



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA
CONSUMO HUMANO, POR MEDIO DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICA A ESCALA
LABORATORIO EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL GOLFO, GUATEMALA**

María Fernanda López Escobedo

Asesorada por el Ing. M.Sc. Marvin Eduardo Mérida Cano

Guatemala, noviembre del 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA
CONSUMO HUMANO, POR MEDIO DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICA A ESCALA
LABORATORIO EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL GOLFO, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARÍA FERNANDA LÓPEZ ESCOBEDO

ASESORADO POR EL ING. M.Sc MARVIN EDUARDO MÉRIDA CANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DEL 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
EXAMINADOR	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordóñez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO, POR MEDIO DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICA A ESCALA LABORATORIO EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL GOLFO, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de enero de 2020.

María Fernanda López Escobedo

Guatemala 20 de abril de 2021

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química Presente.

Estimado Ingeniero Williams:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO, POR MEDIO DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICA A ESCALA LABORATORIO EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL GOLFO, GUATEMALA”**, elaborado por el estudiante de Ingeniería Química, **María Fernanda López Escobedo**, quien se identifica con el registro académico **2015-13692** y con el CUI No. **2897 52043 1302**.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Marvin Eduardo Mérida Cano
Ing. Químico Colegiado No. 2013
MSc. en Ingeniería Química

Marvin Eduardo Mérida Cano
Ingeniero Químico
Colegiado No. 2013



Guatemala, 01 de septiembre de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.025.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **099-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **María Fernanda López Escobedo**.
Identificado con número de carné: **2897520431302**.
Identificado con registro académico: **201513692**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO, POR MEDIO DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICA A ESCALA LABORATORIO EN EL MUNICIPIO SAN JOSÉ DEL GOLFO, GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Marvin Eduardo Mérida Cano, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Jorge Emilio Godínez Leizaola
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Guatemala, 29 de octubre de 2021
Ref. EIQ.225.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO, POR MEDIO DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICA A ESCALA LABORATORIO EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL GOLFO, GUATEMALA** del(la) estudiante María Fernanda López Escobedo, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Alvarez Mejía M. I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

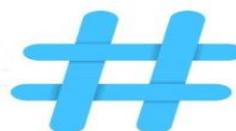
Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 594-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO, POR MEDIO DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICA A ESCALA LABORATORIO EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DEL GOLFO, GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **María Fernanda López Escobedo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por bendecir mi vida, fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por haber puesto en mi camino a quienes son mi soporte y mi guía.
Virgen María	Por su compañía, protección a lo largo de toda mi vida y mantener viva mi fe.
Mis padres	José Aroldo López Cano y Glendy Noemy Escobedo Tello por todo el amor, apoyo y comprensión, siendo los principales motores de mis sueños, por confiar en mí y en mis expectativas.
Mis hermanos	Ronald Josué y Sindy Gabriela López Escobedo por su acompañamiento incondicional, sus palabras de aliento y demostrarme que con esfuerzo y dedicación todos es posible.
Mis abuelos	Por ser los cimientos fundamentales de familias que me han inculcado lo hermoso y valioso de la vida, besos al cielo.
Mi familia en general	Por su cariño y motivación.

Mis amigos

Por los momentos compartidos, por brindarme en cada parte del camino su mano amiga y su apoyo verdadero.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	<i>Alma mater</i> , por inculcarme conocimientos, valor, ética y vocación profesional con una educación superior sólida.
Facultad de Ingeniería	Por darme las herramientas que serán un pilar fundamental para desenvolverme profesionalmente y contribuir a la optimización y manutención de recursos en la industria de procesos para el desarrollo sostenible del país.
Mis catedráticos	Que en este proceso integral de formación ampliaron y me proporcionaron los conocimientos para desarrollarme en un mundo globalizado y competitivo.
Ing. M.Sc Marvin Eduardo Mérida Cano	Por su motivación, apoyo, guiarme en este proyecto de investigación y facilitarme los recursos necesarios especialmente en la etapa de observación y análisis. Gracias por acompañarme en toda mi carrera universitaria.
Ing. Jorge Mario Estrada Asturias	Por su calidad de persona, su ejemplo de trabajo, dedicación y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Agua subterránea	3
2.2. Calidad del agua subterránea para consumo humano	4
2.3. Arsénico	5
2.3.1. Presencia de arsénico en el agua para consumo humano.....	6
2.3.2. Propiedades químicas del arsénico.....	7
2.3.3. Efectos del arsénico en la salud.....	8
2.3.4. Límites máximos permisibles de arsénico para Guatemala	9
2.4. Técnicas de remoción de arsénico	10
2.4.1. Remoción del arsénico por medio de intercambio iónico.....	10
2.4.2. Remoción de arsénico por destilación.....	12
2.4.3. Remoción de arsénico por ósmosis inversa.....	12

2.4.4.	Remoción de arsénico por columna de adsorción ..	14
2.4.5.	Remoción de arsénico por opciones de filtración ...	14
2.4.5.1.	Oxidación-filtración.....	15
2.4.5.2.	Coagulación-filtración.....	15
2.4.5.3.	Coagulación-clarificación-filtración.....	15
2.4.6.	Remoción de arsénico por alúmina activada	16
2.5.	Metodologías para la determinación de la concentración de arsénico en el agua	16
2.5.1.	Espectrofotometría de absorción atómica por el método de llama (FLAAS)	16
2.5.2.	Espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito (GFAAS)	17
2.5.3.	Espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros (HGAAS).....	18
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	19
3.1.	Variables	19
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	19
3.3.	Recurso humano disponible	20
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	20
3.4.1.	Medio filtrante	20
3.4.2.	Reactivos	20
3.4.3.	Instrumentos de medición	21
3.4.4.	Equipo.....	21
3.4.5.	Cristalería	21
3.4.6.	Equipo de protección personal.....	21
3.5.	Técnica cuantitativa	22
3.5.1.	Determinación del número de muestras de la población	22

3.5.2.	Prueba de espectrofotometría absorción atómica...	23
3.5.3.	Proceso de filtración en medios acondicionados	23
3.5.3.1.	Diseño del filtro.....	23
3.5.3.2.	Características físicas de Greensand plus	24
3.5.4.	Determinación del caudal de diseño	25
3.5.5.	Mantenimiento del medio filtrante.....	25
3.5.6.	Proceso de activación.....	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de los datos	26
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	27
3.8.	Análisis estadístico	28
3.8.1.	Diseño experimental	29
3.8.1.1.	Media aritmética	29
3.8.1.2.	Varianza	29
3.8.1.3.	Desviación estándar	29
3.8.1.4.	Coeficiente de variación	30
3.9.	Plan de análisis de resultados	30
3.10.	Análisis de un diseño factorial	30
3.11.	Programas a utilizar en el análisis de datos	30
4.	RESULTADOS.....	31
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	35
	CONCLUSIONES	39
	RECOMENDACIONES.....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	APÉNDICE.....	49
	ANEXOS	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Pozos en acuíferos	4
2.	Especies acuosas de arsénico en el sistema As–O ₂ –H ₂ O.	8
3.	Proceso de intercambio de iones	11
4.	Proceso de destilación.....	12
5.	Unidad de tratamiento de ósmosis inversa	13
6.	Tratamiento de adsorción	14
7.	Tratamiento de coagulación-filtración.....	15
8.	Esquema de diseño del filtro para la reducción de arsénico.....	32
9.	Concentración de arsénico respecto al límite máximo permisible según la norma COGUANOR 29 001.....	32

TABLAS

I.	Compuestos del arsénico	6
II.	Órganos afectados y efectos a la salud	9
III.	VARIABLES presentes en la investigación	19
IV.	Datos utilizados para determinar el número de muestras a realizar	22
V.	Características físicas Greensand plus.....	24
VI.	Toma de datos acorde al diseño del filtro a utilizar	26
VII.	Datos del tiempo de saturación, en el filtro piloto para remoción de arsénico	27
VIII.	Concentración inicial y final para cada muestra analizada	27

IX.	Concentración final en el tiempo de saturación y porcentaje de reducción del arsénico en el caudal establecido.....	28
X.	Número de tratamientos y repeticiones para la evaluación de la eficiencia de reducción de arsénico en agua para consumo humano.....	28
XI.	Evaluación del nivel de concentración inicial de arsénico presente en agua para consumo humano.....	31
XII.	Diseño y operación del sistema de reducción de arsénico.....	31
XIII.	Porcentaje de reducción de arsénico	33
XIV.	Datos de costos del proceso de reducción de arsénico	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
A	Área
As	Arsénico
Q	Caudal
C	Concentración
Gpm	Galones por minuto
h	Hora
L	Litros
mg	Miligramos
min	Minutos
n	Número de muestra
π	Número de pi
%	Porcentaje
s	Segundos
T	Tiempo
V	Volumen

GLOSARIO

Agua potable	Agua que se puede consumir, libre de contaminantes con ciertas sustancias disueltas, beneficiosas y aptas para consumo humano.
Arsénico	Elemento químico de la corteza terrestre, está presente en el agua, aire y tierra. De forma natural se encuentra a altos niveles en aguas subterráneas.
Caudal	Se define como el volumen de agua que pasa por la sección transversal del cauce, por unidad de tiempo.
COGUANOR 29 001	Comisión guatemalteca de normas encargada de las especificaciones de agua para consumo humano (agua potable).
Concentración	Magnitud de la proporción entre la cantidad de soluto y solvente en una solución.
Filtro de agua	Equipo que permite limpiar el agua que viene de los acueductos. El dispositivo atrapa y elimina las partículas que pueden dañar al ser humano.

Medidor de caudal	Instrumento que determina el volumen que pasa por una tubería por unidad de tiempo.
Remoción	Proceso fisicoquímico en el cual las partículas son separadas de un objeto sólido sin acción mecánica.
Tasa de infiltración	Velocidad con la que el agua penetra en el suelo y es capaz de absorber la precipitación o la irrigación.
Tiempo de retención	Tiempo que ha transcurrido entre la inyección de la muestra y la aparición de la respuesta máxima del proceso que se está llevando a cabo.

RESUMEN

A continuación, se presenta la evaluación de un sistema para la reducción de arsénico en agua de consumo humano por medio de una resina de intercambio iónica a escala laboratorio.

Dicha investigación fue realizada en el Laboratorio Metalúrgico y de Control de Calidad de una empresa extractora. Este trabajo tiene como finalidad la verificación y comprobación de la eficiencia de una resina de intercambio iónica, que sea de utilidad para lograr reducir la mayor cantidad de arsénico presente en agua para consumo humano y con ello cumplir los límites máximos permisibles por la norma COGUANOR 29 001.

Inicialmente se realizó un análisis de arsénico presente en el agua de consumo humano, por medio de espectrofotometría de absorción atómica en donde se determinó que la concentración inicial de arsénico era de 0,013 mg/L; por lo que dicha agua no era apta para consumo humano según la normativa. Por otro lado, se diseñó el filtro para un caudal de 2 L/min, un volumen de 2,04L y una tasa de infiltración de 7,79 gpm/pie², el cual puede ser utilizado para un artefacto en una vivienda.

