



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Remoción de arsénico por
medio de filtro de diatomea**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Arnold Misraim González Eufracio

DIRECTORA DE TESIS

Dra. María del Rosario Iturbe Argüelles



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Agradecimientos

Para todas aquellas personas que me tuvieron paciencia
y me tendieron la mano en los momentos que más lo necesité,
gracias.

Contenido

LISTA DE IMÁGENES.....	4
LISTA DE TABLAS.....	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	8
2.1 PROBLEMÁTICA	8
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	10
2.3 OBJETIVO GENERAL	12
2.4 OBJETIVOS PARTICULARES	12
2.5 HIPÓTESIS.....	12
3. MARCO TEÓRICO	13
3.1 ARSÉNICO.....	13
3.2 DIATOMEAS.....	15
4. METODOLOGÍA.....	17
4.1 EXPERIMENTO 1	19
4.2 EXPERIMENTO 2	20
4.3 EXPERIMENTO 3	21
4.4 EXPERIMENTO 4	22
4.4.1 <i>Preparación de las muestras de diatomea para análisis por microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)</i>	<i>23</i>
4.5 EXPERIMENTO 5	24
4.5.1 <i>Cantidad de diatomea a utilizar</i>	<i>24</i>
4.5.2 <i>Cantidad de pentóxido de arsénico pentahidratado a utilizar</i>	<i>25</i>
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
5.1 EXPERIMENTO 1	26
5.2 EXPERIMENTO 2	26
5.3 EXPERIMENTO 3	28
5.4 EXPERIMENTO 4	29
5.5 EXPERIMENTO 5	30

5.6	RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	31
5.6.1	CEL-2	31
5.6.2	CEL-3	33
5.6.3	CEL-5	35
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	38
8.	REFERENCIAS.....	40

Lista de Imágenes

Imagen 1 Diatomeas utilizadas en la experimentación. (A) Diatomea HYCEL, (B) Diatomea CELITE.....	17
Imagen 2 Pentóxido de arsénico pentahidratado.....	18
Imagen 3 Disposición general de columnas.....	19
Imagen 4 Columnas instaladas en el experimento 2.....	20
Imagen 5 Columnas en el experimento 3.....	21
Imagen 6 Apelmazamiento de Diatomea CELITE.....	21
Imagen 7 Columnas en el experimento 4.....	22
Imagen 8 Muestras de diatomea para análisis por microscopio electrónico de barrido.	23
Imagen 9 Micrografía CEL-2 a 5000 aumentos.....	31
Imagen 10 Micrografía CEL-2 a 500 aumentos.....	32
Imagen 11 Micrografía CEL-3 a 3500 aumentos.....	33
Imagen 12 Micrografía CEL-3 a 10000 aumentos.....	34
Imagen 13 Micrografías de CEL-5 a 500 aumentos.....	35

Lista de Tablas

Tabla 1 Cantidad de compuesto necesario	25
Tabla 2 Resultados de experimento 2.....	26
Tabla 3 Resultados experimento 3.....	28
Tabla 4 Resultados experimento 4.....	29
Tabla 5 Resultados experimento 5.....	30
Tabla 6 Composición química de diatomea CEL-2 a 5000 aumentos.....	31
Tabla 7 Composición química de diatomea CEL-2 a 500 aumentos	32
Tabla 8 Composición química CEL-3 a 3500 aumentos.....	33
Tabla 9 Composición química CEL-3 a 10000 aumentos.....	34
Tabla 10 Composición química CEL-5 (espectro 1)	35
Tabla 11 Composición química CEL-5 (espectro 5)	35

1. Introducción

La importancia del agua en el desarrollo y prosperidad de una sociedad es fundamental, conocer maneras de purificación es y ha sido tema de interés y debate a lo largo de la historia de la humanidad. En el caso concreto de México, una de las principales problemáticas relacionadas con el agua para consumo humano es el alto contenido de metales pesados como el arsénico. Este elemento puede ser encontrado de manera natural (asociado a unidades geológicas) o ser de origen antropogénico (contaminación por actividades mineras). Varios estudios sustentan esta problemática, ejemplos de esto son los estados de Colima, Coahuila y Guanajuato, por mencionar algunos.

Por esta razón, encontrar métodos eficaces para la remoción de sustancias tales como el arsénico resulta importante. La investigación en este rubro es extensa, desde la búsqueda de métodos viables como los materiales necesarios para llevar a cabo la remoción de este tipo de sustancias hasta la implementación de programas en las zonas afectadas por esta problemática.

Ahora bien, el arsénico como elemento es común en gran cantidad de minerales, por su parte, en las aguas naturales subterráneas se encuentra como especie disuelta. Las propiedades tóxicas de este elemento son altamente conocidas en el mundo de la farmacéutica y sus usos no sólo se relacionan con esta industria, sino que se extienden desde el sector industrial hasta el sector agrícola.

Mientras tanto, la importancia de las diatomeas radica en sus propiedades y características. Las diatomeas son organismos unicelulares presentes en el planeta desde hace millones de años y las rocas asociadas a ellas son llamadas diatomititas. Algunas de las propiedades de las diatomeas es su capacidad de filtración y su uso es bien conocido, además de esto, las diatomeas pueden ser utilizadas como indicadores ambientales y ser un parámetro para conocer las condiciones de cuerpos de agua.

Los mecanismos que existen para la remoción de arsénico en la actualidad son muy variados, estos van desde la precipitación del elemento o compuesto de interés, la adsorción de este, la coagulación y floculación; hasta métodos por cambio iónico.

Sin embargo, gran parte de estos métodos no son aplicables o viables en zonas donde la población no tiene forma de acceder ellos. Ya que generalmente los problemas relacionados con altos contenidos de arsénico se encuentran en poblaciones con escasa actividad económica o con un nivel de desarrollo bajo, lo cual imposibilita la incorporación de estos sistemas a la sociedad que los requiere.

Así pues, en este trabajo se estudia una metodología sencilla llevada a cabo bajo condiciones controladas, además de los factores que intervienen en la eficacia para la remoción de arsénico disuelto en agua por medio de una capa de diatomeas.

2. Planteamiento del proyecto

2.1 Problemática

El agua como parte del desarrollo de una sociedad funge el papel de piedra angular, ya que, sin ella, cualquier ser vivo está destinado a morir. Es por eso por lo que es de vital importancia su cuidado y por supuesto, tener un método seguro y eficaz para su purificación. En México y en muchos otros países, la problemática asociada a los altos contenidos de metales pesados en el agua utilizada para consumo humano se ha visto desde hace tiempo atrás, sin embargo, hasta ahora este tipo de problemas persiste en la sociedad y aún hay mucho por resolver.

De acuerdo con Cortés et al. (2012), la principal fuente para la obtención de agua en México es el agua subterránea, la mayor parte de este recurso está o ha estado almacenado en acuíferos permeables que, debido a la gran demanda de este líquido, los pozos que se construyen son cada vez más profundos. Esto conlleva a que el agua obtenida tenga compuestos naturales que son dañinos para la salud humana. En este caso en específico, se hablará en el presente trabajo sobre los contenidos de arsénico en el agua.

