

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA



**Evaluación de la efectividad de la semilla de Teberinto
(*Moringa oleífera* Lam.) como método de remoción de
arsénico y plomo en agua para consumo humano**

POR:

MELISSA LORENA HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

HELEN CAROLINA RIVAS ZAMORA

GABRIELA BEATRIZ VENTURA BOLAÑOS

REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA AGROINDUSTRIAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

LIC. M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

LIC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO:

ING. AGR. M. Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO:

ING. AGR. M. Sc. LUIS FERNANDO CASTANEDA ROMERO

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA:

ING. AGR. OSCAR MAURICIO CARRILLO TURCIOS

DOCENTES DIRECTORES:

LIC. M. Sc. FREDDY ALEXANDER CARRANZA ESTRADA

LIC. M. Sc. BLANCA LORENA BONILLA DE TORRES

LIC. DANIEL DE JESÚS PALACIOS

COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACIÓN:

ING. AGR. M. Sc. JUAN MILTON FLORES TENSOS

RESUMEN

El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas en la Universidad de El Salvador, en el periodo de junio 2016 a abril 2017. Para evaluar la efectividad de la semilla de *Moringa oleífera* Lam. en la remoción de arsénico y plomo, se prepararon dos muestras de agua a nivel de laboratorio, la primera enriquecida con arsénico y la segunda con plomo, a una concentración aproximada de 1.00 mg/l.

Las muestras se dosificaron en frascos plásticos de 1.0 litro, y se evaluaron tres dosis de harina de semillas: 0.25, 0.50 y 1.00 g/l y tres tiempos de reacción: 1, 2 y 3 horas, realizando tres repeticiones por tratamiento. Una vez transcurrido el tiempo de reacción, se procedió a filtrar el agua tratada, utilizando un filtro casero para remover los flóculos formados posterior al tratamiento. Se determinó la concentración de los metales en las muestras de agua, antes y después de los tratamientos, calculando el porcentaje de remoción de dichos metales y comparando los resultados obtenidos con la normativa para agua potable NSO 13.07.01:08.

El análisis de las variables en estudio se rigió por el Diseño Factorial, utilizando el Programa Estadístico InfoStat 2014-E y el Software IBM PASS SPSS 22 Statistics, a un nivel de confianza del 95%. En el estudio se concluye que la harina a partir de semillas de *Moringa oleífera* Lam. es efectiva en la remoción de metales pesados, para el caso del arsénico el porcentaje de remoción más alto fue de 82.11% (1.00 g en 1 hora) y para el plomo el porcentaje de remoción más alto fue de 99.90% (0.50 g en 3 horas y 1.00 g en 2 y 3 horas).

A pesar de haber removido más del 80% de arsénico, concentración inicial de 1.025 mg/l, no se cumplió con los valores establecidos por la normativa para agua potable NSO 13.07.01:08 (0.01 mg/l As), obteniendo una concentración final de 0.183 mg/l; en el caso del plomo las concentraciones removidas fueron arriba del 98%, por lo tanto cumplieron con los límites máximos exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08 (0.01 mg/l Pb), e incluso presentaron valores inferiores al máximo permitido por dicha norma.

Palabras Claves: *Moringa oleífera* Lam., arsénico, plomo, agua para consumo, bioadsorción, metales pesados.

ABSTRACT

The present study was developed in the Laboratory of Agricultural Chemistry of the Faculty of Agronomic Sciences of the University of El Salvador, from June 2016 to April 2017. To evaluate the effectiveness of *Moringa oleifera* Lam. in the removal of arsenic and lead, two water samples were prepared at laboratory level, the first one was enriched with arsenic and the second with lead, at a concentration of approximately 1.00 mg/l.

Samples were dosed in 1.0 liter plastic flasks, and three doses of seed meal were evaluated: 0.25, 0.50 and 1.00 g/l and three reaction times: 1, 2 and 3 hours, with three replicates per treatment. After the reaction time had elapsed, the treated water was filtered, using a home filter to remove the flocs formed after the treatment.

The concentration of the metals in the water samples, before and after the treatments, was determined by calculating the percentage of removal of these metals and comparing the results obtained with the regulations for drinking water NSO 13.07.01:08 (As 0.01 mg/l and Pb 0.01 mg/l).