GreenSand Plus fue la resina de intercambio iónica con la que se trabajó, la cual fue activada con hipoclorito de sodio en cantidades acorde al volumen del medio filtrante, con los cuidados necesarios y de gran importancia el tiempo de activación para lograr los resultados esperados.

Se realizó la determinación de la concentración de arsénico presente en el agua filtrada para consumo humano, según el número de muestras estadísticamente representativas y confiables. Se obtuvo una concentración promedio de arsénico de 0,0087 mg/L y un porcentaje de remoción de arsénico promedio de 32,69 %, por lo que se determinó que por medio de dicha metodología se logró cumplir con el límite máximo permisible establecido por la COGUANOR 29 001.

Por último, se realizó un análisis económico con el objetivo de determinar el costo de inversión total para obtener este sistema de tratamiento de reducción y así poder estar al alcance de las poblaciones donde se encuentran concentraciones de arsénico por encima de la normativa.

OBJETIVOS

General

Comprobar la eficiencia de una resina de intercambio iónica para la reducción de arsénico presente en agua de consumo humano en el municipio San José del Golfo a nivel laboratorio.

Específicos

1. Evaluar los niveles de concentración de arsénico presentes en agua para consumo humano, mediante muestras analizadas por medio de la técnica espectrofotometría de absorción atómica.
2. Definir las condiciones de diseño y operación del sistema de remoción de arsénico, realizando la debida activación de la resina, para la reducción en el agua de consumo humano.
3. Realizar pruebas de reducción de arsénico para compararla con los límites máximos permisibles según la Norma COGUANOR 29 001 del agua para consumo humano.
4. Determinar el porcentaje de reducción de arsénico en el agua para consumo humano por medio de una resina de intercambio iónica.

5. Realizar un análisis económico del proceso de reducción de arsénico en agua para consumo humano por medio de una resina de intercambio iónico.

HIPÓTESIS

La remoción de arsénico presente en el agua para consumo humano por medio de una resina de intercambio iónica es del 70 %.

Hipótesis nula:

H_{01} : no existe diferencia significativa en la concentración de arsénico luego de la filtración en cada muestra de agua para consumo humano.

H_{02} : no existe diferencia significativa en la concentración de arsénico después de la filtración con una variación en el tiempo.

Hipótesis alternativa:

H_{01} : si existe diferencia significativa en la concentración de arsénico luego de la filtración en cada muestra de agua para consumo humano.

H_{02} : si existe diferencia significativa en la concentración de arsénico después de la filtración con una variación en el tiempo.

INTRODUCCIÓN

El agua es un compuesto único con características propias que le hacen importante y de gran significancia para la vida; además de formar parte de los cuatro elementos que conforman el mundo.

El arsénico está presente de forma natural en niveles altos en las aguas subterráneas de varios países, su mayor amenaza para la salud reside en la utilización de agua contaminada para beber, preparar alimentos y regar cultivos alimentarios; teniendo una exposición prolongada al arsénico a través de dicho consumo puede causar cáncer, lesiones cutáneas, entre muchas más enfermedades.

En Guatemala, la mayoría de agua proviene de pozos y efluentes que constituyen un recurso natural esencial y, de gran importancia para el consumo del ser humano.

Por tal motivo el presente estudio está orientado a la reducción de arsénico en el agua para consumo humano y así mismo, cumplir con lo establecido en la Norma COGUANOR 29 001 sobre “el límite máximo permisible, siendo este de 0,010 mg/L”¹, por medio de una resina de intercambio iónica, Greensand plus, siendo esta un medio filtrante negro, utilizada para remover arsénico en el agua para consumo humano.

¹ COGUANOR. NTG 29001. *Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones.* 1-12 p.

Al finalizar dicho estudio se procederá a realizar un análisis económico para evaluar la factibilidad de método, así como la eficiencia alcanzada, basándose en la comprobación de hipótesis trazadas.

1. ANTECEDENTES

La presencia de minerales en el agua subterránea para consumo humano, especialmente el metaloide arsénico es una problemática que abarca todo el mundo y que debe ser tratada para con ello combatir daños a la salud del consumidor.

Según la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (IRIS), en Guatemala “no se registran en gran cantidad investigaciones basadas en la remoción de arsénico, sin embargo, un estudio realizado demuestra que es posible la remoción de arsénico en el agua a nivel laboratorio aplicando como medio filtrante óxido de hierro”².

Otro estudio con un aporte significativo fue la “remoción de arsénico por floculación y filtración directa del agua subterránea del municipio de San Rafael las flores, Santa Rosa, Guatemala”³ en donde diseñaron una planta de tratamiento de aguas con el objetivo de acondicionarla para el consumo humano. El método mencionado con anterioridad se estableció debido a que una hipótesis demostraba que el arsénico se encontraba en forma suspendida y no disuelta.

La Revista de Metalurgia expone el estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. Se investigaron resinas de intercambio iónico respecto a su capacidad para la eliminación de arsénico, las cuales fueron resinas aniónicas fuertes de tipo macro reticular (IRA-900) y de tipo gel (IRA-400), así como una resina aniónica débil macro reticular (IRA-96); su objetivo determinar la resina con mayor eficiencia en cuanto a la remoción de arsénico siendo esta la IRA-900 debido a su capacidad de

² ICC. *Descubriendo el agua subterránea de la costa sur de Guatemala*. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2019/07/Bolet%C3%ADn-Cambio-Clim%C3%A1tico-No.-1-2019.pdf>. Consulta: 22 de febrero de 2020.

³ Ibid.

tratamiento al ser utilizada 25 mililitros de dicha resina se logró el tratamiento de 17 litros de agua con un flujo de 2 a 3 mL/min.⁴

El arsénico que es la variable de interés presenta dos estados de oxidación, el As (III) presenta un pH de 0 a 10, desde que se pueda generar un hidruro mientras que el As (V) no da señales por arriba de un pH 5.⁵

Por otro lado “Sinemus determina que la misma cantidad de As (III) y As (V) y en idénticas condiciones de generación producen una señal transitoria de similar área”⁶.

⁴ PÉREZ, Fidel; PRIETO, Francisco; ROJAS, Alberto; MARMOLEJO, Yolanda. *Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, Estado de Hidalgo, México.* https://www.researchgate.net/publication/44200326_Estudio_de Eliminacion_de_arsenico_con_resinas_de_intercambio_ionico_en_agua_potable_de_Zimapan_Estado_de_Hidalgo_Mexico. Consulta: mayo de 2020.

⁵ AGGETT, Peter. *The determination of arsenic(III) and total arsenic by atomic-absorption spectroscopy.* <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1976/an/an9760100341/unauth>. Consulta: mayo de 2020.

⁶ MINOIA, Claudio; CAROLI, Sergio. *Applications of Zeeman Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry in the Chemical Laboratory and in Toxicology.* <https://www.elsevier.com/books/applications-of-zeeman-graphite-furnace-atomic-absorption-spectrometry-in-the-chemical-laboratory-and-in-toxicology/minoia/978-0-08-041019-7>. Consulta: mayo de 2020.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Agua subterránea

Es el agua que se genera bajo la superficie terrestre, la cual puede ser colectada mediante pozos, túneles, perforaciones o galería de drenaje; o también a aquella agua que proviene de forma natural de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales. La fuente de aporte principal mediante el proceso de infiltración, es el agua de lluvia.⁷

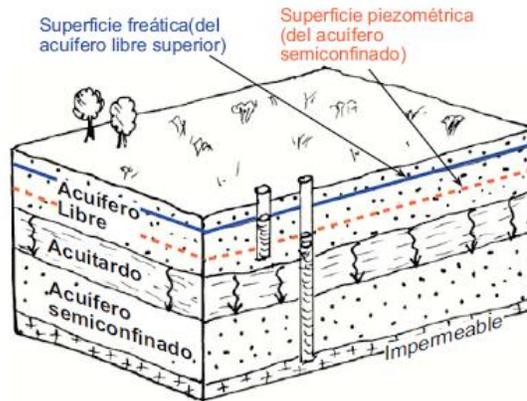
Es importante definir el concepto acuífero, pues el agua subterránea que se encuentra en los mismos es una parte importante del ciclo hidrológico, “un acuífero es la formación geológica que cuenta con la capacidad de almacenar y transmitir agua; los hay libres, confinados y semiconfinados”⁸. El primero contiene un piso impermeable y su techo se encuentra a presión atmosférica, el segundo es de baja permeabilidad y la presión hidrostática es superior a la de la atmósfera, mientras que el tercero tanto el techo como el piso están formados de baja permeabilidad, pero no impiden la verticalidad del agua.

El agua subterránea tiene un papel importante en la naturaleza y es de vital importancia para la población de hoy en día, ya que es la mayor reserva de agua potable con la que se cuenta, aunque cabe resaltar que se deben tener cuidados necesarios para evitar daños a la salud.

⁷ ORDOÑEZ GÁLVEZ, Juan Julio. *Aguas subterráneas – acuíferos*. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf. Consulta: mayo de 2020.

⁸ PENA, Carlos María; CABALLEROS, María y JAVIER, Jorge. *Manual de Agua Subterránea*. http://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf. Consulta: mayo de 2020.

Figura 1. Pozos en acuíferos



Fuente: Universidad de Córdoba. *TEMA 8: Espectroscopía Foelectrónica de rayos X (XPS)*.
<http://www.uco.es/~iq2sagr/TranspTema8.pdf>. Consulta: febrero de 2020.

2.2. Calidad del agua subterránea para consumo humano

“En Guatemala un 98,9 % de la población rural dispersa depende del agua subterránea para su uso domiciliario, por lo que se debe contar con las medidas de salud necesarias para su consumo”⁹.

Al encontrarse en el subsuelo esta muchas veces se ve contaminada de forma natural, debido a que en ella se encuentran ciertos elementos químicos y gases en grandes concentraciones; por esta razón la calidad del agua subterránea se ve afectada, lo que puede causar problemas cuando es utilizada para fines domésticos.

⁹ ICC. *Descubriendo el agua subterránea de la costa sur de Guatemala*.
<https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2019/07/Bolet%C3%ADn-Cambio-Clim%C3%A1tico-No.-1-2019.pdf>. Consulta: mayo de 2020.

La contaminación del agua para consumo humano en su mayoría se debe a las altas concentraciones de metales pesados, dentro de los que se pueden mencionar: hierro, magnesio, arsénico y plomo, entre otros. De forma natural estos metales son introducidos al agua como resultados de lixiviación de suelos, rocas y erupciones volcánicas.

Por tal motivo se debe cumplir con las normas establecidas del agua para consumo humano, en este caso para Guatemala, basándose en la Norma COGUANOR 29 001.

2.3. Arsénico

El arsénico (As), de número atómico 33 y peso atómico 74 922, es un elemento presente en la atmósfera, biósfera e hidrósfera significativamente. Una fuente de arsénico en el medioambiente se da de forma natural como por ejemplo la actividad biológica, emisiones volcánicas y meteorización, pero por otro lado se debe a las actividades antropogénicas como la minería, fundición de metales, pesticidas, entre otros. El elemento se puede encontrar en diferentes estados de oxidación, los cuales pueden ser -III, 0, III y V.¹⁰

Es el vigésimo elemento con más presencia en la corteza terrestre y puede clasificarse como orgánico e inorgánico. De forma inorgánica se genera cuando el arsénico se une a otros elementos como puede ser el caso de cloro, oxígeno y azufre, mientras que el arsénico orgánico se caracteriza por ser menos perjudicial.