Por su parte, las causas de la presencia de arsénico en el agua para consumo humano se pueden inferir a partir de la geología regional, del estudio del comportamiento piezométrico de pozos y norias construidas a lo largo de la zona y la hidrogeoquímica local. Concretamente, en el Valle de Zimapán el comportamiento de los acuíferos y las fallas a lo largo de la geología regional facilitan el contacto con los minerales de la zona (por ejemplo, arsenopirita), favoreciendo el arrastre de compuestos de arsénico y su interacción con aguas subterráneas (Armienta & Rodríguez, 1996).

Ahora bien, la problemática que conlleva la obtención de agua con altos contenidos de arsénico en el país es bien conocida por las poblaciones afectadas por este problema. Por ejemplo, un estudio realizado en 2017 menciona que 29 de 36 pozos (80%) en el estado de Colima, contienen arsénico en concentraciones superiores a los límites permisibles impuestos por el gobierno del país, (Mendoza-Cano et al., 2017).

Otro claro ejemplo de esta situación se encuentra en la zona norte y noreste de Guanajuato, aquí, se llevaron a cabo estudios por el Centro de Geociencias de la UNAM en colaboración con los Consejos para el Desarrollo Regional del Norte y Noreste de Guanajuato, concluyendo que las concentraciones de arsénico en el agua tienen su origen en la interacción del agua con la roca que la contiene y, que fácilmente sobrepasan los límites establecidos, (Ortega-Guerrero, 2009).

Los problemas de salud relacionados con el consumo de altas concentraciones de arsénico se estudiaron en México desde hace décadas. Albores et al. (1979), después de estudiar dos poblaciones en el estado de Coahuila; El Salvador de Arriba y San José de Viñedo, concluyeron que, la mayor parte de la primera población, expuesta a concentraciones de arsénico elevadas tenía manifestaciones cutáneas relacionadas con la ingestión crónica de arsénico en el agua.

Es claro que las concentraciones de arsénico en el agua para consumo humano pueden tener consecuencias negativas para la sociedad que la consume, por ello es de vital importancia comprender este problema y crear soluciones de tratamiento de agua para mantener los niveles de este y otros elementos tóxicos para la salud humana en niveles que se encuentren dentro de la normatividad. De acuerdo con la norma oficial mexicana, el límite permisible para arsénico en agua es de 0.025 mg/L, el cual se ajustará gradualmente hasta alcanzar un límite permisible de 0.01 mg/L (NOM-127-SSA1-2021).

2.2 Justificación

La remoción de sustancias tóxicas del agua ha sido tema de interés desde que se relacionaron los problemas de salud de la población con la ingesta de agua contaminada y de baja calidad. Por este motivo, la investigación en este rubro cobra importancia. Conocer métodos efectivos y novedosos de tratamiento de agua que den solución a esta problemática es el objeto de este trabajo, así como de muchos otros que se han llevado a cabo y que se realizarán en el futuro.

Considerando el alto costo que puede suponer el uso de materiales sintéticos para la remoción de arsénico, Acuña-Piedra et al. (2016), se encargaron de investigar materiales naturales de origen local o de bajo costo con el objetivo de encontrar opciones viables y favorables para ser consideradas dentro de los procesos de purificación de agua. Con esto en mente, uno de los materiales que se consideró como material potencial de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano dentro de esta investigación fue la diatomita (roca generada a partir de las diatomeas), ya que, dadas sus características de adsorción ha presentado buenos resultados en la remoción de metales pesados como el plomo, la plata, cromo, níquel y zinc.

Por su parte, Petrusevski et al. (2002), investigaron sobre la eficiencia en la remoción de arsénico en sistemas de filtrado simples con adsorbentes como arena recubierta de hierro y carbón activado granular impregnado de hierro. Estos sistemas fueron llamados sistemas experimentales en el lugar de uso (Point-of-use, POU por sus siglas en inglés), encontrando una estrecha relación entre la cantidad de adsorbente, los tiempos de adsorción y el incremento y decremento del pH con la eficiencia de adsorción.

Estas investigaciones se realizaron con la finalidad de encontrar sistemas de filtrado que se puedan llevar a cabo en zonas rurales o de escasos recursos que no cuentan con sistemas de purificación centralizados y eficientes como los que se encuentran en las grandes urbes, así como encontrar materiales de fácil acceso que cuenten con las características necesarias para ser considerados como adsorbentes de bajo costo.

Así pues, en este trabajo se abordan varios parámetros considerados en los experimentos llevados a cabo por Petrushevski y compañía, tales como la cantidad de adsorbente (diatomea) presente en la remoción de arsénico, los tiempos de contacto entre la diatomea y la solución, además de la facilidad con la que se lleva a cabo la remoción. Todo esto con la misma finalidad: encontrar un sistema de remoción de arsénico simple, de bajo costo y que se pueda llevar a cabo en zonas donde sistemas complejos de purificación de agua son inviables de realizar.

2.3 Objetivo general

Conocer la eficiencia y comportamiento de dos tipos de diatomeas (Celita y Celite) en el proceso de remoción de arsénico en agua contaminada artificialmente en diversas situaciones de filtrado.

2.4 Objetivos particulares

- Identificar la diferencia en el comportamiento de las distintas diatomeas utilizadas.
- Probar los parámetros que influyen en la eficiencia de filtrado de las diatomeas utilizadas tales como: tiempo de adsorción y cantidad de diatomea utilizada en el proceso de filtración.

2.5 Hipótesis

La diatomea como material capaz de adsorber arsénico en el agua para consumo humano es eficaz para considerarse como principal material en el proceso de filtración de agua con altos contenidos de arsénico.

3. Marco teórico

3.1 Arsénico

El arsénico es un elemento que forma parte del grupo 15 de la tabla periódica, su número atómico es 33, existe de manera natural en muchas formas y está clasificado como un metaloide o semimetal, (Greenwood & Earnshaw, 1984).

El arsénico es un elemento calcófilo (que se asocia al azufre) que está presente como mayor constituyente en más de 200 minerales, siendo el más común de ellos la arsenopirita (FeAsS), sin embargo, algunos otros minerales como el rejalgar (AsS), el oropimente (As_2S_3) y la cobaltita (CoAsS) también contienen arsénico como componente. (Alloway et al., 2005).

En aguas naturales el arsénico se halla como especie disuelta, ésta, por lo común se puede encontrar como oxianión con arsénico en dos estados de oxidación: como arsenito o arsénico trivalente [As (III)] y como arseniato o arsénico pentavalente [As (V)]. Algunos de los factores que controlan la presencia y movilidad de este elemento son las condiciones redox del medio y el pH (Lillo, 2003).

De acuerdo con Huerta & Soberanis (2001), la forma pentavalente del arsénico se puede encontrar más frecuentemente en aguas superficiales ya que están más oxigenadas, por su parte, el arsénico trivalente se encuentra mayormente en aguas subterráneas.

