS/cm	1 062	--	1 500
Temperatura	°C	16-18	--	--
Potencial hidrogeno	pH	7.16	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5
Solidos Totales Suspendidos	mg/L	<2.5	500	1 000
Oxígeno Disuelto	mg/L	5.03	--	>=6
Aluminio (Al)	mg/L	0.020	--	0.200

Arsénico (As)	mg/L	0.0698	0.01	0.01
Bario (Ba)	mg/L	0.155	0.700	0.700
Boro (B)	mg/L	0.145	0.300	0.500
Calcio (Ca)	mg/L	119	300	--
Hierro (Fe)	mg/L	0.014	0.300	0.300
Magnesio (Mg)	mg/L	31.50	30	--
Níquel (Ni)	mg/L	0.002	0.020	0.020
Sodio (Na)	mg/L	38.10	200	200
Zinc (Zn)	mg/L	0.049	3	3

Por otro lado, el valor de la conductividad de 1 062 uS/cm podría indicar que esta enriquecido con sales disueltas; el Magnesio (31.50 mg/L) se encuentra presente sobrepasando en una mínima cantidad el estándar de calidad de agua para consumo humano lo que le da un mal sabor al agua, sin embargo los demás valores de los parámetros metales están dentro de los estándares de calidad de agua para consumo humano establecidos por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Perú en el Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA/ Ministerio de Salud (DIGESA 2011).

3.2. Caracterización de la arcilla natural (Chaco)

3.2.1. Análisis de difracción de rayos X (RDX).

Las Figura 1 y 2 muestran los análisis de la composición química mineralógica obtenidos por el método Difracción de Rayos X para los dos tipos de arcilla natural (Chaco) A y B, según los resultados ambas arcillas se componen principalmente de abundante mineral de cuarzo, sin embargo, la arcilla B muestra picos elevados de cuarzo con 44%, mientras que la arcilla A presenta 26.6%; los minerales albita, sanidina y caolinita solo se presentan en la arcilla A, mientras en la arcilla B se presentan minerales como: hematita y magnetita (óxido de hierro), anortita y anatasa.