The analysis of the variables under study was governed by the Factorial Design, using the InfoStat 2014-E Statistical Program and the IBM PASS SPSS 22 Statistics Software, at a 95% confidence level. The study concludes that the flour from *Moringa oleifera* Lam. is effective in the removal of heavy metals. In the case of arsenic, the highest removal rate was 82.11% (1.00 g in 1 hour) and for lead the highest removal percentage was 99.90% (0.50 g in 3 Hours and 1.00 g in 2 and 3 hours).

Despite having removed more than 80% of arsenic, initial concentration of 1,025 mg/l, the values established by the regulations for drinking water NSO 13.07.01:08 (0.01 mg/l As) were not met, obtaining a concentration end of 0.183 mg/l; in the case of lead the concentrations removed were above 98%, therefore they met the maximum limits required by regulations for drinking water NSO 13.07.01:08 (0.01 mg/l Pb), and even presented values below the maximum allowed by that standard.

Keywords: *Moringa oleifera* Lam., arsenic, lead, drinking water, bioadsorption, heavy metals.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS TODO PODEROSO: Por habernos acompañado y guiado a lo largo de nuestra carrera, por ser nuestra fortaleza en los momentos de debilidad e iluminar nuestra mente. Por ello, dedicamos completamente este proyecto de investigación a nuestro Dios, ya que solo El hizo posible la realización del mismo; desde el inicio, hasta el final.

A LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR: Por brindarnos toda la formación académica a lo largo de nuestra carrera universitaria a través de principios, valores y lineamientos esenciales; acogiendo a todas las personas que tienen deseo de triunfar con lo cual nos sentimos comprometidas de honrar esta institución en nuestra vida profesional.

A LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS: La cual nos abrió las puertas para formarnos durante la carrera, gracias personal administrativo y docente por apoyarnos en cada necesidad. Un agradecimiento especial para los **DOCENTES** que a lo largo de la carrera nos enseñaron, guiaron y motivaron a ser profesionales de éxito. Gracias Ing. Eugenia Torres de Ortiz, Ing. Edwin de León, Ing. María Julia Hidalgo e Ing. Lourdes Centeno por dejar una huella en nosotros y motivarnos a ser mejores cada día.

AL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA: Ing. Milton Flores, Ing. Flor López, Lic. Norbis Solano, Lic. Freddy Carranza, Licda. Lorena de Torres, Licda. Yanira de Linares, Ing. Oscar Carrillo, Lic. Mario Hernández y Dorita, por abrir las puertas del departamento y darnos la oportunidad de realizar nuestro proyecto de tesis, dedicando su tiempo de trabajo y facilitarnos los materiales y equipos para la realización de los análisis en el laboratorio, por lo anterior mil gracias.

A NUESTROS DOCENTES ASESORES: Lic. M. Sc. Freddy Carranza, Lic. M. Sc. Lorena de Torres y Lic. Daniel Palacios, agradecemos su tiempo, paciencia, dedicación y oportuna colaboración en cada una de las etapas del proyecto de investigación, ya que sin su apoyo no hubiese sido posible la realización del mismo.

A LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL EVALUADOR DE TESIS: Ing. Agr. Flor de María López, Ing. M. Sc. Blanca Eugenia Torres de Ortiz y Lic. M. Sc. Norbis Salvador Solano Melara, por el tiempo, apoyo y orientación brindada en el desarrollo de la investigación.

A NUESTROS AMIGOS DE QUÍMICA Y FARMACIA: Elías Rafael Casco y Rocío Amaya, por habernos brindado su tiempo, amistad, apoyo técnico y colaboración en el desarrollo de la investigación. Gracias por todo, por siempre Moringologas.

A NUESTRAS FAMILIAS: Por apoyarnos y guiarnos para llegar hasta donde estamos, sabemos que sin su amor, dedicación, sacrificio y apoyo esto no hubiese sido posible. Les amamos y agradecemos familia.

A todas aquellas personas de una o de otra manera nos brindaron su tiempo para colaborarnos y nos aportaron sus conocimientos les reiteramos nuestro más sinceros agradecimientos.

“No hay secretos para el éxito. Éste se alcanza preparándose, trabajando arduamente y aprendiendo del fracaso” (Colin Powell).