Este tipo de ocurrencia natural puede afectar a grandes áreas y no siempre hay una relación directa entre el contenido de arsénico en el agua y el contenido de arsénico en los materiales que forman parte de los acuíferos que contienen el agua utilizada para consumo humano.

La toxicidad y peligrosidad del arsénico se conoce desde tiempos muy antiguos y su uso como remedio medicinal también, en el siglo XVIII se produjo una de las primeras soluciones con contenido de arsénico cuya composición era de arsenito de potasio al 1%, Carabantes & Fernicola (2003).

El arsénico no solamente es usado en farmacéutica, sus usos se extienden al sector agrícola e industrial. El trióxido de arsénico (As_2O_3) es un subproducto de operaciones en la fundición de metales (Gómez-Camirero et al., 2001).

Sin embargo, la exposición y consumo de arsénico prolongados ha sido tema de estudio en todo el mundo ya que muchos países luchan con este problema, entre los cuales se encuentran México, Bangladesh, Argentina, Chile, Estados Unidos, entre otros (Smedley & Kinniburgh, 2002).

El consumo de agua contaminada con arsénico provoca arsenicosis (HACRE) que es una serie de manifestaciones clínicas en el cuerpo humano. Dentro de estas manifestaciones puede haber hiperqueratosis y/o algunas lesiones de la piel. El consumo prolongado de agua con altas concentraciones de arsénico tiene una alta relación con el cáncer de vejiga y pulmón ya que el arsénico tiene capacidad mutagénica, teratogénica y carcinogénica (Litter, 2018; Carabantes & Fernicola, 2003).

3.2 Diatomeas

Las diatomeas son algas microscópicas unicelulares, las cuales están constituidas por paredes o frústulas de sílice. Estas frústulas están formadas por dos valvas sobrepuestas y su forma indica su clasificación y origen. Las diatomeas que tienen frústulas céntricas o radiales son en su mayoría, planctónicas (de origen marino), mientras que las que tienen frústulas en forma elíptica o simetría bilateral son llamadas diatomeas pennadas y se encuentran comúnmente en agua dulce (origen continental) (Vargas, 2007).

Este tipo de organismos unicelulares aparecieron hace millones de años durante el término del periodo cretácico e inicios del periodo terciario. Durante este periodo las diatomeas poblaron cuerpos de agua dulce y salada (Fernández, 2009).

Por otro lado, la roca que resulta de los procesos geológicos y que tiene como mayor constituyente a las diatomeas es llamada diatomita, esta roca es utilizada como recurso para la obtención de diatomeas fósiles o muertas.

Algunas de las propiedades que puede albergar este tipo de roca es que tiene una alta porosidad y capacidad para absorber líquidos, es químicamente inerte y tiene una capacidad abrasiva baja o suave (Borgel, 2007).

Aunado a esto, las diatomeas son utilizadas ampliamente como indicadores ambientales. Éstas, pueden ser un indicador autecológico para deducir las condiciones de contaminación de ríos o arroyos. Otro punto por considerar es que la diversidad en las diatomeas en la zona de estudio puede indicar cómo es que se encuentra la vida de esta ya que la diversidad de especies de diatomea varía mucho más en cada cambio de temporada respecto a la variación de otras especies en la misma zona (Smol & Stoermer, 2010).

El uso que se le puede dar a las diatomeas es mayormente como auxiliar en medios de filtración, además de ser usadas como material de relleno, como adsorbente e incluso como aislante. El polvo de diatomea puede ser usado de dos formas, una es como una capa de soporte para filtrar líquidos y la otra es agregar directamente el polvo al líquido, en cuyo caso el polvo atraparé directamente las partículas finas (Mathers, 1989).

La utilización de adsorbentes de bajo costo puede ser exitosamente aplicado en la remoción de arsénico en el agua. De acuerdo con Malik, A. H. et al. (2009) la adsorción requiere el uso de un medio granular adsorbente que remueva el arsénico del agua, sin la necesidad de ajustar el pH de la solución tratada. Los sistemas que tienden a usar este tipo de tecnologías requieren menores costos de operación y mantenimiento, además de exigir una pericia operativa menor que otros métodos actuales.

4. Metodología

En la actualidad existen diversos métodos para la remoción de arsénico, entre los cuales se encuentran la precipitación, la adsorción, métodos por cambio iónico, coagulación y floculación, y separación por membrana (Pal, 2015). Al tomar en cuenta los alcances de este trabajo el proceso de remoción que se escogió fue la adsorción ya que resulta ser un método sencillo y de fácil manejo.

La experimentación se llevó a cabo para conocer la eficiencia de filtración de arsénico por medio de diatomeas. Esta tomó en cuenta factores como el tiempo de filtración y la cantidad de diatomeas utilizadas (gramos). Para esta experimentación se utilizaron diatomeas de las marcas HYCEL (también conocida como CELITA) y CELITE, *Imagen 1*.

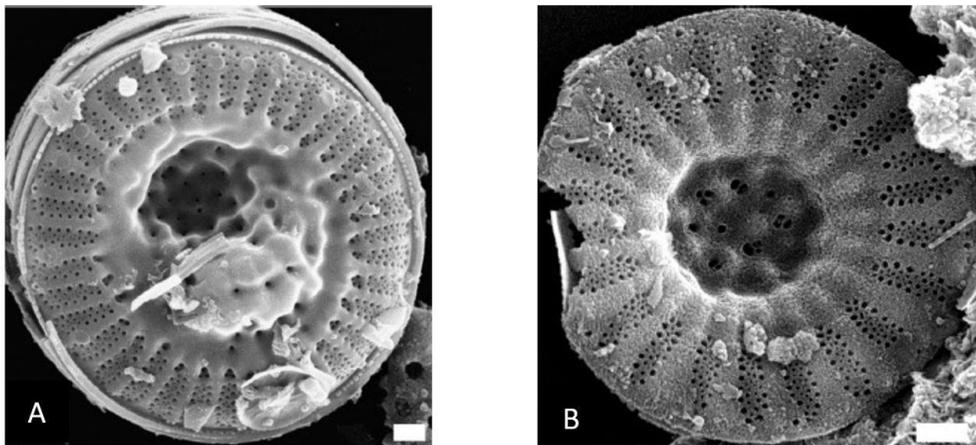


Imagen 1 Diatomeas utilizadas en la experimentación. (A) Diatomea HYCEL, (B) Diatomea CELITE.

A su vez, el compuesto de arsénico que se utilizó fue pentóxido de arsénico pentahidratado ($3\text{As}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), *Imagen 2*. Este se mezcló con agua destilada tipo 2 para obtener una solución la cual tuviese una concentración teórica inicial de arsénico de 100 mg/L. La cantidad de agua utilizada para los experimentos fue de 4-6 L, mientras que la cantidad de compuesto fue de 0.4-0.69 g. Con estas cantidades iniciales se esperó que la concentración de arsénico en solución fuese cercana a los 100 mg/L.