¹⁰ IBEROARSEN. *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos*. https://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/Monografia2_000.pdf. Consulta: febrero de 2020.

Tabla I. **Compuestos del arsénico**

Forma	As III (trivalente)	As V (pentavalente)
Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> - Trióxido de arsénico - Ácido arsenioso - Arsenito sódico - Tricloruro de arsénico 	<ul style="list-style-type: none"> - Pentóxido de arsénico - Ácido arsénico - Arseniato de plomo - Arseniato de calcio
Orgánico	<ul style="list-style-type: none"> - Arsfenamina 	<ul style="list-style-type: none"> - Arsanilato de sodio

Fuente: ATSDR. *Resumen de salud pública- Arsénico*.

https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html. Consulta: febrero de 2020.

2.3.1. Presencia de arsénico en el agua para consumo humano

El arsénico se conoce como un metal pesado que se encuentra presente de forma natural en aguas subterráneas de varios países en altas concentraciones, la mayor amenaza en cuanto a la salud del ser humano consiste en que esta es utilizada para beber y cocinar.

En el agua el arsénico usualmente se encuentra de forma inorgánica, formando oxaniones, en donde los estados de oxidación que predominan son el arsenato (As V) y también puede estar presente el arsenito (As III) bajo condiciones establecidas. Dicho elemento en el agua puede experimentar una serie de cambios, incluyendo reacciones de oxidación-reducción, intercambios de átomos ligandos, y biotransformaciones. Dentro de los factores que afectan el transporte y a disposición del arsénico se encuentran:

- Acidez o alcalinidad del agua [pH]
- Cantidad de hierro en el agua

- Cantidad de sulfuro de metal y sulfuro en el agua
- Temperatura y salinidad del agua
- Distribución y composición de organismos vivos presentes en el agua.

El tema de interés es la presencia de este elemento en el agua para consumo humano y cómo lograr la remoción del mismo, teniendo en cuenta la forma en que se presenta el arsénico en el agua, “se conoce que el arsenato (As V) se remueve más fácilmente debido a que cuenta con una carga iónica mucho mayor al arsenito (As III)”¹¹.

2.3.2. Propiedades químicas del arsénico

Con anterioridad fueron mencionados los estados de oxidación en que se presenta el arsénico (-III, 0, III y V).

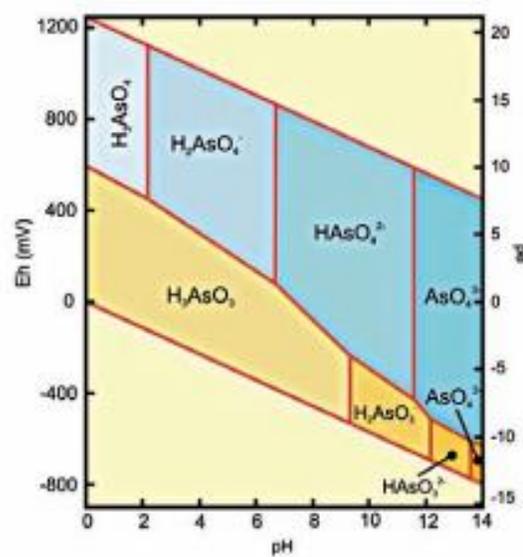
Basándose en la forma en la que se presenta el arsénico en el agua para consumo humano, el As (V) bajo condiciones oxidantes, quiere decir aeróbicas, predomina sobre el As (III).

El arsenato en su forma química se encuentra como H_3AsO_4 disociándose en $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ y AsO_4^{3-} , mientras que el arsenito se presenta como H_3AsO_3 donde dependiendo del pH sus derivados protolíticos pueden ser $H_4AsO_3^+$, $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$ y AsO_3^{3-} .¹²

¹¹ LESIKAR, Bruce; MELTON, Rebecca; HARE, Michael; HOPKINS, Janie; DOZIER, Monty. *Problemas del agua potable: Los radionúclidos*. <https://cdn-ext.agnet.tamu.edu/wp-content/uploads/2019/03/EB6192S-problemas-del-aqua-potable-los-radionuclidos.pdf>. Consulta: febrero de 2020.

¹² IBEROARSEN. *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos*. https://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/Monografia2_000.pdf. Consulta: febrero de 2020.

Figura 2. Especies acuosas de arsénico en el sistema As–O₂–H₂O



Fuente: IBEROARSEN. *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos.*

https://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/Monografia2_000.pdf. Consulta: febrero de 2020.

Por su sensibilidad el arsénico tiende a encontrarse entre los valores típicos del pH de aguas subterráneas valorándose entre (6,5 – 8,5). En aguas naturales la presencia de ácido arsénico no es común encontrarla pues cuenta con pH bajos (<2), el arsénico en el agua fundamentalmente se presenta como $H_2AsO_4^-$ encontrándose en valores de pH menores a 6,9, cuando se cuenta con pH más altos domina el $HAsO_4^{2-}$. Respecto a las condiciones de basicidad AsO_4^{3-} será la especie dominante; mientras que el ácido arsenioso se transforma en $H_2AsO_3^{3-}$ cuando aumenta el pH. Por último, a condiciones de pH inferior a 9,2 la especie que predomina es la neutra, siendo esta de 8, 9.¹³

2.3.3. Efectos del arsénico en la salud

Aplicado al campo de investigación, en Guatemala muchas personas beben agua de pozos que contienen la presencia de arsénico y que a la larga es

¹³ IBEROARSEN. *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos.* https://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/Monografia2_000.pdf. Consulta: febrero de 2020.

prejudicial, pues con ello se experimentan daños a la salud, siendo la piel y el sistema circulatorio los más afectados, existiendo un mayor riesgo de contraer cáncer.

Tabla II. **Órganos afectados y efectos a la salud**

Órganos que se ven afectados	Efecto crónico a la salud
- Pulmones	- Cáncer
- Tracto digestivo	- Pérdida de la audición
- Riñones	- Gangrena
- Sistema circulatorio	- Desorden de comportamiento
- Sistema nervioso central	- Anormalidades de desarrollo
	- Enfermedades neurológicas
	- Desorden hematológico
	- Toxicidad en sistema reproductivo

Fuente: CEAB-UVG. *Cambio Climático: Riesgo de Sequía e Inseguridad Alimentaria*.

<https://www.marn.gob.gt/multimedios/914.pdf>. Consulta: marzo de 2020.

“Con base a índices se ha determinado que una de cada diez personas que ingiere agua con presencia de arsénico con una concentración de arsénico mayor a 0,05 mg/L presenta daños a la salud e incluso perder la vida”¹⁴.

2.3.4. Límites máximos permisibles de arsénico para Guatemala

El límite máximo permisible, es el valor de concentración arriba del cual el agua no es apta para consumo humano. Refiriéndose a la presencia de arsénico el valor máximo permisible de concentración es de 0,010 mg/L; por lo que se deben tomar las medidas necesarias para cumplir con este parámetro que puede afectar la vida del consumidor.¹⁵

¹⁴ ATSDR. *Resumen de salud pública- Arsénico*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html. Consulta: marzo de 2020.

¹⁵ CEAB-UVG. *Cambio Climático: Riesgo de Sequía e Inseguridad Alimentaria*. <https://www.marn.gob.gt/multimedios/914.pdf>. Consulta: marzo de 2020.

2.4. Técnicas de remoción de arsénico

Basándose en el tratamiento de aguas, este está orientado a remover cualquier microorganismo, turbiedad y color, haciéndolo mediante una combinación de procesos, pero cuando se trata de remover compuestos o elementos químicos como es el caso del arsénico se debe recurrir a mecanismos más complejos. “Para la remoción de arsénico existen alrededor de 14 tecnologías que cuentan con una eficiencia del 70 hasta el 99 %”¹⁶.

Dentro de las cuales se encuentran:

- Intercambio de iones
- Destilación
- Osmosis inversa
- Columna de adsorción
- Opciones de filtración
- Alúmina activada

2.4.1. Remoción del arsénico por medio de intercambio iónico

El intercambio de iones su objetivo principal es el intercambio de un ion por otro; para este proceso se utiliza una resina de intercambio aniónica, las cuales son requeridas de base fuerte, ya que pueden “remover el arsenato As(V) y disminuir a concentraciones de 0,001 mg/L de arsénico en el agua para consumo humano”¹⁷.

¹⁶ CASTRO DE ESPARZA, María Luisa. *Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos*. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/remocion-agua.pdf>. Consulta: marzo de 2020.

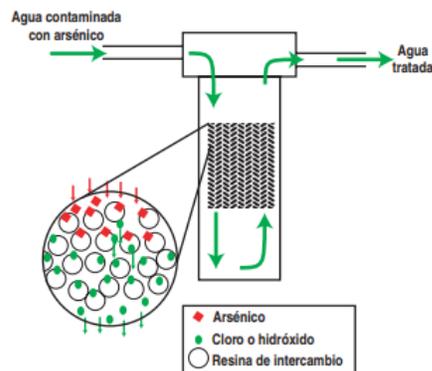
¹⁷ Ibid.

Este método no remueve el arsenito As (III), por lo que se requiere una oxidación previamente.

Como se mencionó anteriormente la resina utilizada para este método debe ser de base fuerte para lograr el intercambio de iones, puede ser de hidróxido o de cloruro. Lo que se logra es que un ion arsenato se mueva a través de la resina intercambiando lugar con ion cloruro o un ion hidrógeno, esto se da debido a que el sitio de intercambio de la resina atrae más fuertemente al arsénico que al ion que lo reemplazó.

La remoción de arsénico, es independiente del pH y la concentración inicial del mismo y se encuentra entre un rango de 85 a 100 %, una de sus ventajas es su regeneración con cloruro de sodio en un lapso pequeño, su alto rango de pH al que trabaja y el mejoramiento de la calidad del agua.¹⁸

Figura 3. **Proceso de intercambio de iones**



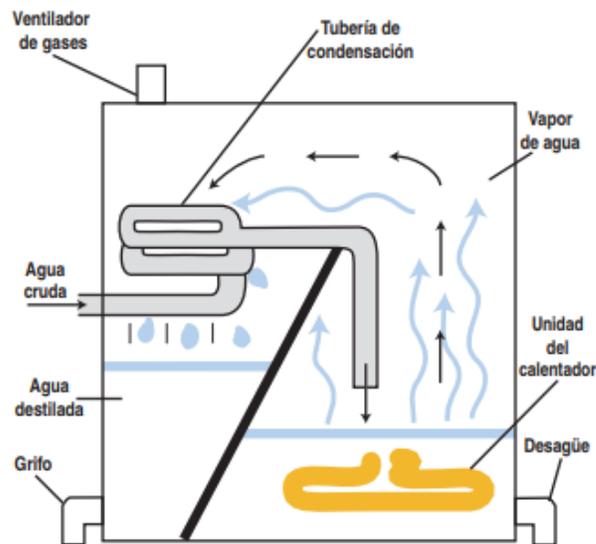
Fuente: LESIKAR, Bruce; MELTON, Rebecca; HARE, Michael; HOPKINS, Janie. DOZIER, Monty. *Problemas del agua potable: Los radionúclidos*. <https://cdn-ext.agnet.tamu.edu/wp-content/uploads/2019/03/EB6192S-problemas-del-aqua-potable-los-radionuclidos.pdf>. Consulta: marzo de 2020.