Melissa Lorena Hernández Sánchez

Helen Carolina Rivas Zamora

Gabriela Beatriz Ventura Bolaños

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Agua potable	3
2.2 Presencia de metales pesados en fuentes de agua	3
2.2.1 Arsénico (As)	4
2.2.1.1 Situación de la contaminación por arsénico en el agua en El Salvador	5
2.2.1.2 Enfermedades causadas por arsénico.....	5
2.2.2 Plomo (Pb).....	6
2.2.2.1 Situación de la contaminación por plomo en el agua en El Salvador	7
2.2.2.2 Enfermedades causadas por plomo.....	7
2.3 Métodos para la remoción de metales pesados en medios acuosos.....	8
2.3.1 Técnicas convencionales de remoción de metales pesados	8
2.3.1.1 Filtración por membrana.....	8
2.3.1.2 Intercambio iónico.....	9
2.3.1.3 Adsorción (convencional)	9
2.3.1.4 Precipitación química.....	9
2.3.1.5 Coagulación-Floculación	10
2.3.2 Técnicas no convencionales de remoción de metales pesados	10
2.3.2.1 Bioadsorción	10
2.3.2.2 Materiales bioadsorbentes.....	11
2.4 Generalidades de la <i>Moringa oleífera</i> Lam.	12
2.4.1 Origen de la <i>Moringa oleífera</i> Lam.	12
2.4.2 Descripción botánica de la especie.....	12
2.4.3 Usos de la <i>Moringa oleífera</i> Lam.	14
2.4.4 Antecedentes	15
2.4.5 Utilización de la semilla de <i>Moringa oleífera</i> Lam. en tratamientos de agua	17
2.4.6 Toxicidad y contenido químico de la <i>Moringa oleífera</i> Lam.	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1 Descripción del estudio.....	20
3.2 Metodología de campo	20

3.2.1	Recolección de vainas de <i>Moringa oleífera</i> Lam.....	20
3.2.2	Construcción del filtro casero.....	20
3.3	Metodología de laboratorio.....	22
3.3.1	Procesamiento de la semilla de <i>Moringa oleífera</i> Lam. como bioadsorbente.....	22
3.3.2	Preparación de las muestras de agua.....	23
3.3.3	Preparación de los tratamientos.....	26
3.3.4	Análisis de laboratorio.....	27
3.3.5	Porcentaje de remoción de metales pesados.....	27
3.4	Metodología estadística.....	28
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	30
4.1	Fase pre-tratamiento.....	30
4.1.1	Concentración inicial de muestras de agua preparadas.....	30
4.1.2	Rendimiento de la harina de <i>Moringa oleífera</i> Lam.....	30
4.2	Fase de post-tratamiento del arsénico.....	31
4.2.1	Prueba de normalidad.....	31
4.2.2	Análisis de varianza paramétrico.....	31
4.2.3	Prueba posteriori.....	31
4.2.4	Porcentaje de remoción final arsénico.....	33
4.2.5	Resultados de arsénico comparados con la normativa para agua potable NSO 13.070.01:08.....	34
4.2.6	Determinación del efecto dosis-tiempo sobre remoción de arsénico.....	35
4.3	Fase de post-tratamiento del plomo.....	36
4.3.1	Prueba de normalidad.....	36
4.3.2	Análisis de varianza no paramétrica.....	36
4.3.3	Prueba posteriori.....	37
4.3.4	Porcentaje de remoción final plomo.....	38
4.3.5	Resultados de plomo comparados con la normativa para agua potable (NSO 13.07.01:08).....	39
4.4	Determinación del efecto dosis-tiempo sobre remoción de plomo.....	41
5.	CONCLUSIONES.....	43
6.	RECOMENDACIONES.....	44
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	45
8.	ANEXOS.....	50