La experimentación se inició con el armado del equipo necesario que se utilizó a lo largo de esta. El equipo está constituido por siete columnas de acero inoxidable de 15 cm de altura y 8 cm de diámetro. Se instaló en la base de cada una de ellas un sistema de venoclisis que permitiera la regulación del afluente de líquido que puede pasar por ellas. Este sistema se conectó a las columnas por medio de una válvula de 1/4" (*Imagen 3*).

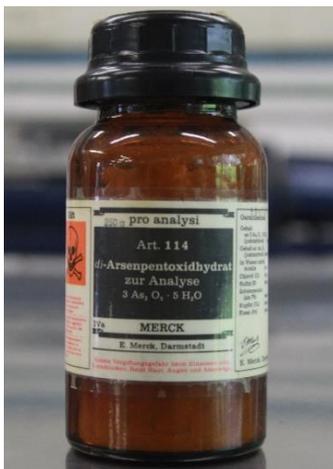


Imagen 2 Pentóxido de arsénico pentahidratado.

Cuando las columnas se terminaron de instalar se colocó en el fondo de ellas papel filtro para evitar el paso de la diatomea mezclada con la solución. Sobre este papel filtro se colocaron distintas cantidades de diatomea para conocer la relación que hay entre la cantidad de diatomea utilizada y la eficiencia de la adsorción y consecuente retención de arsénico presente en la solución.

Después de compactar la diatomea en el fondo de cada columna se procedió a colocar otro papel filtro más para evitar en la medida de lo posible la mezcla de la diatomea con la solución. Una vez terminado este proceso las columnas se colocaron en una estructura de solera de hierro para tener un mejor control a lo largo de la experimentación, como se muestra en la *Imagen 3*.

4.1 Experimento 1

Este experimento consistió en conocer los parámetros y factores que determinarían un mejor desarrollo de los experimentos siguientes. Se comenzó con el uso de papel filtro Watman 45 en la base de cada columna. Se agregó una capa de aproximadamente 1 cm de espesor de arena sílica (50 g) y una capa de diatomea. En este experimento tres de las columnas tuvieron 10 g de diatomea, otras tres de ellas tuvieron 20 g y la restante fue la columna testigo.

Se preparó una solución con un contenido de arsénico teórico de 100 mg/L en un depósito de 6 L y de este se llenó cada una de las columnas mencionadas, la cantidad de compuesto utilizada fue de 0.6 g. A la celda testigo sólo se le agregó la solución preparada.



Imagen 3 Disposición general de columnas.

4.2 Experimento 2

Similar al anterior, en este experimento se eliminó el uso de arena sílica ya que se consideró que esta no influía de manera decisiva en la remoción de arsénico. En esta ocasión cada columna fue llenada con 500 mL de solución. La cantidad de diatomea se aumentó a 40 g por columna y el contenido de arsénico en solución fue de 114 mg/L. La solución se preparó con 4.5 L de agua destilada tipo II y 0.5 g de compuesto.

Es en este experimento en donde el sistema de venoclisis es instalado a la base de las columnas para regular el afluente de solución. Como se muestra en la *Imagen 4* las columnas se denominaron E1, E2 y E3 para aquellas que tuvieran las diatomeas marca CELITE. Las columnas que tuvieron diatomea HYCEL o CELITA fueron denominadas A1, A2 y A3.



Imagen 4 Columnas instaladas en el experimento 2.

4.3 Experimento 3

La variación de este experimento se encontró en el hecho de que se utilizó sólo una de las diatomeas, esta fue la diatomea CELITE. Así mismo, las columnas se designaron como E4, E5, E6 y EN1, EN2 y EN3, como indica la *Imagen 5*. Por otro lado, la concentración teórica inicial de arsénico en solución fue de 110 mg/L, las cantidades de agua destilada tipo II y compuesto fueron las mismas que en el experimento anterior.



Imagen 5 Columnas en el experimento 3.

El principal problema que se encontró al experimentar con este tipo de diatomea es que se apelmazó en el fondo de las columnas, esto impedía el flujo de solución de manera constante además de que en algunas de las columnas llegó a obstruirlo, *Imagen 6*. Sin embargo, el apelmazamiento de la diatomea no influyó en los resultados del proceso de filtrado.



Imagen 6 Apelmazamiento de Diatomea CELITE.

4.4 Experimento 4

Este experimento se enfocó en los tiempos de contacto entre la capa de diatomeas y la solución rica en arsénico de cada columna. Los tiempos de contacto de la solución con las diatomeas fueron de 2, 4, 6, 8 y 24 horas. Para cada columna se midió el tiempo de contacto y se tomaron muestras de solución en los periodos anteriormente mencionados. Para las columnas 1 y 2 se tomaron muestras a las dos y cuatro horas transcurridas desde el momento en que se vertió la solución. Para las columnas 3 y 4 se siguió el mismo proceso, pero con un tiempo transcurrido de 6 y 8 horas. Por su parte, las columnas 5 y 6 tuvieron un tiempo de contacto de 24 horas.

La configuración de las columnas se muestra en la *Imagen 7*. Por otro lado, en este experimento se tomaron muestras de las diatomeas utilizadas después de la experimentación para observarlas en el microscopio electrónico con el objetivo de ver la adsorción del arsénico en las diatomeas.



Imagen 7 Columnas en el experimento 4.

4.4.1 Preparación de las muestras de diatomea para análisis por microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)

Las muestras que se obtuvieron de las columnas utilizadas en la experimentación se colocaron en recipientes de aluminio para disponerlas a un secado a temperatura ambiente durante 48 horas. Después de este periodo las muestras fueron sometidas a un secado térmico en un horno marca Felisa a 105° C durante 24 horas. Cuando este periodo terminó, las muestras se almacenaron en un desecador en el cual fueron aplicados periodos de vacío para evitar que hubiese humedad. Aunado a esto se evitó la entrada de oxígeno del aire a las muestras realizadas.

Finalmente, se tomó una pequeña porción de las muestras en pequeños viales para ser analizadas por medio de microscopia electrónica de barrido (MEB). Estos estudios se realizaron en un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JMS-7600 F el cual se encuentra en el Laboratorio Universitario de Microscopia Electrónica o LUME, los estudios dieron como resultado imágenes de electrones secundarios y análisis elemental por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva.



Imagen 8 Muestras de diatomea para análisis por microscopio electrónico de barrido.

4.5 Experimento 5

Para realizar este experimento se hicieron cálculos adicionales a los cálculos hechos en los experimentos anteriores, esto con la finalidad de mejorar el resultado del proceso de filtración. Estos cálculos tomaron en cuenta las recomendaciones hechas por la compañía Imerys (diatomea Celite) en cuanto a la cantidad a usar de diatomea por m² de superficie de filtrado. Aunado a esto, se calculó de manera más precisa la cantidad de pentóxido de arsénico pentahidratado a utilizar para tener una concentración de As lo más cercana a 100 mg/L en solución.

Por último, se decidió fijar el filtro de papel a la base de cada columna para impedir el paso de la diatomea mezclada con solución. Una última consideración fue el uso de arena Ottawa para evitar la mezcla de la diatomea con la solución al considerar que la arena Ottawa no permite la adsorción de ningún compuesto.