¹⁸ OMS. *Arsenic in Drinking Water*. https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/arsenic.pdf. Consulta: marzo de 2020.

2.4.2. Remoción de arsénico por destilación

Reducir los niveles de arsénico de una fuente de agua puede llevarse a cabo mediante un proceso de destilación en el cual, el agua se calienta hasta llegar a su punto de ebullición en un sistema cerrado, dejando las impurezas a medida que la misma se va evaporando. El vapor resultante llega a enfriarse, se condensa y se convierte de nuevo en líquido; de esta manera los gases disueltos y los compuestos que se volatilizan son transportados en el vapor.

Figura 4. **Proceso de destilación**



Fuente: elaboración propia, empleando Illustrator CS 2018.

2.4.3. Remoción de arsénico por ósmosis inversa

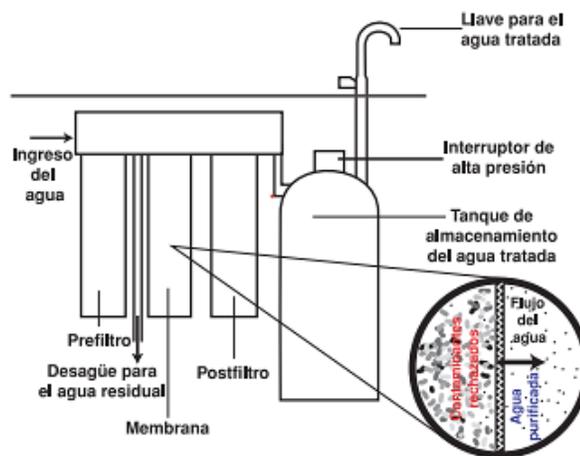
Es una técnica muy eficaz ya que en un solo paso permite la eliminación completa de varios contaminantes, de existir sólidos disueltos se debe realizar un pretratamiento para contar con una mayor eficiencia.

Es recomendable utilizar esta técnica cuando el agua a parte de contener arsénico presenta altos niveles de sulfatos, fosfatos y sólidos disueltos.

Los sistemas utilizados de alta y baja presión son de 400 y 200 psi respectivamente, con capacidades a tratar de 1,8 L/s de agua. Esta técnica remueve As (V) entre 91 y 98 % en reactores de alta presión y 77 a 87 % en reactores de baja presión; mientras que para el As (III) se tiene una eficiencia de 63 a 70 % en reactores de alta presión y 75 % para reactores de baja presión.¹⁹

La ósmosis inversa opera dejando pasar agua por una membrana semipermeable bajo presión, la membrana permite que el agua fluya, pero retiene o evita el paso del arsénico.

Figura 5. Unidad de tratamiento de ósmosis inversa



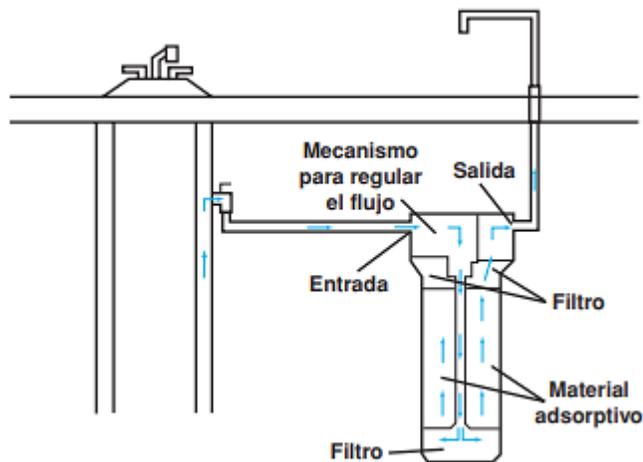
Fuente: LESIKAR, Bruce; MELTON, Rebecca; HARE, Michael; HOPKINS, Janie; DOZIER, Monty. *Problemas del agua potable: Los radionúclidos*. <https://cdn-ext.agnet.tamu.edu/wp-content/uploads/2019/03/EB6192S-problemas-del-aqua-potable-los-radionuclidos.pdf>. Consulta: marzo de 2020.

¹⁹ DOMINIGHINI, Claudio; MUSCIA, Lucas; CATALDI, Zulma; SCURATI, Carlos; OLIVERO, Marcelo; GOTTARDO, Marcelo. *Análisis de membranas de ósmosis inversa en potabilización de agua para consumo humano*. <https://copec.eu/congresses/shewc2016/proc/works/29.pdf>. Consulta: marzo de 2020.

2.4.4. Remoción de arsénico por columna de adsorción

El hierro y el aluminio son absorbentes modificables que ayudan a remover el arsénico en el agua. Una de las ventajas de utilizar esta técnica es que opera de forma sencilla, necesita poco mantenimiento, su capacidad alta de tratamiento y su cinética lenta para romper el arsénico. En esta técnica no sale del cartucho agua que no haya sido tratada para consumo humano, pues detecta la concentración a la que se encuentra y remueve dicho elemento, bajo sus condiciones de trabajo.

Figura 6. Tratamiento de adsorción



Fuente: EPA. *Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems*.
https://cfpub.epa.gov/safewater/arsenic/arsenicradeshow/Pubs/handbook_arsenic_treatment-tech.pdf. Consulta: abril de 2020.

2.4.5. Remoción de arsénico por opciones de filtración

Dos técnicas para la eliminación de arsénico en el agua para consumo humano utilizadas muy a menudo es la filtración del hierro y la coprecipitación.

Un procedimiento a seguir podría incluir: oxidación, coprecipitación del arsénico con sales de hierro y filtración de floculante. Para lograr determinar la eficiencia en un proceso se parte de las pruebas fundamentales, pruebas piloto y tomando en cuenta las variaciones que pueden ser:

2.4.5.1. Oxidación-filtración

Cuando el hierro que se da naturalmente es suficiente para la eliminación de arsénico.

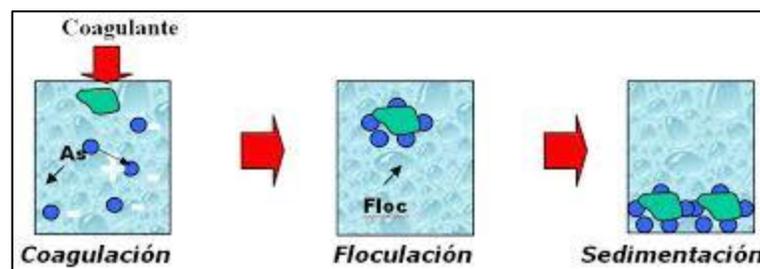
2.4.5.2. Coagulación-filtración

Añadir un coagulante de hierro antes de ser filtrado.

2.4.5.3. Coagulación-clarificación-filtración

Su objetivo disminuir la cantidad de sólidos en el filtro.

Figura 7. Tratamiento de coagulación-filtración



Fuente: elaboración propia, empleando Photoshop CS 2018.

2.4.6. Remoción de arsénico por alúmina activada

Esta técnica es muy efectiva cuando en el agua hay presencia de sólidos disueltos, la alúmina activada es altamente selectiva para el As(V) con una eficiencia mayor al 95 %, la remoción de dicho elemento se da en pH ácido siendo este en un rango de 5,5 a 6 cuando la alúmina está protonada.²⁰

Para la eliminación de arsenito As (III) esta técnica es ineficiente por lo que se debe hacer un tratamiento de oxidación previo en el cual se puede utilizar hipoclorito de sodio.

2.5. Metodologías para la determinación de la concentración de arsénico en el agua

Existen diversas metodologías para determinar la concentración de arsénico presente en el agua para consumo humano, cabe resaltar que se han utilizado variedades de técnicas analíticas dependiendo de la concentración de arsénico presente en las muestras de interés, así como los requerimientos acordados al agua que se esté evaluando.

2.5.1. Espectrofotometría de absorción atómica por el método de llama (FLAAS)

La absorción atómica es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del sistema periódico. Este método se puede aplicar para la determinación de ciertos metales como: antimonio, arsénico, cadmio, calcio, cesio, cromo, cobalto, oro, plomo, níquel, entre otros. Se emplea para el análisis de agua, de suelo, bioquímica, toxicología,

²⁰ CASTRO DE ESPARZA, María Luisa. *Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos*. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/remocion-agua.pdf>. Consulta: abril de 2020.

medicina, industria farmacéutica, industria alimenticia, industria petroquímica, entre otros.

La espectrofotometría de absorción atómica (EAA), tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida selectivamente por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes.

2.5.2. Espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito (GFAAS)

La espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito, es también conocida como espectrofotometría de absorción atómica electrotérmica (ETAAS), La tecnología de horno de grafito es el resultado de la necesidad de contar con una técnica que empleara volúmenes mínimos de la muestra destinada al análisis.

El acoplamiento de la cámara u horno de grafito al espectrofotómetro de absorción atómica aporta una sensibilidad de detección de ppb (partes por billón) o $\mu\text{g/L}$, permitiendo trabajar con muestras de volumen muy reducido (inferior a 100 μL) o directamente sobre muestras orgánicas líquidas. Habitualmente se analizan muestras de material biológico-clínico, sólidos, lodos y disoluciones. Así mismo, por su alta sensibilidad la técnica se aplica en la detección de metales, tales como cobre (Cu), cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As) mercurio (Hg), productos farmacológicos, alimentos, industriales y también en agua superficial/subterránea.²¹

El proceso consta de cuatro etapas fundamentales: evaporación del solvente por medio de la rampa de calentamiento, calcinación de los componentes orgánicos volátiles de la muestra, atomización de los componentes residuales de la muestra y limpieza del tubo, el cual volatilizan los restos del

²¹ IBEROARSEN. *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos*. https://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/Monografia2_000.pdf. Consulta: febrero de 2020.

analito y se disocian en átomos libres, responsables de la absorción. Posteriormente la señal es almacenada en un registrador continuo.

2.5.3. Espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros (HGAAS)

La espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros, es un método estandarizado a nivel mundial, para determinar elementos que forman hidruros covalentes volátiles. Este método se basa en una reacción de generar hidrógeno en el seno de la disolución donde se halla el analito.

El acoplamiento de un generador de hidruros al espectrofotómetro de absorción atómica aporta una sensibilidad 5 o 10 veces mayor al horno de grafito, ya que es posible aislar completamente el elemento de las sustancias que acompañan la muestra, evitando las interferencias por efecto de la matriz. La técnica de generación de hidruros consta de tres etapas fundamentales: la generación y volatilización del hidruro metálico, la transferencia del mismo y su posterior atomización en el espectrofotómetro de absorción atómica.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se definen las variables independientes y dependientes que estuvieron presentes en la investigación, así como la importancia con la que cuenta cada variable con que se trabajó.