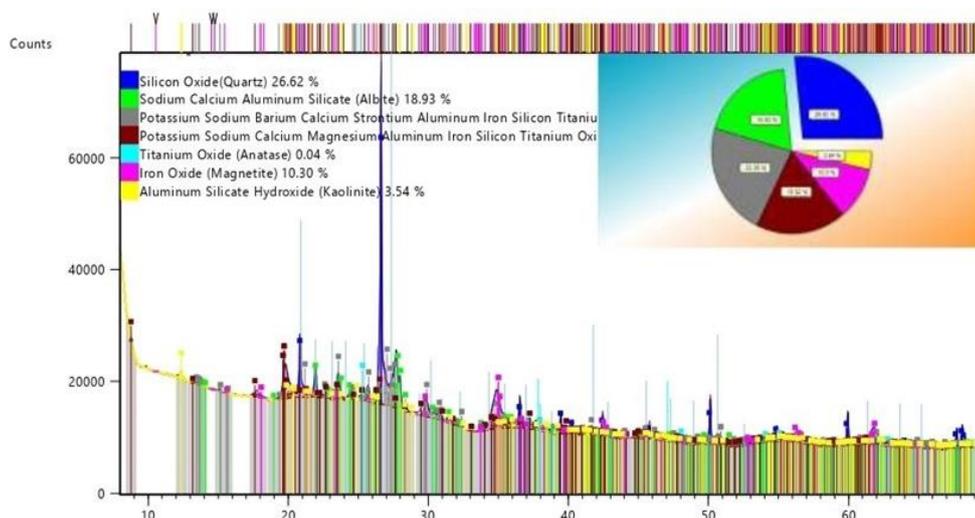


Figura 1 Difractograma de DRX de la arcilla natural A

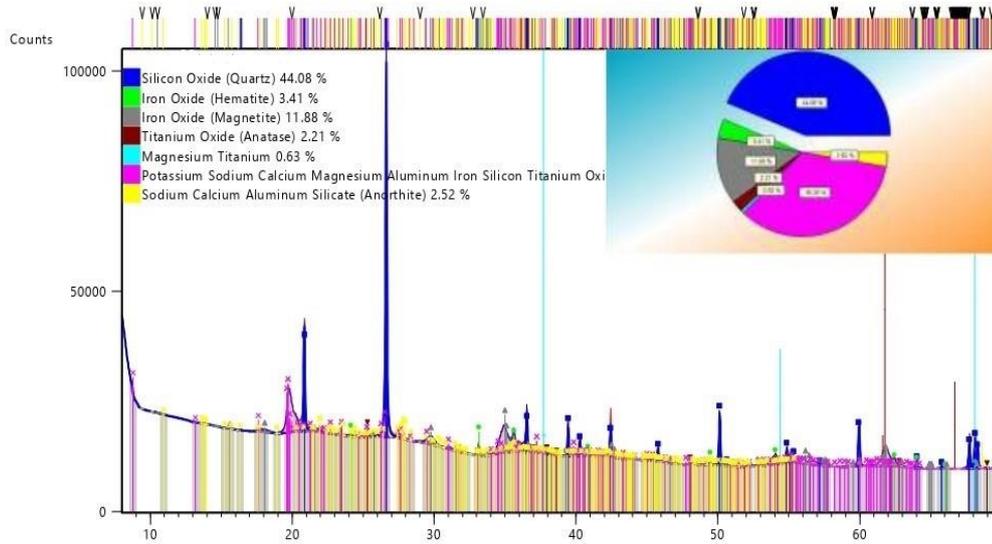


Figura 2 Difractograma de DRX de la arcilla natural B

3.2.2. Análisis de difracción de rayos X (RDX).

Los datos de fluorescencia de rayos X de las muestras se presentan en la Tabla 2. Según los resultados las arcillas A y B presentan composiciones elevadas de SiO_2 como el óxido principal con 60.211 y 60.754 %, su alto porcentaje se relaciona a la presencia de cuarzo como el mineral principal. Se encontró Al_2O_3 , con 28.4% para arcilla A y 26% para arcilla B este oxido podría atribuirse a la presencia del mineral feldespato en estos tipos de arcilla Chaco.

También, se notó el contenido de Fe_2O_3 con 3.16 y 5.51%, MgO con 2.3 y 2.96%, K_2O 3.16 y 1.48%, el CaO con 0.88 y 1.09% para las arcillas A y B, respectivamente. También se encontraron otros compuestos que están por debajo del 1% en este tipo de arcillas Chaco como el MnO , SrO , Rb_2O , ZrO_2 , V_2O_5 , ZnO , Y_2O_3 y BaO .

Tabla 2

Análisis de composición química de las arcillas (Chaco)

Composición Química Elemental	Valor (%)		Composición Química Expresada En Óxido	Valor (%)	
	Arcilla (A)	Arcilla (B)		Arcilla (A)	Arcilla (B)
Silicio, Si	56.367	56.160	Óxido de silicio, SiO_2	60.211	60.754
Aluminio, Al	24.030	22.394	Óxido de aluminio, Al_2O_3	28.410	26.027
Potasio, K	6.980	3.070	Óxido de potasio, K_2O	3.255	1.486

Hierro, Fe	6.445	10.800	Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	3.163	5.519
Magnesio, Mg	1.990	2.588	Óxido de magnesio, MgO	2.333	2.967
Calcio, Ca	1.714	2.008	Óxido de calcio, CaO	0.882	1.098
Titanio, Ti	1.137	1.110	Óxido de titanio, TiO ₂	0.686	0.711
Azufre, S	0.569	0.777	Óxido de azufre, SO ₃	0.569	0.800
Fósforo, P	0.330	0.335	Óxido de fósforo, P ₂ O ₅	0.304	0.318
Manganeso, Mn	0.101	0.065	Óxido de manganeso, MnO	0.045	0.031
Estroncio, Sr	0.094	0.063	Óxido de estroncio, SrO	0.035	0.024
Rubidio, Rb	0.072	0.044	Óxido de rubidio, Rb ₂ O	0.025	0.015
Circonio, Zr	0.069	0.130	Óxido de zirconio, ZrO ₂	0.029	0.055
Vanadio, V	0.051	-	Óxido de vanadio, V ₂ O ₅	0.033	-
Cinc, Zn	0.036	-	Óxido de cinc, ZnO	0.014	-
Itrio, Y	0.012	0.016	Óxido de itrio, Y ₂ O ₃	0.005	0.006
Bario, Ba		0.441	Óxido de bario, BaO	-	0.189