INDICE DE CUADROS

Contenido	Página
Cuadro 1. Valores para sustancias químicas de tipo inorgánico de alto riesgo para la salud	3
Cuadro 2. Límites máximos permitidos para arsénico en agua potable.	5
Cuadro 3. Límites máximos permitidos para plomo en agua potable	7
Cuadro 4. Distribución de tratamientos y repeticiones	26
Cuadro 5. Distribución de los tratamientos (dosis – tiempo).....	28
Cuadro 6. Concentración inicial de As y Pb en agua pre-tratamiento.....	30
Cuadro 7. Pruebas de normalidad Shapiro-Wilks para As	31
Cuadro 8. Análisis de varianza paramétrico para As	31
Cuadro 9. Prueba de Duncan para comparación entre dosis de As	31
Cuadro 10. Prueba de Duncan para comparación entre tiempos para As.....	32
Cuadro 11. Comparación con prueba de Duncan para dosis-tiempo en la remoción de As.....	32
Cuadro 12. Comparación de resultados de arsénico con valores exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08.....	34
Cuadro 13. Pruebas de normalidad Shapiro-Wilks para Pb.....	36
Cuadro 14. Análisis de varianza no paramétrico para Pb	36
Cuadro 15. Prueba de comparación de a pares entre dosis de Pb.....	37
Cuadro 16. Prueba de comparación de a pares entre factores para Pb.....	37
Cuadro 17. Comparación de resultados de plomo con valores exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08.....	39

INDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1. Construcción del filtro casero.....	22
Figura 2. Remoción porcentual arsénico (%).....	33
Figura 3. Comparación de la remoción de arsénico según normativa para agua potable	34
Figura 4. Efecto dosis-tiempo en la remoción de arsénico.....	35
Figura 5. Remoción porcentual de plomo (%).....	38
Figura 6. Comparación de la remoción de plomo según normativa para agua potable	40
Figura 7. Efecto dosis-tiempo en la remoción de plomo.....	41

INDICE DE ANEXOS

Contenido	Página
Figura A- 1. Recolección de vainas de <i>Moringa oleífera</i> Lam.....	50
Figura A- 2. Construcción del filtro casero.....	51
Figura A- 3. Procesamiento de la semilla de <i>M. oleífera</i> Lam. como bioadsorbente.....	52
Figura A- 4. Preparación de solución de arsenito de sodio (NaAsO_2).....	53
Figura A- 5. Preparación de solución de nitrato de plomo (PbNO_3).....	54
A- 6. Determinación de arsénico.....	55
A- 7. Determinación de plomo.....	58
Figura A- 8. Preparación de los tratamientos	61
Figura A- 9. Digestión de las muestras.....	62
Figura A- 10. Análisis de laboratorio	63
A- 11. Cálculo de rendimiento de harina de la semilla de <i>Moringa oleífera</i> Lam.....	64
Cuadro A- 12. Datos obtenidos en los tratamientos (Variable Independiente)	64
Cuadro A- 13. Resumen de remoción porcentual en arsénico	65
Cuadro A- 14. Resumen de remoción porcentual en plomo	65
Cuadro A- 15. Resumen del promedio porcentual de remoción final de arsénico	66
Cuadro A- 16. Resumen del promedio porcentual de remoción final de plomo.....	66
Cuadro A- 17. Efecto Dosis-Tiempo en la remoción de arsénico	66
Cuadro A- 18. Análisis de varianza no paramétrica para dosis de Pb.....	67
Cuadro A- 19. Análisis de varianza no paramétrica para tiempo de Pb	67
Cuadro A- 20. Efecto dosis-tiempo en la remoción de Plomo.....	67

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el agua padece grandes contaminaciones que se originan de diversas fuentes, las más importantes son: el suelo contaminado, lodos residuales, industria, fertilizantes químicos y plaguicidas empleados en agricultura; aunado a esto la actividad volcánica alta en el país permite la presencia común de metales pesados en algunos mantos acuíferos y en ríos; la presencia de metales pesados en el agua puede causar un efecto tóxico a quien la consume (Carranza 2015).

Por otra parte, en el planeta Tierra gran cantidad de personas mueren al año por enfermedades relacionadas con el uso del agua contaminada; y El Salvador no es la excepción, hay estudios que revelan que la mayoría de las aguas de los ríos, principalmente aquellos que están ubicados en las cercanías de los asentamientos urbanos y zonas industriales, se encuentra con algún grado de contaminación, con la presencia de metales pesados como arsénico (As) y plomo (Pb) (Carranza 2015).

El agua es indispensable para la vida, porque ningún organismo sobrevive sin ella. Es necesario contar con dicho recurso natural, pues el agua y la salud son dos aspectos importantes para la población. Por ello, la disponibilidad de agua de calidad es una condición indispensable, ya que condiciona la calidad de vida.