Tabla III. Variables presentes en la investigación

Variable	Unidad de dimensión	Factor potencial de diseño		Tipo de variable	
		Constante	Variable	Independiente	Dependiente
Concentración	mg/L		X		X
Caudal	L/s	X		X	
Tasa de infiltración	Gpm/pie ²	X		X	
Tiempo de retención	s		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La presente investigación tuvo como enfoque principal el agua para consumo humano, en donde como objetivo se considera la remoción de arsénico a los límites máximos permisibles por la COGUANOR 29 001, mediante una resina de intercambio iónica. Para llevar a cabo esta técnica se conocieron las características de la resina que fue utilizada, en este caso Greensand plus ya que es un medio filtrante negro utilizado para remover arsénico, así como otros metales los cuales pueden ser hierro y manganeso.

Para la determinación del caudal de diseño en el proceso experimental para la remoción de arsénico se toma en cuenta las especificaciones del medio filtrante en la cual recomienda una tasa de operación de 2-12 gpm/pie².

La finalidad es determinar la eficiencia en la remoción del medio filtrante por lo cual fueron realizadas diversas mediciones de tasas de filtración. La experimentación fue llevada a cabo en el Laboratorio Metalúrgico de Exploraciones Mineras de Guatemala.

3.3. Recurso humano disponible

- Investigador: María Fernanda López Escobedo
- Asesorado por: Ingeniero Químico, con especialización en ingeniería sanitaria Marvin Eduardo Mérida Cano, colegiado No. 2,013.

3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación, se enlistan los materiales necesarios para que la investigación se pueda llevar a cabo.

3.4.1. Medio filtrante

Resina GREENSAND PLUS

3.4.2. Reactivos

- Hipoclorito de sodio, para la activación de la resina a utilizar
- Agua, la cual fue tratada para llevar a los límites de arsénico permisibles por la COGUANOR 29 001

3.4.3. Instrumentos de medición

- Medidor de caudal
- Metro
- Cronómetro

3.4.4. Equipo

- Equipo de absorción atómica
- Canister, para la filtración del agua

3.4.5. Cristalería

- Beaker de varias capacidades
- Probetas de varias capacidades

3.4.6. Equipo de protección personal

- Botas de seguridad
- Bata
- Guantes de neopreno
- Guantes de látex
- Mascarilla química
- Lentes de protección

3.5. Técnica cuantitativa

La técnica especificada para estimar el número de muestras necesarias para obtener resultados certeros en la remoción de arsénico será efectuada bajo

3.5.1. Determinación del número de muestras de la población

Para la comprobación de la eficiencia del medio filtrante en la reducción de arsénico en el agua para consumo humano, se determina la cantidad mínima de muestras; fue calculado para un nivel de confiabilidad del 95 %, y que corresponde al método mencionado con anterioridad, obtenido de la Editorial Díaz Santos.

$$N \geq \left(\frac{t_s}{U}\right)^2$$

[Ecuación 1]

Se tomó una desviación estándar, s, 0,030 y un nivel de confianza, U, 0,020 y t, 1,895; obteniéndose para la relación s/U un valor de 1,5. Basándose de investigaciones realizadas con anterioridad. Y obteniendo seis como número de muestras a realizar para la comprobación del estudio de investigación.

Tabla IV. **Datos utilizados para determinar el número de muestras a realizar**

Parámetros	Arsénico en el agua
Promedio	0,04
Desviación estándar	0,03
Grados de libertad	7
"t" 95 %	1,895

Continuación de la tabla IV.

ERROR	0,02
Núm. de datos	8
Núm. de muestras	6

Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Prueba de espectrofotometría absorción atómica

Esta prueba tiene como objetivo determinar la concentración de un elemento metálico en una muestra, en esta investigación será útil para conocer la concentración de arsénico presente en el agua para consumo humano y con ello evaluar después de realizada dicha técnica de remoción de arsénico mediante la resina de intercambio iónica si la misma cumple con los parámetros establecidos por la Norma COGUANOR 29 001, la cual establece que el límite máximo permisible de arsénico en el agua para consumo humano es de 0,010 mg/L .

3.5.3. Proceso de filtración en medios acondicionados

Greensand plus, es un medio filtrante para remover arsénico, su capacidad de regeneración, adsorción y filtración dependen de la distribución de tamaño de partícula, de su forma y de los precipitados de óxidos de manganeso [$MnO_{2(s)}$].

3.5.3.1. Diseño del filtro

El diseño del filtro se realizó con la finalidad de remover arsénico del agua para consumo humano, para el proceso experimental del mismo se requiere

analizar el porcentaje de reducción de arsénico en un caudal definido, trabajando dentro el rango de la tasa de infiltración del medio filtrante.

Para la construcción del filtro se utilizó un *housing* fabricado de polietileno de alta densidad, el cual en su interior contiene un canister, el cual opera como columna conteniendo un medio filtrante, en este caso Greensand plus. El canister cuenta con medidas estándares de 2,5” de diámetro y 10” de altura; es de suma importancia para su correcto funcionamiento que se llene a un 75 % de su capacidad total.

3.5.3.2. Características físicas de Greensand plus

A continuación, se presentan características específicas de la resina mencionada con anterioridad:

Tabla V. **Características físicas Greensand plus**

Forma física	Color negro, gránulos nodulares formados en forma seca
Densidad aparente	88 Lb / pie ³ .
Gravedad específica	2,4
Porosidad	0,45
Coefficiente de uniformidad	menos de 1,60
Rango de pH	6,2 – 8,5 unidades
Flujo de retro lavado	Mínimo 12 gpm/pie ²
Flujo de servicio	2 – 12 gpm / pie ²

Fuente: SUMIWATER. *Medios de rendimiento para filtración de agua.*

<https://www.sumiwater.com/images/suministros-hidraulicos/02-cliente/04-archivos/Ficha%20tecnica%20Greensand%20Plus.pdf>. Consulta: abril de 2020.

3.5.4. Determinación del caudal de diseño

Para determinar el caudal del proceso experimental del filtro que tiene como objetivo la remoción de arsénico, se tomó en cuenta las especificaciones del medio filtrante, el cual como se menciona con anterioridad requiere una tasa de operación de 2-12 gpm/pie².

Se utilizará una probeta de 1 000 mL y cronómetro para medir el caudal máximo de filtración en el chorro con el cual se trabajará; seguido se utilizará un medidor de caudal para lograr incrementar la carga y disminuir el caudal filtrado.

Conociendo ya los parámetros se procedió a realizar el sistema continuo donde se instaló el filtro para realizar el proceso de reducción, el cual constó de una conexión del filtro con el agua subterránea para consumo humano, mediante una válvula de paso para regular el caudal de diseño, un medidor de caudal y por último una válvula de globo la cual permitió la obtención de las muestras que fueron tomadas y posteriormente analizadas.

3.5.5. Mantenimiento del medio filtrante

Al obtener las tasas de filtración y los parámetros de operación, se debe proceder a realizar un proceso de mantenimiento del medio filtrante, el mismo es el tiempo mediante el cual el proceso de saturación del medio filtrante se lleva a cabo; el tiempo depende de factores como la tasa de filtración, la concentración inicial del arsénico en el agua para consumo humano y la capacidad de filtración del medio filtrante; para con ello determinar el tiempo de retro lavado.

3.5.6. Proceso de activación

Basándose en la hoja técnica del medio filtrante se debe realizar un proceso de activación con hipoclorito de sodio, para activar el medio filtrante es necesario la utilización de 0,2 galones de hipoclorito de sodio al 12 % por cada pie cúbico de Greensand plus en 6,5 galones de agua, ya que se conoce el volumen del medio filtrante en donde intervienen el radio y la altura del canister siendo de 0,104 pies y 0,75pies respectivamente, por lo que se obtuvo un volumen del medio filtrante de 0,025 pies cúbicos. Por medio del volumen se obtiene la cantidad de hipoclorito de sodio que se debe agregar, siendo de 18,9 mililitros de hipoclorito de sodio, en 16 horas de reposo.

3.6. Recolección y ordenamiento de los datos

El objetivo principal de dicha investigación es lograr la remoción de arsénico en el agua para consumo humano, mediante una resina de intercambio iónica y cumplir con lo establecido en la Norma COGUANOR en cuanto al límite máximo permisible. A continuación, se describe la metodología a utilizar para llevar a cabo el estudio de investigación.

Tabla VI. Toma de datos acorde al diseño del filtro a utilizar

Variable	Dato obtenido
Volumen [L]	2,04
Caudal [L/min]	2,00
Tasa de infiltración [Gpm/pie ²]	7,79
Tiempo de retención [min]	0,35

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En esta sección se detallan las tablas utilizadas para la recolección de datos, que serán de utilidad para la realización de resultados.

Tabla VII. **Datos del tiempo de saturación, en el filtro piloto para reducción de arsénico**

Tiempo de retención en (min)	Tiempo de saturación [h]							Media	Desviación
	1	2	3	4	5	6			
0,35	7,08	14,08	19,92	24,92	30,33	35,75	22,42	10,55	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Concentración inicial y final para cada muestra analizada**

Concentración inicial de arsénico [mg/L]	Concentración final de arsénico [mg/L]						Media	Desviación
	1	2	3	4	5	6		
0,013	0,0091	0,0091	0,0088	0,0087	0,0086	0,0078	0,00875	0,000479

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Concentración final en el tiempo de saturación y porcentaje de reducción del arsénico en el caudal establecido**

Tiempo (h)	Concentración inicial [mg/L]	Concentración final [mg/L]	% Remoción	Media	Desviación
7,08	0,013	0,0091	30,00 %	32,69 %	0,03686
14,08		0,0091	30,00 %		
19,92		0,0088	32,31 %		
24,92		0,0087	33,07 %		
30,33		0,0086	33,85 %		
35,75		0,0078	40,00 %		

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico es una herramienta de gran utilidad para evaluar la relación entre las variables que son objeto de estudio y con ello determinar el número de repeticiones que se realizarán en el trabajo de investigación.

Tabla X. **Número de tratamientos y repeticiones para la evaluación de la eficiencia de reducción de arsénico en agua para consumo humano**

Niveles:	Corrida 1 Corrida 2 Corrida 3 Corrida 4 Corrida 5 Corrida 6	Número de niveles:	6
Número de tratamientos		1	
Número de repeticiones		6	
Total, de unidades experimentales		6	

Fuente: elaboración propia.

3.8.1. Diseño experimental

Se presentan las herramientas estadísticas utilizadas para corroborar los resultados a obtener.

3.8.1.1. Media aritmética

La media aritmética de un conjunto de valores $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ de una variable x viene determinada por la suma de dichos valores, dividida por el número de la muestra (n), representada matemáticamente de la siguiente forma:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

3.8.1.2. Varianza

Es la media de las desviaciones (x) al cuadrado respecto a la media aritmética (x_p) de una distribución estadística.

$$S^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{n-1}} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

3.8.1.3. Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza.

$$S = \sqrt{S^2} \quad [\text{Ecuación 4}]$$

3.8.1.4. Coeficiente de variación

Relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable.