4.5.1 Cantidad de diatomea a utilizar

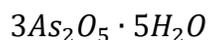
De acuerdo con la compañía Imerys, se necesitan alrededor de 500 a 1000 g de diatomea por cada m² de área de adsorción. Con esto en consideración se decidió tomar una cantidad de diatomea que se encontrara dentro del rango establecido por la compañía, dicha cantidad fue de 750 g por cada m².

Referenciando esta cantidad al área de filtrado de las columnas utilizadas, se encontró que la cantidad de diatomea a utilizar es de 3.7699 g por cada columna.

Aunado a estos cálculos, se decidió utilizar nuevamente arena de Ottawa con la finalidad de proteger la capa de diatomea de la posible mezcla con la solución preparada. La cantidad de arena utilizada fue la misma que en ocasiones anteriores, 50 g.

4.5.2 Cantidad de pentóxido de arsénico pentahidratado a utilizar

En el caso concreto del último experimento se calculó de forma más exacta la cantidad de compuesto que se utilizó para tener una concentración inicial lo más cercana a 100 mg/L. Se parte de:



As	74.9216	6	=	449.5296
O	15.9994	15	=	239.991
H	1.00794	10	=	10.0794
O	15.9994	5	=	79.997

Masa molecular del compuesto 779.597 g/mol

Por lo tanto, el porcentaje de arsénico disponible en el compuesto es 57.6618%

Con esto en consideración se puede conocer la cantidad de compuesto a utilizar para tener una concentración de arsénico en solución de aproximadamente 100 mg/L, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Cantidad de compuesto necesario

Compuesto (g)	Arsénico (g)
1	0.5766
0.1734	0.1

Se busca que esta concentración se mantenga con cuatro litros de solución a preparar, por lo cual, la cantidad de compuesto a utilizar será de 0.6937 g.

5. Resultados y discusión

Los análisis químicos de arsénico se realizaron en el laboratorio certificado “ABC Química, Investigación y Análisis”. Se buscó conocer la concentración de arsénico en solución después del proceso de filtración. El análisis utilizó el método analítico Plasma acoplado inductivamente – Espectrometría de emisión atómica el cual es una técnica de espectrometría utilizada para determinar elementos traza en soluciones acuosas.

5.1 Experimento 1

En este primer experimento no se realizaron análisis debido a que las columnas presentaron obstrucción en las válvulas de salida y no se obtuvieron muestras de agua para su análisis.

5.2 Experimento 2

Los resultados de este experimento se muestran en la *Tabla 2*.

Tabla 2 Resultados de experimento 2.

Columna	C As (V) mg/L	Remoción (%)	Columna	C As(V) mg/L	Remoción (%)
C ₀	114		Testigo	110	
E1	1.62	98.6	A1	108.4	5.6
E2	89.9	21.14	A2	28.8	74.7
E3	45.7	68.3	A3	97.7	14.3

Nota 1 Diatomea Celite (E1, E2, E3); Diatomea HYCEL (A1, A2, A3).

El valor del pH se determinó con un potenciómetro Orion Star A 215, marca Thermo Scientific. El pH inicial de la solución fue de 2.93. Al finalizar la filtración, el valor de pH fue mayor a 8 en todas las columnas. El cambio de pH en la solución se debe a la interacción de las diatomeas con los iones de arsénico.

De acuerdo con la experimentación llevada a cabo por Vargas (2007) este cambio se genera por la remoción en los microporos presentes en las diatomeas. El pH puede influir en la habilidad del adsorbente para la remoción de metales y está relacionado con la interacción de los iones de hidrógeno con los cationes del metal en los sitios de la superficie del adsorbente, (Salih et al., 2021).

Estos resultados nos muestran dos cosas: El cambio en el pH de la solución es considerable una vez terminado el proceso de adsorción de arsénico y la interacción llevada a cabo por las diatomeas con el arsénico.

En el caso de la diatomea CELITE, en dos de las tres celdas se obtuvieron resultados prometedores, por otro lado, en la celda restante con esta diatomea se registró una remoción de arsénico mucho menor. A su vez, para la diatomea HYCEL los resultados fueron totalmente contrarios. La remoción de arsénico resultó menor en el mejor de los casos.

Esto se puede deber a que el papel filtro utilizado para la retención de la diatomea no cumplió con su objetivo, dando lugar al paso de la solución sin interacción con la misma.

5.3 Experimento 3

Uno de los datos que más llaman la atención de este experimento es que la concentración inicial de la solución con arsénico fue menor a la calculada, ya que la concentración requerida se preparó utilizando la misma cantidad de compuesto (0.5 g) y agua destilada (4.5 L) que en el experimento 2.

A su vez, en este experimento se notó que la eficiencia en remoción de arsénico fue menor ya que sólo una de las seis columnas analizadas (EN1) tuvo una remoción importante de arsénico, *Tabla 3*; en contraste con el experimento anterior en el cual tres de las seis columnas tuvieron una remoción de arsénico mayor al 60%. (E1, E3 y A2), *Tabla 2*.

Esto se debe por la poca interacción entre la diatomea y el arsénico en solución (el papel filtro que funge como barrera no cumplió con su objetivo).

Tabla 3 Resultados experimento 3.

Columna	C As (V) mg/l	Remoción (%)	Columna	C As(V) mg/l	Remoción (%)
C ₀	59.68		Testigo	53.15	
E4	39.83	33.2	EN1	0.875	98.5
E5	49.39	17.24	EN2	41.32	30.76
E6	-	-	EN3	43.91	26.42

5.4 Experimento 4

Los resultados de este experimento no fueron positivos ya que la concentración inicial fue menor a la concentración de cada columna del experimento después de pasar por la capa de diatomeas, *Tabla 4*. Resulta extraño este comportamiento ya que la muestra de la concentración inicial se tomó inmediatamente después de preparar la solución y las muestras de cada columna se tomaron de la misma forma que en los experimentos anteriores.

Estos resultados son opuestos a los resultados esperados en el proceso de remoción. Sin embargo, algo que es necesario abordar sobre este experimento es el comportamiento del proceso de remoción de arsénico y cómo el tiempo influye en este.

Las columnas CEL-1 y CEL-2 con las columnas CEL-1D y CEL-2D nos indican un aumento en la remoción de arsénico en solución en un periodo de tiempo comprendido entre 2 y 4 horas. Por su parte, las columnas CEL-3 y CEL-4 con las columnas CEL-3D y CEL-4D nos muestran una disminución en la remoción de arsénico en solución después de un periodo de filtrado mayor a 6 horas. Esto se rectifica con los resultados obtenidos de las muestras tomadas de las columnas CEL-5 y CEL-6 con un periodo de interacción entre la solución y las diatomeas de 24 horas.

Tabla 4 Resultados experimento 4.