El empleo de las arcillas naturales como adsorbentes fue investigado por varios estudios debido a su bajo costo, alta abundancia natural y su gran cantidad de propiedades con gran área de superficie específica, excelente capacidad para intercambiar cationes y aniones y tendencia a adsorber en su espacio entre capas (Nayak and Singh 2007). Poseen 2:1 o estructura de capa 1:1 resultante de la condensación de sílice alternante capas tetraédricas (SiO₄) y capas octaédricas de aluminio [Al(OH)₃]. Las superficies de las arcillas se caracterizan por una carga negativa permanente debida a la sustitución isomórfica, exhibiendo en consecuencia una baja capacidad de adsorción de algunos elementos aniónicos (Ren et al. 2014).

La adsorción de arsénico mejoró cuando las superficies de arcilla se recubrieron con óxido de Fe, Al y Ca, Mohapatra et al. (2007), investigó el comportamiento del arsénico en suelos naturales y se demostró que la adsorción de As se potenciaba en presencia de altos contenidos de óxidos de hierro y cuando los compuestos de hierro (natural o sintético) entran en contacto con el agua, se comportan como coloides positivos, y como tales tienen la capacidad de fijar, por adsorción, los aniones. Entre las especies más peligrosas que se adsorben con gran facilidad, están las especies de cromo (Cr⁶⁺) y de arsénico (H₂AsO₄⁻, AsO₄³⁻, entre otros). Es así que

los compuestos de hierro poseen la gran capacidad natural de depurar aguas contaminadas (naturales o industriales) con elementos tóxicos como el arsénico (Alarcon H., Llorens, and Poch 2012).

3.3. Efectos del tiempo de contacto en la remoción de Arsénico

El efecto del tiempo de contacto en la adsorción de Arsénico por las arcillas A y B se evaluó variando el tiempo de contacto de 30, 60 y 90 min. Los resultados se presentan en la Figura 3. Observando que el porcentaje de remoción de Arsénico para las arcillas A y B desde el minuto cero fue de manera exponencial llegando a 58.45 y 78.51% respectivamente. Sin embargo, observamos también que la arcilla B entre el tiempo de 60 y 90 minutos el porcentaje de remoción eran cercanas, comportándose de forma lineal, de manera contraria ocurrió con la arcilla A, ya que, se observa que en los tiempos de 30 y 60 la remoción se mantuvo con 58%, luego llegando a los 90 minutos la remoción fue exponencial llegando a 69.91. Entonces podríamos indicar que la arcilla B llega a su máxima adsorción del arsénico entre los tiempos de 60 a 90 minutos de esta manera llegando a su punto de equilibrio, mientras que con la arcilla A el proceso de adsorción es lenta debido a que la máxima adsorción fue a los 90 minutos.

Este resultado podría ser comparable con la investigación de Mudzielwana et al. (2019), en la que utilizó como adsorbente arcilla de aluminosilicato 57% óxido de Si y 22% óxido de Al, en la que la adsorción fue rápida dentro de los primeros 60 min y posteriormente se ralentizó y alcanzó 70% a 80% de remoción de arsénico III y V. Estos resultados porcentuales podría ser debido a la saturación o falta de espacio entre las capas de superficie de las arcillas para la adsorción de iones arsenicales.