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

[Ecuación 5]

3.9. Plan de análisis de resultados

El análisis de los resultados cuantitativos se realizará utilizando métodos gráficos, para determinar las ecuaciones de operación de la concentración final respecto al tiempo de saturación para un caudal establecido.

3.10. Análisis de un diseño factorial

En el análisis del diseño factorial se investigarán todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores.

3.11. Programas a utilizar en el análisis de datos

Microsoft Excel 2016, será utilizado para la realización de los cálculos, tablas y análisis de varianza.

Microsoft Word 2016, será utilizado para la agrupación de la información del trabajo de estudio final.

4. RESULTADOS

- Resultados de los niveles de concentración inicial de arsénico en agua para consumo humano.

Tabla XI. **Evaluación del nivel de concentración inicial de arsénico presente en agua para consumo humano**

Parámetro	Valor	Unidad
Concentración de arsénico	0,013	mg/L

Fuente: elaboración propia.

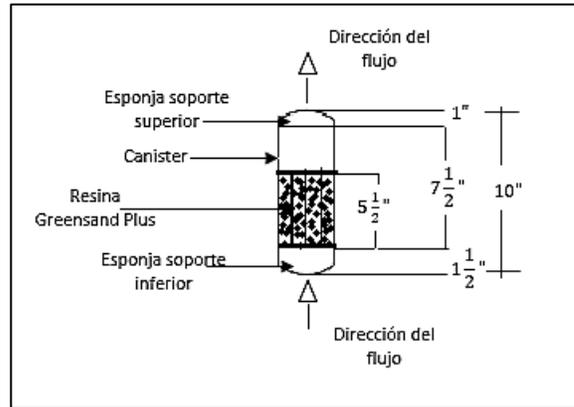
- Datos de condiciones de diseño y operación para el sistema de remoción de arsénico

Tabla XII. **Diseño y operación del sistema de remoción de arsénico**

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen del filtro	2,04	L
Caudal	2,00	L/min
Tasa de infiltración	7,79	gpm/pie ²
Tiempo de retención	0,35	min

Fuente: elaboración propia.

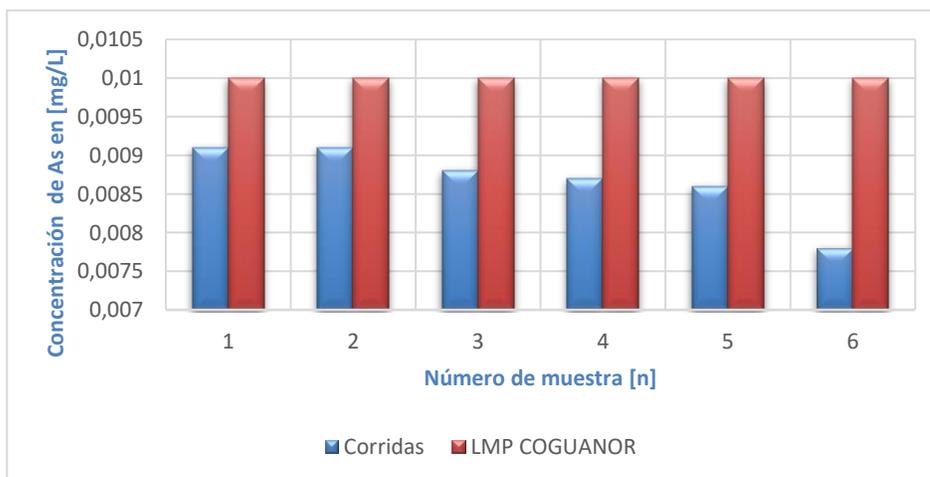
Figura 8. **Esquema de diseño del filtro para la remoción de arsénico**



Fuente: elaboración propia, Visio 2016.

- Resultados de pruebas de reducción de arsénico y comparación con los límites máximos permisibles según norma COGUANOR 29 001.

Figura 9. **Concentración de arsénico respecto al límite máximo permisible según la norma COGUANOR 29 001**



Fuente: elaboración propia, con datos de las tablas VII y VIII.

- Resultados del porcentaje de reducción de arsénico en agua para consumo humano.

Tabla XIII. **Porcentaje de reducción de arsénico**

Núm. Muestra	Tiempo de saturación [h]	Concentración final [mg/L]	% remoción [%]
1	7,08	0,0091	30,00
2	14,08	0,0091	30,00
3	19,92	0,0088	32,31
4	24,92	0,0087	33,07
5	30,33	0,0086	33,85
6	35,75	0,0078	40,00
Promedio		0,0087	32,69

Fuente: elaboración propia, con datos de la tabla IX.

- Análisis económico del proceso de reducción de arsénico por medio de una resina de intercambio iónica.

Tabla XIV. **Datos de costos del proceso de reducción de arsénico**

Descripción	Precio unitario [Q]	Total [Q]
Housing 10"	102,00	437,00
Cartucho rellenable	45,00	
Resina Greensand plus	30,00	
Hipoclorito de sodio	10,00	
Mano de obra	250,00	

* Los costos fueron consultados en noviembre 2020.

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo de investigación fue comprobar la eficiencia de una resina de intercambio iónica para la reducción de arsénico presente en agua para consumo humano a escala laboratorio en el municipio San José del Golfo, Guatemala. Así mismo, se determinó las condiciones óptimas para que el medio filtrante cumple con las especificaciones técnicas.

El arsénico es una sustancia sólida metaloide que existe en forma natural en la corteza terrestre y en las rocas molidas. La exposición de esta sustancia es natural, pero puede ser agravada debido a diversas actividades humanas, existen diferentes vías de exposición, pero el campo de interés para dicha investigación es en el agua potable. En la tabla XI, se muestra la evaluación del nivel de concentración inicial de arsénico presente en el agua para consumo humano, obteniendo una concentración de 0,013 mg/L, este valor se encuentra por encima de los límites máximos permisibles por la norma COGUANOR 29 001 y la Organización Mundial de la Salud; de no ser tratada esta puede dañar a quien la ingiera causando daños a la salud.

En la tabla XII, se muestran parámetros de diseño y operación del sistema de filtración para la reducción de arsénico; donde las variables de interés para la formación del mismo fueron el volumen, caudal, tasa de infiltración y el tiempo de retención, cabe mencionar que para la obtención de estos datos se trabajó con información de la ficha técnica del medio filtrante Greensand plus, en donde indica el rango de la tasa de infiltración recomendada está entre los 2 a 12 gpm/pie², Se trabajó en esta investigación con una tasa de 7,79 gmp/pie².

Para determinar el caudal de diseño se tuvo que considerar el rango de la tasa de infiltración que propone la ficha técnica de la resina, por lo que se trabajó con un caudal de 2 L/min.

En la figura 8, se muestra el esquema de diseño del filtro, para el proceso de construcción se utilizó un porta filtro (*housing*) hecho de polietileno de alta densidad, el cual en su interior contiene un cartucho rellenable (cánister) que opera como una columna y el mismo contiene el medio filtrante. Respecto al cánister este cuenta con medidas estándar de 2,5" de diámetro y 10" de altura, para su buen funcionamiento este debe estar lleno un 75 % de su capacidad total debido a las esponjas que contiene y al flujo de agua que circulará en él. Por último, el medio filtrante Greensand plus es utilizado para remover hierro, magnesio e incluso tiene la capacidad de remover radio y arsénico; esta resina tiene un recubrimiento de dióxido de manganeso que actúa como agente catalítico. Según sus características se requiere una activación previa antes de ser instalada, se utilizó hipoclorito de sodio, al 5 % y se cumplió con la cantidad y el tiempo estipulado según sus propiedades físicas.

En la figura 9, se muestra la concentración de arsénico y su comparación con el límite máximo permisible según la norma COGUANOR 29 001, para este análisis se tabularon el número de muestra y las variaciones de las concentraciones de arsénico, en la cual se puede observar que la concentración de arsénico es inversamente proporcional a la cantidad de agua filtrada, disminuyendo la concentración a medida que se fueron tomadas las muestras. En comparación con lo establecido según la norma COGUANOR 29 001 en que el límite máximo permisible es de 0,01 mg/L y realizando la comparación respectiva se llega a obtener que el medio filtrante cumplió con la reducción de arsénico, encontrándose la concentración por debajo de los valores de dicha norma y siendo esta apta para consumo humano.

En el resultado de la tabla XIII, se muestra el porcentaje de reducción de arsénico presente en agua para consumo humano, en donde se obtuvo una eficiencia promedio de 32,69 % debido a la concentración inicial de arsénico en la cual se deseaba remover 0,003 mg/L, por lo que el medio filtrante logró cumplir con el objetivo de remover la mayor cantidad de arsénico en el agua subterránea, obteniendo una concentración final promedio de 0,0087 mg/L. Respecto al tiempo de saturación, el mismo no fue determinado, debido a que la resina no llegó a su punto de saturación para necesitar un retro lavado, pero cabe mencionar que este tiempo depende de factores como la tasa de infiltración, la concentración inicial del arsénico en el agua y la capacidad de agua filtrada del medio filtrante. La capacidad de remoción de arsénico del medio filtrante se encuentra entre los 735,36 mg a 1 260,81 mg, según sus especificaciones técnicas.

En la tabla XIV, se muestra el análisis económico del proceso de reducción de arsénico, por medio de una resina de intercambio iónica, para la elaboración del filtro se obtuvo un costo total de inversión de Q437,00, el cual puede ser utilizado en un artefacto de una vivienda para uso doméstico; es importante mencionar que el porta filtro puede variar su capacidad y con ello aumentar las condiciones de trabajo, el cual va a depender del lugar donde se requiera la instalación del filtro. La salud del ser humano es de vital importancia y por ello el interés de construir un filtro que sea de utilidad para el ser humano, con bajo costo de adquisición y que se adapte a sus posibilidades económicas.

CONCLUSIONES

1. Por medio de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica se determinó concentración inicial de arsénico de 0,0013 mg/L del agua para consumo humano.
2. Para las condiciones de diseño y operación se debe tener en cuenta la tasa de infiltración según especificaciones técnicas de la resina de intercambio iónica, para lograr determinar eficiencias de reducción óptimas y lograr los resultados deseados.
3. La etapa de activación de la resina debe cumplir con los parámetros de concentración y tiempos calculados respecto a sus especificaciones técnicas, ya que de lo contrario al no realizar una etapa de activación adecuada la resina no podrá realizar el intercambio iónico y así poder reducir la concentración de arsénico eficientemente en el agua.
4. La concentración de arsénico luego de la filtración con una variación en el tiempo de cada muestra de agua para consumo humano, cumple con lo establecido según los límites máximos permisibles en la norma COGUANOR 29 001.
5. El porcentaje de reducción de arsénico promedio mediante la resina Greensand plus fue de 39,69 %, lo cual se obtuvo una concentración de arsénico promedio 0,0087 mg/L en agua para consumo humano.