Columna	C As (V) mg/l	Tiempo filtrado	Columna	C As(V) mg/l	Tiempo Filtrado
C ₀	33.94	-	Testigo	36.78	-
CEL-1	42.43	2 horas	CEL-3	37.65	6 horas
CEL-1D	36.12	4 horas	CEL-3D	40.03	8 horas
CEL-2	41.43	2 horas	CEL-4	39.2	6 horas
CEL-2D	38.59	4 horas	CEL-4D	41.5	8 horas
CEL-5	48.23	24 horas	CEL-6	48.85	24 horas

5.5 Experimento 5

Los resultados obtenidos en este experimento se comportaron de la forma prevista. La diferencia entre el porcentaje de remoción de cada columna no varió en gran medida como en los experimentos anteriores, *Tabla 5*.

Se realizó el cálculo de la desviación estándar con los resultados de cada experimento y se encontró que este fue el experimento que presentó menor variación en los resultados ($\sigma=5.657$) en contraste con los experimentos anteriores cuya desviación fue cinco veces mayor.

Así se confirmó la influencia del factor tomado en cuenta: Al fijar el filtro de papel al fondo de la columna y confinando la capa de diatomea con una capa de arena de Ottawa se logra obtener una interacción entre la diatomea y la solución rica en arsénico constante, lo cual explica que es necesario que la diatomea esté en contacto con la solución para que la adsorción del arsénico se lleve a cabo.

Así mismo, se confirma otro factor, el cual es la cantidad de diatomea utilizada. De acuerdo con los resultados de los experimentos anteriores en donde se utilizó una cantidad mayor de diatomea, se infiere que la cantidad de diatomea a utilizar influye en el porcentaje de remoción de arsénico en el proceso de filtración, puesto que se tienen resultados con una remoción mayor al 90%.

Tabla 5 Resultados experimento 5

Columna	C As (V) mg/l	Remoción (%)	Columna	C As(V) mg/l	Remoción (%)
C ₀	93.81		Testigo	92.81	
C1	80.02	14.70	C4	74.61	20.47
C2	82.98	11.54	C5	86.91	7.36
C3	75.6	19.41	C6	86.58	7.71

5.6 Resultados de Microscopia Electrónica de Barrido

5.6.1 CEL-2

En la micrografía de la muestra CEL-2 obtenida en el Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JMS-7600 F que se encuentra en el Laboratorio Universitario de Microscopia Electrónica (LUME) se observan los frústulos de la diatomea de forma circular a 5000 aumentos (*Imagen 9*), en el punto marcado espectro 4 se obtuvo la composición química o análisis elemental por EDS (espectroscopia de rayos X de energía dispersiva) de la

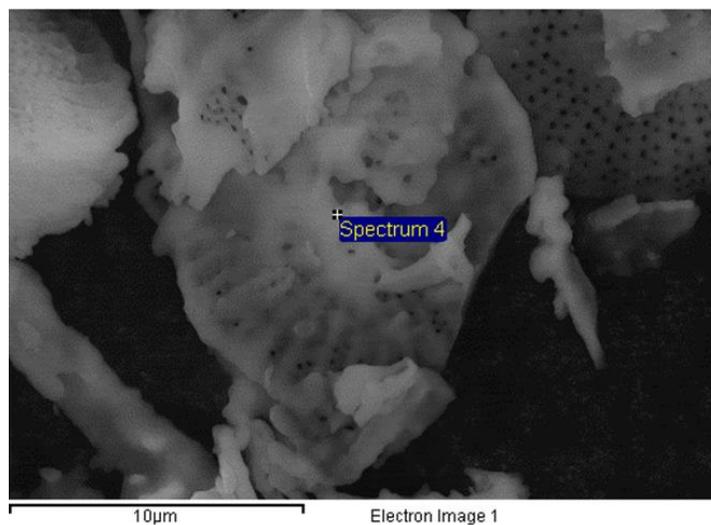


Imagen 9 Micrografía CEL-2 a 5000 aumentos.

diatomea de la muestra CEL-2, *Tabla 6*.

Tabla 6 Composición química de diatomea CEL-2 a 5000 aumentos.

Elemento	% en peso
O	57.12
Na	1.27
Si	41.22
As	0.39

Así mismo, en la micrografía de la muestra CEL-2, *Imagen 10*, se observan los frústulos de la diatomea de forma circular y algunas formas alargadas a 500 aumentos, en el punto marcado espectro 2 se obtuvo la composición química por EDS (espectroscopia de rayos X de energía dispersiva) de la diatomita de la muestra CEL-2, *Tabla 7*.

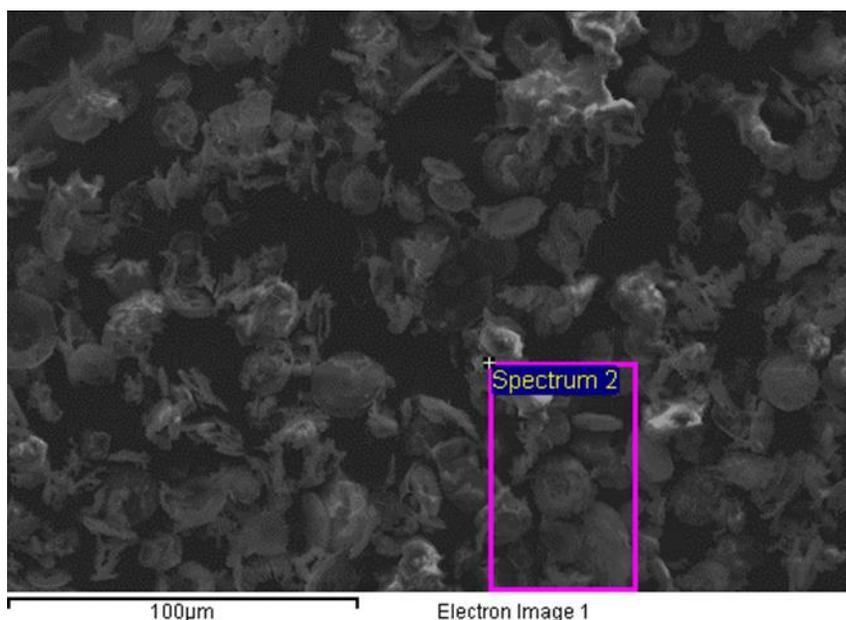


Imagen 10 Micrografía CEL-2 a 500 aumentos

Tabla 7 Composición química de diatomea CEL-2 a 500 aumentos

Elemento	% en peso
O	52.00
Na	1.47
Si	45.84
As	0.69

5.6.2 CEL-3

Por otro lado, en la micrografía de la muestra CEL-3 se observa el frústulo de la diatomea de forma circular a 3500 aumentos, *Imagen 11*, en el punto espectro 2 se obtuvo la composición química por EDS (espectroscopia de rayos X de energía dispersiva) de la diatomea de la muestra CEL-3, *Tabla 8*.