Por lo anterior, se busca proporcionar una solución por medio del Teberinto (*Moringa oleifera* Lam.) que es una planta funcional y nutritiva que posee semillas con propiedades coagulantes, capaz de tratar el agua y reducir su turbidez y la contaminación bacterial; constituyendo una alternativa para reducir la concentración de metales pesados (arsénico y plomo) en aguas de consumo para personas y animales.

Actualmente, el principal tratamiento químico utilizado para el agua con alta turbiedad en El Salvador es el coagulante sintético de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) que representa altos costos para las plantas potabilizadoras urbanas y es inaccesible en sistemas rurales. El uso de sulfato de aluminio para el tratamiento del agua resulta en grandes cantidades de lodos producidos durante el tratamiento y un alto nivel de aluminio que permanece en el agua tratada. Esto puede presentar un problema de salud ya que se ha demostrado que la ingesta

de grandes cantidad de sales de aluminio está relacionada con la enfermedad de Alzheimer (SNET 2006).

En este documento se describe la efectividad de la semilla de Teberinto como método para la remoción de metales pesados, siendo la moringa una alternativa viable como coagulante para el tratamiento de agua potable en países en vías de desarrollo. Una de las ventajas de la *Moringa oleífera* Lam. es, que no se necesita controlar el pH a diferencia de otros tratamientos como el caso del sulfato de aluminio, además es de bajo costo y de fácil acceso para familias que viven en zonas rurales pobres.

La investigación tiene como finalidad evaluar la efectividad de las semillas de Teberinto como método para la remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano, brindando alternativas sencillas, económicas y fáciles para descontaminar el agua a la cual tienen acceso los habitantes del sector rural de los municipios, que casi siempre están expuestos a un sinnúmero de enfermedades producidas en su gran mayoría por el consumo directo de aguas sin ningún tratamiento previo.

La investigación fue desarrollada en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas en la Universidad de El Salvador, en el periodo de junio 2016 a abril 2017.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agua potable

Según la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua Potable NSO 13.07.01:08 publicada en 2009 y vigente hasta la fecha, será considerada como agua potable aquella apta para el consumo humano y que cumple con los parámetros físicos, químicos (Cuadro 1) y microbiológicos establecidos en dicha norma.

Cuadro 1. Valores para sustancias químicas de tipo inorgánico de alto riesgo para la salud

Parámetro	Límite Máximo Permissible (mg/l)
Arsénico	0.01
Bario	0.7
Boro	0.3
Cadmio	0.003
Cianuros	0.05
Cromo	0.05
Mercurio	0.001
Níquel	0.02
Nitrato	45
Nitrito (medido como nitrógeno)	1
Molibdeno	0.07
Plomo	0.01
Selenio	0.01

Fuente: CONACYT 2009.

2.2 Presencia de metales pesados en fuentes de agua

Los metales pesados constituyen un grupo cercano a los 40 elementos de la Tabla Periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm³. El rasgo distintivo de la fisiología de los metales pesados, es que aún cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento como el V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn y Mo, se ha reportado que también tienen efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas (Bayona *et al.* 2009).

Debido a su movilidad en los ecosistemas acuáticos naturales y a su toxicidad para las formas superiores de vida, los iones de metales pesados presentes en los abastecimientos de aguas superficiales y subterráneos, se les ha dado prioridad como los contaminantes inorgánicos más importantes en el ambiente. Aún cuando se encuentren presentes en cantidades bajas e indetectables (Cañizares 2000).

La contaminación de los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave, debido a que estos se usan como destino final de residuos domésticos e industriales, sobre todo en las áreas urbanas. Estas descargas son las principales responsables de la alteración de la calidad de las aguas naturales, que en algunos casos llegan a estar tan contaminadas que su potabilización resulta muy difícil y costosa (Vargas 2004, citado por Cuadra y Romero 2006).

Los vertidos residuales domésticos e industriales, así como la disposición inadecuada de desechos sólidos y la aplicación de agroquímicos, pesticidas y plaguicidas en la agricultura son fuentes permanentes de contaminación del agua (Cuéllar 2001).

La presencia de metales en el agua se debe a la capacidad que tiene ésta de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto. Entre los contaminantes se tiene el plomo, mercurio, cadmio, cromo y arsénico (OPS y CEPIS 2005).