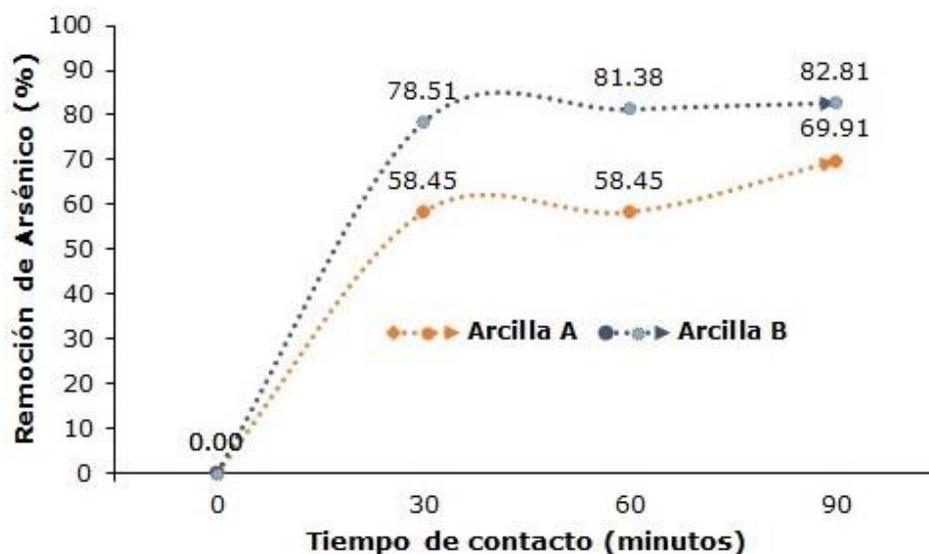


Figura 3 Porcentaje de remoción de As a diferentes tiempos de contacto

3.4. Efecto del pH en la remoción de Arsénico

El pH es un factor importante en la adsorción del As, por lo que se evaluó su efecto, experimentando con el pH natural del agua (7.16), pH 5 y 10. La Figura 4. muestra que la remoción de Arsénico es alta a pH 5 con 69.91% y 82.1% para las arcillas A y B respectivamente. Según Pierce & Moore (1982), con valores de pH ácido la remoción de As es apreciable típicamente para óxidos de Al y Fe, esta afirmación lo vemos de acuerdo en la Tabla 2 presentando que la arcilla A y B contiene este tipo de óxidos, así mismo, Fakhreddine & Fendorf (2021), indica que el óxido de hierro es la que tiene mayor afinidad para adsorber el ion arseniato con pH ácido, motivo por el que arcilla B obtuvo mayor porcentaje de remoción debido a su cantidad de óxido de hierro (5.5%) más que el de la otra arcilla A (3.1%).

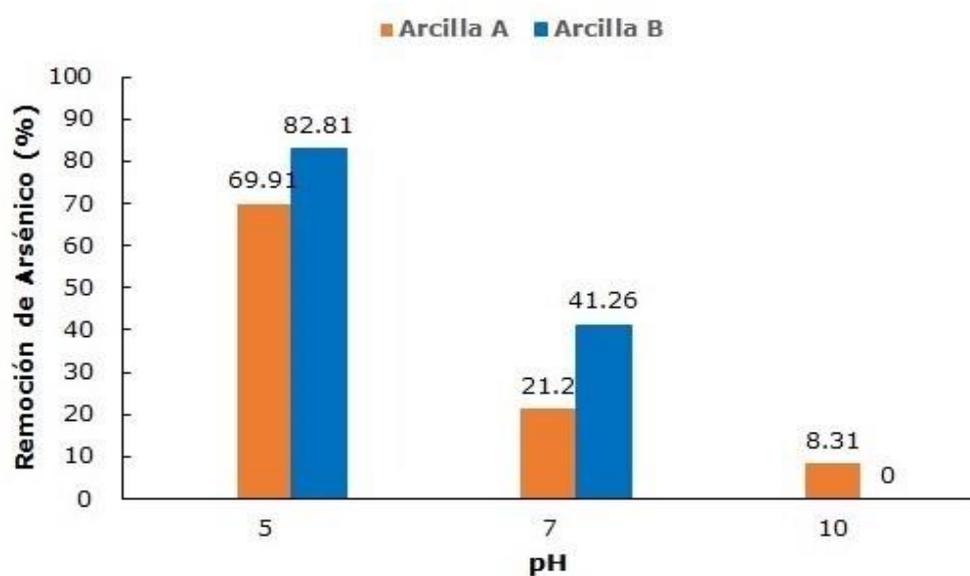


Figura 4 Porcentaje de remoción de As a diferentes pH

Por otro lado, a pH 10 alcalino la remoción es muy baja para arcilla A y para la arcilla B a esta condición no hubo resultados, esto podría explicarse por Bentahar et al. (2016), que indica que a valores extremadamente ácidos o alcalinos puede ocurrir la hidrólisis de la arcilla, lo que lleva a una solubilización parcial de los minerales, este fenómeno puede provocar una disminución de capacidad de adsorción de la fase sólida o así mismo mejorar la coprecipitación de As (V) con calcio hierro y magnesio disueltos, en tanto, podríamos indicar que la capacidad de remoción está influenciado por los cambios de pH, siendo fuertemente relacionados con interacciones electrostáticas.