6. Mediante el análisis económico se determinó la viabilidad y factibilidad del proceso de reducción de arsénico en agua para consumo humano, demostrando que el proceso es rentable y sostenible económicamente adaptándose a la población que sea de utilidad.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio en distintos sectores del municipio San José del Golfo, departamento de Guatemala para determinar si existe variación en la concentración de arsénico presente en agua para consumo humano.
2. Tomar en cuenta el volumen del cartucho rellenable para la cantidad de hipoclorito de sodio y llenar solo un 75 % de su totalidad para permitir la ubicación de las esponjas retenedoras y el flujo de agua al momento de llevar a cabo la activación de la resina.
3. Determinar para una próxima investigación el tiempo de saturación de la resina para determinar la cantidad de volumen que debe transcurrir para realizar un retro lavado y seguir trabajando con las condiciones adecuadas del medio filtrante.
4. Comprobar la eficiencia de reducción de arsénico, realizando un cambio en el medio filtrante por *Katalox Ligth* que cumple con los parámetros de interés en este caso la remoción de arsénico.
5. Realizar un estudio socioeconómico para determinar la rentabilidad del filtro y los beneficios a largo plazo que garanticen el buen funcionamiento del medio filtrante.
6. Realizar un estudio que evalué la eficiencia de reducción de la resina en presencia de concentraciones altas de arsénico en agua para consumo humano.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGGETT, Peter. *The determination of arsenic(III) and total arsenic by atomic-absorption spectroscopy.* [en línea]. <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1976/an/an9760100341/unauth>>. [Consulta: mayo de 2020].
2. ATSDR. *Resumen de salud pública- Arsénico.* [en línea]. <https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html>. [Consulta: febrero de 2020].
3. CASTRO DE ESPARZA, María Luisa. *Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos.* [en línea]. <<http://www.ingenieroambiental.com/4014/remocion-agua.pdf>>. [Consulta: marzo de 2020].
4. CEAB-UVG. *Cambio Climático: Riesgo de Sequía e Inseguridad Alimentaria.* [en línea]. <<https://www.marn.gob.gt/multimedios/914.pdf>>. [Consulta: marzo de 2020].
5. COGUANOR. *NTG 29001. Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2013. 12 p.

6. DOMINIGHINI, Claudio; MUSCIA, Lucas; CATALDI, Zulma; SCURATI, Carlos; OLIVERO, Marcelo, GOTTARDO, Marcelo. *Análisis de membranas de ósmosis inversa en potabilización de agua para consumo humano.* [en línea]. <<https://copec.eu/congresses/shewc2016/proc/works/29.pdf>>. [Consulta: marzo de 2020].
7. DVORAK, Bruce; SKIPTON, Sharon. *Drinking Water Treatment:Distillation.* [en línea]. <<http://ianrpubs.unl.edu/water/g1493.htm>>. [Consulta: abril de 2020].
8. EPA. *Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems.* [en línea]. <https://cfpub.epa.gov/safewater/arsenic/arsenictradeshaw/Pubs/handbook_arsenic_treatment-tech.pdf>. [Consulta: junio de 2020].
9. GERMAIN, Darin; DI BENEDETTO, Patrick. *Opciones para la eliminación del arsénico.* [en línea]. <https://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/13-eliminacion_arsenico.pdf>. [Consulta: marzo de 2020].
10. IBEROARSEN. *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos.* [en línea]. <https://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/Monografia2_000.pdf>. [Consulta: febrero de 2020].

11. ICC. *Descubriendo el agua subterránea de la costa sur de Guatemala*. [en línea]. <<https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2019/07/Bolet%C3%ADn-Cambio-Clim%C3%A1tico-No.-1-2019.pdf>>. [Consulta: abril de 2020].
12. LESIKAR, Bruce; MELTON, Rebecca; HARE, Michael; HOPKINS, Janie; DOZIER, Monty. *Problemas del agua potable: El arsénico*. [en línea]. <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87347/pdf_2187.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Consulta: febrero de 2020].
13. LESIKAR, Bruce; MELTON, Rebecca; HARE, Michael; HOPKINS, Janie; DOZIER, Monty. *Problemas del agua potable: Los radionúclidos*. [en línea]. <<https://cdn-ext.agnet.tamu.edu/wp-content/uploads/2019/03/EB6192S-problemas-del-aqua-potable-los-radionuclidos.pdf>>. [Consulta: julio de 2020].
14. MINOIA, Claudio; CAROLI, Sergio. *Applications of Zeeman Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry in the Chemical Laboratory and in Toxicology*. [en línea]. <<https://www.elsevier.com/books/applications-of-zeeman-graphite-furnace-atomic-absorption-spectrometry-in-the-chemical-laboratory-and-in-toxicology/minoia/978-0-08-041019-7>>. [Consulta: mayo de 2020].

15. MONTAÑO, Xavier. *Recursos hídricos subterráneos del Uruguay*. [en línea].
<http://asgmi.igme.es/Boletin/2006/117_1_2006/Art.13.PDF>.
[Consulta: abril de 2020].
16. OMS. *Arsenic in Drinking Water*. [en línea].
<https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/arsenic.pdf>. [Consulta: enero de 2020].
17. OMS. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4a ed. Ginebra: OMS, 2018.
541 p.
18. ORDOÑEZ GÁLVEZ, Juan Julio. *Aguas subterráneas – acuíferos*. [en línea].
<https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterraneas.pdf>.
[Consulta: marzo de 2020].
19. PENA, Carlos María. *Manual de Agua Subterránea*. [en línea].
<http://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf>. [Consulta: enero de 2020].
20. PÉREZ, Fidel; PRIETO, Francisco; ROJAS, Alberto; MARMOLEJO, Yolanda. *Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, Estado de Hidalgo, México*. [en línea].
<https://www.researchgate.net/publication/44200326_Estudio_de_eliminacion_de_arsenico_con_resinas_de_intercambio_ionico_en_agua_potable_de_Zimapan_Estado_de_Hidalgo_Mexico>.
[Consulta: mayo de 2020].

21. SUMIWATER. *Medios de rendimiento para Filtración de agua*. [en línea]. <<https://www.sumiwater.com/images/suministros-hidraulicos/02-cliente/04-archivos/Ficha%20tecnica%20Greensand%20Plus.pdf>>. [Consulta: abril de 2020].

22. Universidad de Córdoba. *TEMA 8: Espectroscopía Fotoelectrónica de rayos X (XPS)*. [en línea]. <<http://www.uco.es/~iq2sagrl/TranspTema8.pdf>>. [Consulta: marzo de 2020].

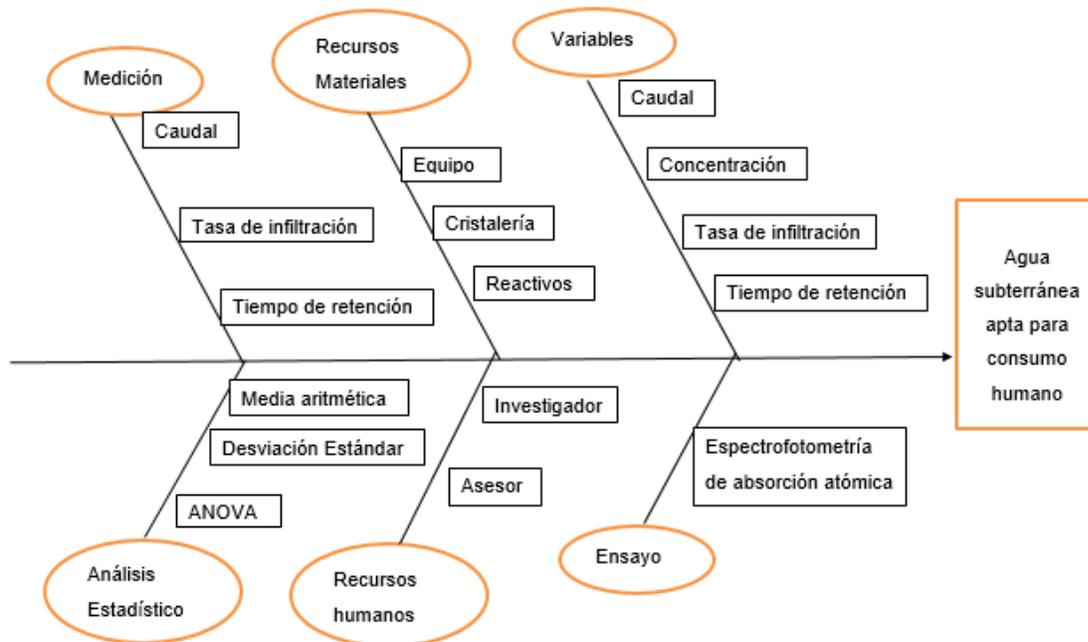
APÉNDICE

Apéndice 1. Requisitos académicos

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Química	Área de química	Química 3	Reacciones químicas
		Química 4	Expresión de concentraciones
		Análisis cuantitativo	Dureza del agua
	Área de fisicoquímica	Laboratorio de fisicoquímica 1	Diseño experimental de una investigación
	Área de operaciones unitarias	Laboratorio de operaciones 1	Determinación de caudal
	Área de especialización	Calidad del agua	Remoción de materiales pesados
	Área de ciencias básicas y complementaria	Estadística 1	Estadística descriptiva
	Estadística 2	Análisis de varianza, comprobación de hipótesis.	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa o árbol de problemas



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Apéndice 3. Metodología de cálculo

A continuación, se presentarán cálculos que fueron de importancia para la obtención de resultados del trabajo de investigación.

1.1. Condiciones de diseño para el sistema de remoción de arsénico

Para determinar las condiciones de diseño también se debe tener en cuenta las características físicas de la resina a utilizar, uno de los datos importantes es la tasa de infiltración máxima que en este caso para Greensand plus es de 12 gpm/pie² y con base al caudal de operación dar a conocer si se cumple con el rango establecido de tasa de infiltración

- Volumen del medio filtrante

Este dato es utilizado para el proceso de activación de la resina Greensand plus y va a depender de las medidas del cartucho con el que se trabaje.

$$V = \pi r^2 H$$

- Área del medio filtrante

Ecuación utilizada para determinar el caudal de trabajo, tomando en cuenta la tasa de infiltración máxima según las propiedades físicas de la resina.

$$A = 2\pi r^2$$

Continuación del apéndice 3.

- Caudal del medio filtrante
- Teniendo ya el caudal y los distintos volúmenes en que fueron tomadas las muestras del campo de estudio, se puede determinar el tiempo de saturación de la resina utilizada y con ello evaluar los parámetros para realizar un retro lavado.

$$Q = \frac{V}{t}$$

1.2. Porcentaje de remoción de arsénico

Utilizado para determinar la eficiencia del medio filtrante respecto a lo establecido por la norma COGUANOR 29 001.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{|C_T - C|}{C_T} * 100$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Obtención de la resina Greensand plus**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 5. **Recolección de materiales para la construcción del medio filtrante**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 6. **Construcción y diseño del equipo para el proceso de remoción de arsénico de agua para consumo humano**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 7. **Activación de la resina Greensand plus, utilizando hipoclorito de sodio**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 8.