La actividad industrial y minera arroja al ambiente metales tóxicos, muy dañinos para la salud humana y para la mayoría de formas de vida. La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química, ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años (Cuadra y Romero 2006).

2.2.1 Arsénico (As)

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico (OMS 2012).

La presencia natural de arsénico en aguas superficiales y subterráneas en América Latina se asocia con vulcanismo terciario y cuaternario, aguas termales y fenómenos geotérmicos vinculados con el vulcanismo circumpacífico del llamado “Círculo de fuego del Pacífico” (Montero *et al.* 2010).

La exposición a altos niveles de arsénico inorgánico puede deberse a diversas causas, como el consumo de agua contaminada o su uso para la preparación de comidas, para el riego de cultivos alimentarios y para procesos industriales, así como al consumo de tabaco y de alimentos contaminados (OMS 2012).

En el Cuadro 2, se presentan las concentraciones máximas permitidas según organizaciones internacionales y según la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua Potable:

Cuadro 2. Límites máximos permitidos para arsénico en agua potable.

Elemento	Concentración máxima permitida (mg/l)			
	Arsénico	Organización Mundial de la Salud (OMS)	Unión Europea (UE)	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)
	0.01	0.01	0.01	0.01

Fuente: Carranza 2015.

2.2.1.1 Situación de la contaminación por arsénico en el agua en El Salvador

Según un estudio realizado por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) en 2006, cuyo objetivo era realizar un diagnóstico nacional de la calidad sanitaria de las aguas superficiales del país, a través de la investigación de los niveles de metales pesados y la aplicación del Índice de Calidad Sanitaria de las Aguas Superficiales (ICAS), se muestrearon la mayoría de los principales ríos de las regiones hidrográficas del país, se tomaron muestras de agua y de sedimento en un total de 114 sitios. Los resultados de dicha investigación fueron:

- El contaminante arsénico se reporta en 62 sitios de muestreo equivalente al 55% de las muestras recolectadas de agua. El valor más alto fue de 0.1230 mg/l (río Jiboa).
- El 90% de las muestras de sedimentos presentan arsénico. La concentración mayor encontrada es 0.49 mg/l (río Sucio).

2.2.1.2 Enfermedades causadas por arsénico

De acuerdo con estudios, los niños son más afectados que los adultos ante la misma ingesta de arsénico, siendo las principales rutas de exposición la ingesta e inhalación, principalmente mediante el agua de bebida, lo que provoca el hidroarsenicismo (Montero *et al.* 2010).

El hidroarsenicismo es un síndrome tóxico, crónico y adquirido, que se caracteriza por lesiones cutáneas benignas que aparecen de 1 a 15 años después de la ingesta de aguas contaminadas con arsénico (As), o sus sales inorgánicas (Palacios *et al.* 2012).

Según Montero *et al.* (2010), el desarrollo del hidroarsenicismo de acuerdo con el tiempo de ingesta, es el siguiente:

- Estado preclínico: el paciente no muestra síntomas, pero el arsénico puede ser detectado en muestras de tejido y orina.
- Clínico: se observa oscurecimiento de la piel (melanosis), comúnmente en la palma de la mano, manchas oscuras en el pecho, espalda, miembros y encías. Un síntoma más serio es la queratosis o endurecimiento de la piel en forma de nódulos en las plantas de los pies y manos.
- Complicaciones: síntomas clínicos más pronunciados, afectación de órganos internos; se ha reportado inflamación de hígado, riñones y bazo; también se le vincula en esta etapa con conjuntivitis, bronquitis y diabetes.
- Malignidad: desarrollo de tumores, en pulmón o vejiga, hígado y riñones.

Los efectos más característicos debido a la exposición prolongada al arsénico son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel. También se ha asociado a problemas de desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes (OMS 2012).

La ingestión de agua con arsénico puede llevar a un incremento de abortos espontáneos y de recién nacidos muertos. Una exposición prolongada a concentraciones de arsénico inorgánico dentro del valor sugerido por la OMS (0.01 mg/l), en el agua de bebida puede causar efectos cardiovasculares, incluyendo arritmias, hipertensión, isquemia cardíaca y cerebral, diabetes mellitus y alteraciones arteriales periféricas como la enfermedad del “pie negro” que resulta en gangrena. Los estudios sobre el potencial neurotóxico y desarrollo de efectos reproductivos adversos asociados con la ingestión de arsénico en el agua de bebida son inconclusivos (Carabantes y Fernicola 2003).