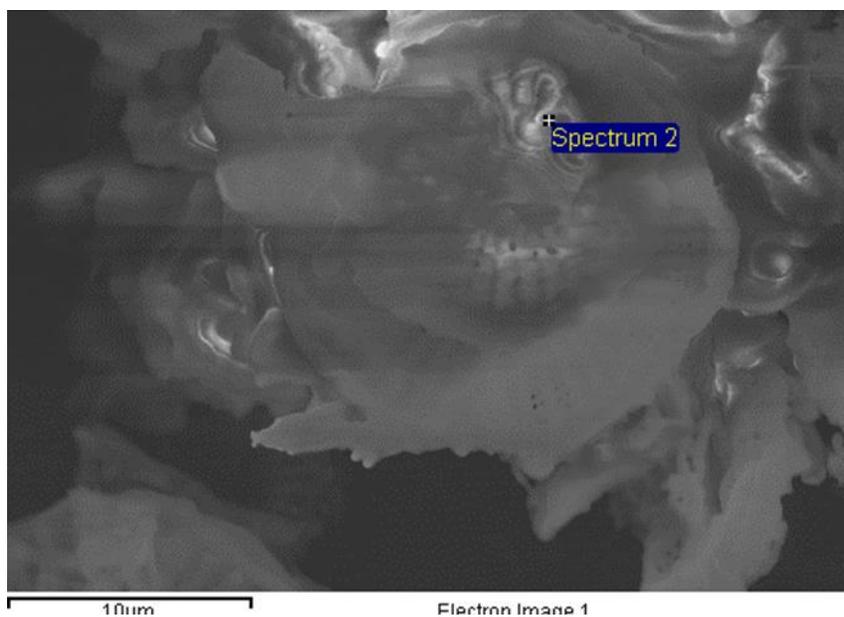


Imagen 11 Micrografía CEL-3 a 3500 aumentos.

Tabla 8 Composición química CEL-3 a 3500 aumentos.

Elemento	% en peso
O	58.92
Na	2.85
Si	37.67
As	0.56

En este caso, la micrografía de la muestra CEL-3, *Imagen 12*, muestra la forma difusa del frústulo de la diatomea de forma circular y una especie de aglomerado a 10000 aumentos, en el punto espectro 3 se obtuvo la composición química por EDS (espectroscopia de rayos X de energía dispersiva) de la diatomea de la muestra CEL-3, *Tabla 9*.

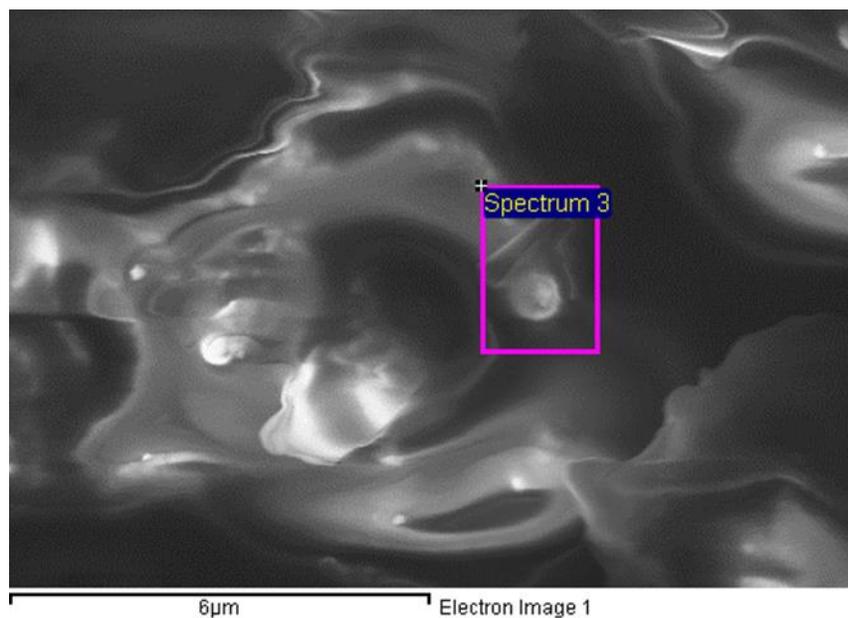


Imagen 12 Micrografía CEL-3 a 10000 aumentos.

Tabla 9 Composición química CEL-3 a 10000 aumentos.

Elemento	% en peso
O	58.13
Na	4.07
Si	37.28
As	0.53

5.6.3 CEL-5

Por su parte, en la micrografía de la muestra CEL-5 se puede observar el frústulo de la diatomea de forma circular y de forma alargada a 500 aumentos, en los puntos espectro y espectro 5 (*Imagen 13*), se obtuvo la composición química por EDS (espectroscopia de rayos X de energía dispersiva) de la diatomea de la muestra CEL-5, *Tabla 10* y

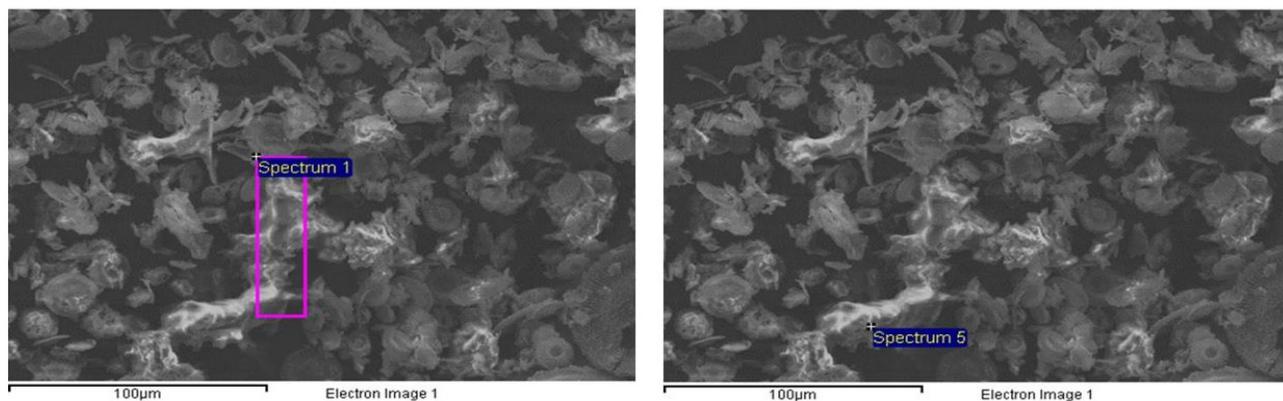


Imagen 13 Micrografías de CEL-5 a 500 aumentos.

Tabla 11.

Tabla 10 Composición química CEL-5 (espectro 1)

Elemento	% en peso
O	52.57
Na	2.68
Si	44.17
As	0.58

Tabla 11 Composición química CEL-5 (espectro 5)

Elemento	% en peso
O	42.79
Na	2.25
Si	54.22

As	0.74
----	------

Ahora bien, de acuerdo con los resultados obtenidos por los análisis realizados por el LUME, se encuentra que en cada una de las muestras de diatomeas hay concentraciones de arsénico. Esto verifica el hecho de que la diatomea tiene la capacidad de retener arsénico y, en consecuencia, filtrarlo.