3.5. Diseño factorial en la remoción del Arsénico

Con el diseño factorial 2Ax3Bx3C se realizó interacciones entre los factores para observar el efecto significativo en la remoción del As, trabajándose a un nivel de confianza de 95%, siendo, p Valor igual a 0.05 para establecer la significancia de los factores, obteniéndose Tabla 3 siguiente de resultado estadístico.

Tabla 3

Resumen estadístico de la significancia de los factores en la remoción de As

Factores y sus interacciones	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	Significación
A: Tipo de adsorbente	1,890.020	1	1,890.020	22.820	0.000
B: Tiempo de agitación (minuto)	348.787	2	174.393	2.106	0.137
C: pH	44,127.365	2	22,063.683	266.391	0.000
A * B	566.027	2	283.013	3.417	0.044
A * C	6,167.508	2	3,083.754	37.232	0.000
B * C	725.792	4	181.448	2.191	0.090
A * B * C	57.150	4	14.288	0.173	0.951
Error	2,981.675	36	82.824		
Total, corregida	56,864.324	53			

Se observa que los factores de tipo de adsorbente (A) y pH (C) y su interacción A*C son altamente significativos en la remoción del arsénico total, ya que presenta valor de significancia de 0.000 y la interacción A*B es significativa siendo menores al $p < 0.05$. por otro lado, el factor de tiempo de agitación o contacto (B) y las demás interacciones no son significativos en la remoción de As, ya que son mayores al valor de significancia de 0.05. Estos datos estadísticos están relacionados con los resultados de los efectos entre los factores discutidos anteriormente.

4. Conclusiones

Según los resultados de la investigación la arcilla natural denominada comúnmente “Chaco” remueve arsénico natural de las aguas subterráneas en el altiplano peruano, siendo factible como adsorbente natural, ya que la arcilla A y B sin ningún tipo de modificación, obtuvieron resultados significativos de remoción de As obteniéndose promedios de hasta 82% de remoción con arcilla B.

Tras evaluar los resultados los factores pH y tiempo de contacto destacaron un papel importante en la remoción del As, ya que a pH ácido 5 y tiempo de contacto de 90 minutos se

obtuvieron mejores resultados reduciendo la concentración del As de 0.698 mg/L a 0.011 mg/L, consiguiendo un valor permisible establecido por la OMS (0.1 mg/L) para consumo humano.

En el diseño estadístico factorial 2Ax3Bx3C, los factores de tipo de adsorbente y pH y su interacción obtuvo un valor de significancia de $0.000 < 0.05$, siendo altamente significativo evidenciando su influencia en la remoción de arsénico.

Los análisis por Difracción de Rayos X (DRX) de la arcilla natural B “Chaco” de la zona de Conima mostró un alto contenido de óxido de silicio (cuarzo) y óxido de hierro (hematita y magnetita), podría decirse que este último contribuyó al aumento del porcentaje de remoción en todos los tratamientos, dándose lugar a la importancia seguir estudios e investigación a este tipo de arcilla natural para la adsorción de As de aguas subterráneas.

Referencias

- Alarcon H., Teresa, Esther Llorens, and Manel Poch. 2012. *Remoción de Arsénico Del Agua Para Consumo Humano En Latinoamérica*. Vol. 1. Primera. edited by M. Lopez Carrasco. Mexico.
- Bao, Sheila Fernández. 2020. “Diseño de Experimentos : Diseño Factorial.” Universitat Politècnica de Catalunya.
- Bentahar, Yassine, Charlotte Hurel, Khalid Draoui, Slimane Khairoun, and Nicolas Marmier. 2016. “Adsorptive Properties of Moroccan Clays for the Removal of Arsenic(V) from Aqueous Solution.” *Applied Clay Science* 119:385–92.
- Boglione, Rosana, Carina Griffa, María Cecilia Panigatti, Susana Keller, María Celeste Schierano, and Melina Asforno. 2019. “Arsenic Adsorption by Soil from Misiones Province, Argentina.” *Environmental Technology and Innovation* 13:30–36.
- Borho, M., and P. Wilderer. 1996. “Optimized Removal of Arsenate(III) by Adaptation of Oxidation and Precipitation Processes to the Filtration Step.” *Water Science and Technology* 34(9 pt 5):25–31.
- Burakov, Alexander E., Evgeny V. Galunin, Irina V. Burakova, Anastassia E. Kucherova, Shilpi Agarwal, Alexey G. Tkachev, and Vinod K. Gupta. 2018. “Adsorption of Heavy Metals on Conventional and Nanostructured Materials for Wastewater Treatment Purposes: A Review.” *Ecotoxicology and Environmental Safety* 148(148):702–12.
- Chakraborti, Dipankar, Mohammad Mahmudur Rahman, Bhaskar Das, Amit Chatterjee, Dipankar Das, Biswajit Nayak, Arup Pal, Uttam Kumar Chowdhury, Sad Ahmed, Bhajan Kumar Biswas, Mrinal Kumar Sengupta, Md Amir Hossain, Gautam Samanta, M. M. Roy, Rathindra Nath Dutta, Khitish Chandra Saha, Subhas Chandra Mukherjee,