Llenado de cartucho con la resina previamente activada



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 9. **Toma de tiempos para poder determinar el caudal de trabajo**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 10. **Medidor de caudal**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 11. **Toma de muestras para determinar la concentración inicial de arsénico sin el medio filtrante**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 12. **Toma de muestras para determinar el porcentaje de remoción de arsénico por medio de la resina Greensand plus**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

Apéndice 13. **Coloración del agua antes y después del proceso de filtración**



Fuente: laboratorio Metalúrgico y Control de Calidad, Exmingua. S.A.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados de concentración inicial de arsénico presente en el agua para consumo humano



ECOQUIMSA
LABORATORIO ECOLOGICO Y QUIMICO

9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt
Página Web: ecoquimsa.com
PBX: (502) 2322 3600

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

Datos del Cliente
Cliente: Srta. María Fernanda López Escobedo

Datos de la muestra

Lugar de muestreo:	San José del Golfo	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Chorro, corrida 0	Responsable del muestreo:	CLIENTE
Fecha de monitoreo:	30 de septiembre de 2020	Temperatura de almacenaje:	5 °C
Hora de monitoreo:	10:30	Recipiente utilizado:	Plástico
Tipo de muestra:	Agua para consumo humano	Método de preservación:	INS04-MUE
Código de muestra:	20-3262-1		
Lote:	20-3262		

Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio:	30 de septiembre de 2020
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio:	13:45
Fecha de informe:	12 de septiembre de 2020

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de Detección	Resultados	LMP ⁽²⁾	Método de análisis ⁽³⁾
Arsénico	mg/L - As	0.0008	0.013	0.01	STM 3114 C

(1) mg/L = ppm.
(2) LMP: Límite Máximo Permisible (Coguanor NTG 29 001).
(3) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

El análisis de este informe es acreditado COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025:2005 según OGA-LE-051-13
El presente resultado es válido únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMSA.



Laboratorio ECOQUIMSA
Lic. Edgar del Pozo
Químico
Colegiado No. 4913

1/2

Continuación anexo 1.



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt
Página Web: ecoquimsa.com
PBX: (502) 2322 3600

Guatemala, 12 de octubre de 2020

Señorita
María Fernanda López Escobedo
Presente

Estimada Srta. López:

Según los resultados de análisis de laboratorio consignados en el informe con número de lote 20-3262 y las referencias Chorro, corrida 0 y Chorro, corrida 1:

Le manifiesto que, al comparar los resultados, de los parámetros fisicoquímicos analizados, con la norma COGUANOR NTG 29 001 – Agua para consumo humano (Agua potable), se encontró que la concentración de Arsénico, presente en las muestras no cumplen con la norma en mención.

La principal fuente de Arsénico del agua de consumo es la disolución de minerales y menas de origen natural. Es un contaminante importante del agua de consumo, ya que es una de las pocas sustancias que se ha demostrado que producen cáncer en el ser humano por consumo de agua potable. Hay pruebas de estudios epidemiológicos, de que el consumo de cantidades altas de arsénico en el agua potable está relacionado causalmente con el desarrollo de cáncer en varios órganos, en particular la piel, la vejiga y los pulmones. Basado en la preocupación por su capacidad cancerígena, la OMS fijó desde 1993 un valor de referencia de 0.01 mg/L. (Tomado de: Guías para la calidad del agua potable, Organización Mundial de la Salud, 2006).

Sin otro particular, le reiteramos que para ECOQUIMSA es un gusto atenderles.

Atentamente,



Laboratorio ECOQUIMSA

Lic. Edgar del Rozo
Químico
Colegiado No. 4943

Fuente: laboratorio Ecológico y Químico, ECOQUIMSA.

Anexo 2. **Informe de resultados de la muestra 2 para determinar la concentración de arsénico en el agua para consumo humano pasando por el medio filtrante**



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
 E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt
 Página Web: ecoquimsa.com
 PBX: (502) 2322 3600

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

Datos del Cliente

Cliente: Sra. María Fernanda López Escobedo

Datos de la muestra

Lugar de muestreo:	San José del Golfo	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Chorro, corrida 02	Responsable del muestreo:	CLIENTE
Fecha de monitoreo:	16 de noviembre de 2020	Temperatura de almacenaje:	5 °C
Hora de monitoreo:	11:30	Recipiente utilizado:	Plástico
Tipo de muestra:	Agua para consumo humano	Método de preservación:	INS04-MUE
Código de muestra:	20-3904-1		
Lote:	20-3904		

Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio:	16 de noviembre de 2020
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio:	14:20
Fecha de informe:	23 de noviembre de 2020

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de Detección	Resultados	LMP ⁽²⁾	Método de análisis ⁽³⁾
Arsénico	mg/L - As	0.0008	0.0091	0.010	STM 3114 C

(1) mg/L = ppm.

(2) LMP: Límite Máximo Permisible (COGUANOR NTG 29 001).

(3) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

El presente resultado es válido únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
 El agua es apta para consumo humano si el resultado es menor que el LMP de la norma COGUANOR.
 Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMSA.


 Laboratorio ECOQUIMSA
 Lic. Edgar del Pozo
 Químico
 Colegiado No. 4943

Continuación anexo 2.



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt
Página Web: ecoquimsa.com
PBX: (502) 2322 3600

Guatemala, 23 de noviembre de 2020

Señora
María Fernanda López Escobedo
Presente

Estimada Sra. López:

Según el resultado de análisis de laboratorio consignado en el informe con número de lote 20-3904 y referencia Chorro, corrida 02:

Le manifiesto que, al comparar el resultado, del parámetro fisicoquímico analizado, con la norma COGUANOR NTG 29 001 – Agua para consumo humano (Agua potable), se encontró que cumple con la norma en mención.

Sin otro particular, le reiteramos que para ECOQUIMSA es un gusto atenderles.

Atentamente,



Laboratorio ECOQUIMSA
Lic. Edgar del Pozo
Químico
Colegiado No. 4943

Fuente: laboratorio Ecológico y Químico, ECOQUIMSA.

Anexo 3. **Informe de resultados de la muestra 3 para determinar la concentración de arsénico en el agua para consumo humano pasando por el medio filtrante**



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
 E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt
 Página Web: ecoquimsa.com
 PBX: (502) 2322 3600

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

Datos del Cliente

Cliente: Srta. Maria Fernanda López Escobedo

Datos de la muestra

Lugar de muestreo:	San José del Golfo	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Grifo No. 3	Responsable del muestreo:	CLIENTE
Fecha de monitoreo:	07 de diciembre de 2020	Temperatura de almacenaje:	5 °C
Hora de monitoreo:	11:00	Recipiente utilizado:	Plástico
Tipo de muestra:	Agua para consumo humano	Método de preservación:	INS04-MUE
Código de muestra:	20-4236-1		
Lote:	20-4236		

Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio:	07 de diciembre de 2020
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio:	15:45
Fecha de informe:	18 de diciembre de 2020

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de Detección	Resultados	LMP ⁽²⁾	Método de análisis ⁽³⁾
Arsénico	mg/L - As	0.0008	0.0088	0.01	STM 3114 C

(1) mg/L = ppm.

(2) LMP: Límite Máximo Permisible (COGUANOR NTG 29 001).

(3) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

El presente resultado es válido únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMSA.


 Laboratorio ECOQUIMSA
 Lic. Edgar del Pozo
 Químico
 Colegiado No. 4943

Continuación anexo 3.



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt
Página Web: ecoquimsa.com
PBX: (502) 2322 3600

Guatemala, 12 de enero de 2021

Señorita
María Fernanda López Escobedo
Presente

Estimada Srta. López:

Según los resultados de análisis de laboratorio consignados en el informe con número de lote 20-4236 y la referencia Grifo No. 3:

Le manifiesto que, al comparar los resultados, de los parámetros fisicoquímicos analizados, con la norma COGUANOR NTG 29 001 – Agua para consumo humano (Agua potable), se encontró que todos los parámetros cumplen con la norma en mención.

Sin otro particular, le reiteramos que para ECOQUIMSA es un gusto atenderles.

Atentamente,



Laboratorio ECOQUIMSA

Lic. Edgar del Pozo
Químico
Colegiado No. 4943

Fuente: laboratorio Ecológico y Químico, ECOQUIMSA.

Anexo 4. **Informe de resultados de la muestra 6 para determinar la concentración de arsénico en el agua para consumo humano pasando por el medio filtrante**



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
 E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt
 Página Web: ecoquimsa.com
 PBX: (502) 2322 3600

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

Datos del Cliente

Cliente: Srta. María Fernanda López Escobedo

Datos de la muestra

Lugar de muestreo:	San José del Golfo	Muestra simple o compuesta:	Simple
Referencia cliente:	Chorro corrida No. 6	Responsable del muestreo:	CLIENTE
Fecha de monitoreo:	14 de diciembre de 2020	Temperatura de almacenaje:	5 °C
Hora de monitoreo:	11:30	Recipiente utilizado:	Plástico
Tipo de muestra:	Agua para consumo humano	Método de preservación:	INS04-MUE
Código de muestra:	20-4350-1		
Lote:	20-4350		

Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio:	14 de diciembre de 2020
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio:	15:50
Fecha de informe:	28 de diciembre de 2020

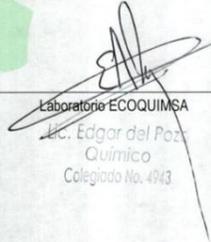
Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de Detección	Resultados	LMP ⁽²⁾	Método de análisis ⁽³⁾
Arsénico	mg/L - As	0.0008	0.0078	0.01	STM 3114 C

(1) mg/L = ppm.

(2) LMP: Límite Máximo Permissible (COGUANOR NTG 29 001).

(3) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

El presente resultado es válido únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMSA.


 Laboratorio ECOQUIMSA
 Lic. Edgar del Pozo
 Químico
 Colegiado No. 4943

Continuación anexo 4.



Fuente: laboratorio Ecológico y Químico, ECOQUIMSA.

Anexo 5. **Cotización sobre materiales para la elaboración del medio filtrante**

COMERRSA, S.A.
 KM. 26.5 CARRETERA A EL SALVADOR CRUCE A SANTA ELENA BARILLAS
 NIT: 191639-4
 TEL: 66348737





CLIENTE: MARIA FERNANDA **PROFORMA No.:** GT2020205
CONTACTO: **TELÉFONO:**
referencia: CANISTER
FECHA: 15 de julio de 2020

Cant.	Descripción	Precio Unitario	Total
1	Canister para filtro rellenable de 10"	Q. 45.00	Q. 45.00
3	saco de 1/2 pie3 de Inversand Greensand Plus (descontinuado)	Q. 564.00	Q. 1,128.00
1	saco de 1 pie cúbico de turbodex filter media	Q. 1,210.00	Q. 1,210.00
			Q. -
			Q. -
			Q. 2,383.00

Tiempo de entrega: Inmediata
Pago: Contado con acreditación a cuenta
 Atentamente
 Ing. Mario Hernández
mbernandez@comerrsa.com

COMERRSA, S.A
 Km. 26.5 Carretera a El Salvador cruce a Santa Elena Barillas, Villa Canales, Guatemala
 NIT: 191639-4

DATOS BANCARIOS

Cuenta Banco INDUSTRIAL
 Moneda Quetzales 000006718
 Moneda Dólares 5 270000499

Cuenta Banco C&T
 Moneda Quetzales 015 2336954-9
 Código Preveces GTX: 38384

DATOS PARA NOTIFICACIÓN DE PAGOS
 cobro@comerrsa.com



Fuente: COMERRSA, S.A.