Estos análisis fueron llevados a cabo con el objetivo de rastrear el comportamiento de las diatomeas con el arsénico y cómo es que este último es adsorbido por las primeras. Por otro lado, estos resultados no responden a las preguntas relacionadas con la eficiencia en el proceso de remoción de arsénico por medio de la adsorción, sin embargo, es necesario aclarar que los factores analizados dentro de cada experimentación influyen en este proceso y que es importante definir y acotar esta influencia.

6. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados obtenidos de los distintos experimentos llevados a cabo se concluye que:

- Bajo las condiciones de tiempo de adsorción, porcentaje de adsorción de arsénico y manejo de la filtración se encontró que la eficiencia de las diatomeas para remover el arsénico en solución es baja y por este motivo no puede ser considerada como único material para la filtración de arsénico en solución. Sumado a esto, si no se cuenta con una barrera que impida tanto el paso como la mezcla de las diatomeas en el proceso de filtrado no se obtiene una filtración constante que justifique la aplicación de las diatomeas en los campos de interés.
- Aunque la diatomea tiene la capacidad para retener y en consecuencia filtrar arsénico en solución, esta retención es baja comparada con otros métodos de filtración. Además de esto, la forma en que se vierte la solución y la cantidad de diatomea utilizada son factores que intervienen en la eficiencia de este material, dejando claro que aun contando con las condiciones adecuadas la retención de arsénico es baja.

No se descarta su uso como auxiliar en los métodos de filtrado ya que se obtuvieron resultados alentadores en parte de los experimentos, sin embargo, no es recomendable sólo utilizar las diatomeas como material de filtración.

- Los resultados dentro de un mismo experimento mostraron porcentajes de retención muy distintos unos de otros, por un lado, se tienen resultados magníficos con una retención mayor al 90% mientras que, por otra parte, hay resultados poco fiables con una retención menor al 25%, esto debido a que la diatomea podía o no mantenerse en su lugar como material filtrante.

Para reducir esta variación, la diatomea se mantuvo entre un filtro de papel adherido a la base de la columna y una capa de arena de Ottawa que impedía la mezcla de la diatomea con la solución. Con estas medidas se logró tener resultados similares de retención y evitar la variación dentro del mismo experimento, aunque los porcentajes de retención no fueran altos.

- Al considerar los resultados obtenidos en los análisis realizados por el LUME se comprueba la capacidad de la diatomea para adsorber arsénico y en consecuencia filtrarlo de soluciones con altas concentraciones de este. Sin embargo, hay que tener en cuenta la forma en que se lleva a cabo el proceso de filtración.

Se recomienda tener confinada la diatomea para que el contacto de esta con el arsénico sea constante, cuidar la disminución o aumento en el pH de la solución, tomar en cuenta el tiempo de contacto ya que se notó una disminución de remoción de arsénico después de un periodo de tiempo mayor a seis horas en el proceso de filtrado.

Finalmente, se recomienda tener en cuenta la relación entre la cantidad de diatomea utilizada en el proceso de filtración y el porcentaje de arsénico retenido por esta. Esta relación es directamente proporcional entre los factores mencionados. Dentro de los resultados obtenidos por esta experimentación se encontró que los resultados más favorables tuvieron mayor cantidad de diatomea en el proceso de remoción. En cambio, los últimos resultados tuvieron una cantidad de diatomea mucho menor en comparación.

7. Bibliografía

- Acuña-Piedra, A., Araya-Obando, A., & Romero-Esquivel, L. G. (2016). Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29, 23-34.
- Albores, A., Cebrián, M. E., Tellez, I., & Valdez, B. (1979). Estudio comparativo de hidro arsenicismo crónico en dos comunidades rurales de la región lagunera de México. *Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana (OSP)*; 86 (3), mar. 1979.
- Alloway, B., Centeno, J. A., Finkelman, R. B., Fuge, R., Lindh, U., & Smedley, P. (2005). *Essentials of medical geology*. O. Selinus (Ed.). Academic Press.
- Armienta, M. A., & Rodríguez, R. (1996). Arsénico en el Valle de Zimapán (México): Problemática ambiental. In *Mapfre Seguridad* (pp. 33-43).
- Borgel Espinoza, I. (2007). Caracterización del yacimiento de diatomita de loma larga, municipio de Acatlán, Hidalgo y evaluación de sus aplicaciones alternas.
- Carabantes, A. G., & de Fernicola, N. A. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 39(4), 365-372.
- Cortés, Felipe & Chávez-Guillén, R & Soto, Pedro & Smedley, P.L. (2012). An overview of arsenic occurrence in the groundwater of Mexico: Proceedings of the 4th International Congress on Arsenic in the Environment, 22-27 July 2012, Cairns, Australia. 10.1201/b12522-36.
- Fernández Quispe, H. (2009). Aplicación de roca fosfórica y diatomita incubadas en microorganismos efectivos, en el cultivo de maíz morado (*Zea mays L.*), Canaán-INIA 2750 msnm-Ayacucho.
- Gomez-Caminero, A., Howe, P. D., Hughes, M., Kenyon, E., Lewis, D. R., Moore, M., ... & Ng, J. (2001). Arsenic and arsenic compounds. World Health Organization.
- Huerta, M. D. L. R., & Soberanis, M. P. (2001). Tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Greenwood, N.N., & Earnshaw, A. (1984). *Chemistry of the elements*.

- Lillo, J. (2003). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. Grupo de Estudios de Minería y Medio Ambiente.
- Litter, M (2018). Arsénico en agua. En: Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC). Programa Futuros: Escuela de Posgrado: Agua + Humedales. (Serie Futuros). Buenos Aires: UNSAM Edita.
- Malik, A. H., Khan, Z. M., Mahmood, Q., Nasreen, S., & Bhatti, Z. A. (2009). Perspectives of low-cost arsenic remediation of drinking water in Pakistan and other countries. *Journal of hazardous materials*, 168(1), 1-12.
- Mathers, S. (1989). Costa Rican diatomite: A review of existing knowledge and future potential. *Revista Geológica de América Central*.
- Mendoza-Cano, O., Sánchez-Piña, R. A., Barrón-Quintana, J., Cuevas-Arellano, H. B., Escalante-Minakata, P., & Solano-Barajas, R. (2017). Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *salud pública de México*, 59, 34-40.
- Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidro geoquímica 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.
- Pal, P. (2015). *Groundwater arsenic remediation: Treatment technology and scale up*. Elsevier Science & Technology.
- Petrusovski, B., Boere, J., Shahidullah, S. M., Sharma, S. K., & Schippers, J. C. (2002). Adsorbent-based point-of-use system for arsenic removal in rural areas. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 51(3), 135-144.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Smol, J. P., & Stoermer, E. F. (Eds.). (2010). *The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge University Press.
- Vargas, A. A. (2007). La tierra moler o" diatomita" como sistema de remoción de sustancias químicas en el laboratorio. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 25(1 y 2).

8. Referencias

- Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Diario Oficial de la Federación, 02 de mayo de 2022.