- Shyamapada Pati, Probir Bijoy Kar, Adreesh Mukherjee, and Manoj Kumar. 2017. “Contamination Des Eaux Souterraines En Arsenic et Ses Effets Sur La Santé En Inde.” *Hydrogeology Journal* 25(4):1165–81.
- Danil de Namor, Angela F., Abdelaziz El Gamouz, Sofia Frangie, Vanina Martinez, Liliana Valiente, and Oliver A. Webb. 2012. “Turning the Volume down on Heavy Metals Using Tuned Diatomite. A Review of Diatomite and Modified Diatomite for the Extraction of Heavy Metals from Water.” *Journal of Hazardous Materials* 241–242:14–31.
- Das, Antara, Madhurima Joardar, Ayan De, Deepanjan Mridha, Nilanjana Roy Chowdhury, Md Taimur Bin Kashim Khan, Partha Chakrabartty, and Tarit Roychowdhury. 2021. “Pollution Index and Health Risk Assessment of Arsenic through Different Groundwater Sources and Its Load on Soil-Paddy-Rice System in a Part of Murshidabad District of West Bengal, India.” *Groundwater for Sustainable Development* 15(April):100652.
- DIGESA. 2011. “Reglamento de La Calidad de Agua Para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA / Ministerio de Salud.” Pp. 40–46 in *Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA / Ministerio de Salud*. Lima, Perú: Harvard University Press.
- Fakhreddine, Sarah, and Scott Fendorf. 2021. “The Effect of Porewater Ionic Composition on Arsenate Adsorption to Clay Minerals.” *Science of the Total Environment* 785:147096.
- Goel, Rajeev, S. K. Kapoor, Kshipra Misra, and R. K. Sharma. 2004. “Removal of Arsenic from Water by Different Adsorbents.” *Journal of Chemical Technology* 11:518–25.
- Hansen, Henrik K., Patricio Núñez, and Rodrigo Grandon. 2006. “Electrocoagulation as a Remediation Tool for Wastewaters Containing Arsenic.” *Minerals Engineering* 19(5):521–24.
- Huaracha Astete, Josue Angel, and Leonela Quispe Flores. 2020. “Determinación de La Concentración de Arsénico En Aguas Subterráneas En Las Salidas: Puno, Lampa y Arequipa de La Ciudad de Juliaca – 2019.” Universidad Peruana Union.
- Leupin, Olivier X., and Stephan J. Hug. 2005. “Oxidation and Removal of Arsenic (III) from Aerated Groundwater by Filtration through Sand and Zero-Valent Iron.” *Water Research* 39(9):1729–40.
- Leyva Ramos, Roberto, Marco Antonio Sánchez Castillo, María Violeta Hernández Sánchez, and Rosa María Guerrero Coronado. 2001. “Remoción de Metales Pesados de Solución Acuosa Por Medio de Clinoptilolitas Naturales.” *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 17(3):129–36.

- Mamani Maquera, Wile. 2019. "Determinación de La Concentración de Arsénico Total En Las Aguas Subterráneas de Pozos Tubulares En El Distrito de Juliaca y Medidas de Mitigación." Universidad Nacional de San Agustín.
- Manning, Bruce A. 1996. "Modeling Arsenate Competitive Adsorption on Kaolinite, Montmorillonite and Illite." *Clays and Clay Minerals* 44(5):609–23.
- Mohapatra, Debasish, Debaraj Mishra, Gautam Roy Chaudhury, and Radhanath Prasad Das. 2007. "Arsenic Adsorption Mechanism on Clay Minerals and Its Dependence on Temperature." *Korean Journal of Chemical Engineering* 24(3):426–30.
- Mudzielwana, Rabelani, Muger Wilson Gitari, and Patrick Ndungu. 2019. "Performance Evaluation of Surfactant Modified Kaolin Clay in As(III) and As(V) Adsorption from Groundwater: Adsorption Kinetics, Isotherms and Thermodynamics." *Heliyon* 5(11):e02756.
- Nayak, P. S., and B. K. Singh. 2007. "Instrumental Characterization of Clay by FTIR, XRF, BET and, TPD-NH₃." *Bull. Mater. Sci.* 30(3):235–38.
- OMS. 2018. "Arsenic." Retrieved (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>).
- Parga, Jose R., David L. Cocke, Jesus L. Valenzuela, Jewel A. Gomes, Mehmet Kesmez, George Irwin, Hector Moreno, and Michael Weir. 2005. "Arsenic Removal via Electrocoagulation from Heavy Metal Contaminated Groundwater in La Comarca Lagunera Mexico." *Journal of Hazardous Materials* B124(8):247–254.
- Pierce, Matthew L., and Carleton B. Moore. 1982. "Adsorption of Arsenite and Arsenate on Amorphous Iron Hydroxide." *Water Research* 16(7):1247–53.
- Ren, Xiaohui, Zilong Zhang, Hanjin Luo, Bingjie Hu, Zhi Dang, Chen Yang, and Luye Li. 2014. "Adsorption of Arsenic on Modified Montmorillonite." *Applied Clay Science* 97–98:17–23.
- Sarkar, Arpan, and Biswajit Paul. 2016. "The Global Menace of Arsenic and Its Conventional Remediation - A Critical Review." *Chemosphere* 158:37–49.
- SEDAJULIACA. 2018. *Memoria Anual 2018-EPS-SEDA Juliaca*.
- Shaji, E., M. Santosh, K. V. Sarath, Pranav Prakash, V. Deepchand, and B. V. Divya. 2021. "Arsenic Contamination of Groundwater: A Global Synopsis with Focus on the Indian Peninsula." *Geoscience Frontiers* 12(3).
- Sharma, Virender K., Paritam K. Dutta, and Ajay K. Ray. 2007. "Review of Kinetics of Chemical and Photocatalytical Oxidation of Arsenic(III) as Influenced by PH." *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and*

Environmental Engineering 42(7):997–1004.

- Solgi, Eisa, and Mohammadreza Jalili. 2021. “Zoning and Human Health Risk Assessment of Arsenic and Nitrate Contamination in Groundwater of Agricultural Areas of the Twenty Two Village with Geostatistics (Case Study: Chahardoli Plain of Qorveh, Kurdistan Province, Iran).” *Agricultural Water Management* 255(February):107023.
- Wade, Timothy J., Yajuan Xia, Judy Mumford, Kegong Wu, X. Chris Le, Elizabeth Sams, and William E. Sanders. 2015. “Cardiovascular Disease and Arsenic Exposure in Inner Mongolia, China: A Case Control Study.” *Environmental Health: A Global Access Science Source* 14(1):1–10.
- WHO, Geneva. 2011. “Guidelines for Drinking-Water Quality.” *World Health Organization* 216:303–4.
- Wickramasinghe, S. R., Han Binbing, J. Zimbron, Z. Shen, and M. N. Karim. 2004. “Arsenic Removal by Coagulation and Filtration: Comparison of Groundwaters from the United States and Bangladesh.” *Desalination* 169(14):231–44.
- Zaw, Myint, and Maree T. Emmett. 2002. “Arsenic Removal from Water Using Advanced Oxidation Processes.” *Toxicology Letters* 133(1):113–18.
- Zehhaf, A., A. Benyoucef, C. Quijada, S. Taleb, and E. Morallón. 2015. “Algerian Natural Montmorillonites for Arsenic(III) Removal in Aqueous Solution.” *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(2):595–602.
- Zhao, Chen, Xingguang Zhang, Xin Fang, Nan Zhang, Xiaoqian Xu, Lehui Li, Yan Liu, Xiong Su, and Yuan Xia. 2022. “Characterization of Drinking Groundwater Quality in Rural Areas of Inner Mongolia and Assessment of Human Health Risks.” *Ecotoxicology and Environmental Safety* 234(March):113360.