2.2.2 Plomo (Pb)

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública (OMS 2015).

Entre las fuentes de plomo en el agua de superficie o en sedimentos están la deposición de polvo que contiene plomo desde la atmósfera, el agua residual de industrias que manejan plomo (principalmente las industrias de hierro y acero y las que manufacturan plomo), agua de escorrentía en centros urbanos y apilamientos de minerales (Cuadra y Romero 2006).

Entre las principales fuentes de contaminación ambiental destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje y, en algunos países, el uso persistente de pinturas y gasolineras con plomo. También puede contener plomo el agua potable canalizada a través de tuberías de plomo o con soldadura a base de este metal (OMS 2015).

En el Cuadro 3, se presentan las concentraciones máximas permitidas según organizaciones internacionales y según la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua Potable:

Cuadro 3. Límites máximos permitidos para plomo en agua potable

Elemento	Concentración máxima permitida (mg/l)			
Plomo	Organización Mundial de la Salud (OMS)	Unión Europea (UE)	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)	CONACYT El Salvador (NSO 13.07.01:08)
	0.01	0.05	0.015	0.01

Fuente: Carranza 2015.

2.2.2.1 Situación de la contaminación por plomo en el agua en El Salvador

Según un estudio realizado por el SNET en 2006, se tomaron muestras de agua y de sedimento en un total de 114 sitios de muestreo. Los resultados de dicha investigación fueron:

- El contaminante plomo se reporta en 44 sitios de muestreo equivalente al 28.3% de las muestras recolectadas de agua. El valor más alto fue de 0.667 mg/l (río Acahuapa).
- El 100% de las muestras de sedimentos presentan plomo, la concentración mayor encontrada es 103.04 mg/l (río Acelhuate).

2.2.2.2 Enfermedades causadas por plomo

El plomo es una sustancia tóxica que se va acumulando en el cuerpo afectando a diversos sistemas del organismo, con efectos especialmente dañinos en los niños de corta edad (OMS 2015).

El plomo se distribuye por el organismo hasta alcanzar el cerebro, hígado, riñones y se deposita en dientes y huesos, donde se va acumulando con el paso del tiempo. Para evaluar el grado de exposición humana, se suele medir la concentración de plomo en sangre. No existe un nivel de exposición al plomo que pueda considerarse seguro, la intoxicación por plomo es totalmente prevenible (Pérez 2013).

Los niños de corta edad pueden tener consecuencias graves y permanentes en su salud, afectando en particular al desarrollo del cerebro y del sistema nervioso. El plomo también causa daños duraderos en los adultos, por ejemplo aumentando el riesgo de hipertensión arterial y de lesiones renales. En las embarazadas, la exposición a concentraciones elevadas de plomo puede ser causa de aborto natural, muerte fetal, parto prematuro y bajo peso al nacer, y provocar malformaciones leves en el feto (OMS 2015).

2.3 Métodos para la remoción de metales pesados en medios acuosos

En la actualidad, existe una gran preocupación a nivel mundial, debido al considerable incremento en los índices de contaminación de efluentes industriales por parte de metales pesados tales como el cromo, níquel, cadmio, plomo y mercurio (Cartaya *et al.* 2008).

El tratamiento de metales pesados en medios acuosos se traduce generalmente en la suma de diferentes procesos electroquímicos, ósmosis y resinas de intercambio de iones. Las tecnologías que avanzan actualmente son los procesos de ósmosis (con un alto costo de instalación y mantenimiento) y las resinas quelantes. Éstas últimas son interesantes en estadios finales de depuración, ya que permiten un tratamiento adaptable en función de las características de carga del medio acuoso a tratar; el fácil desprendimiento de los metales pesados permite también, en este caso, una recuperación de casi el 100% de los metales pesados, los cuales pueden ser revendidos en el mercado si la cotización mundial lo permite (Rivière 2002).

2.3.1 Técnicas convencionales de remoción de metales pesados

Se han clasificado como convencionales a las técnicas que habitualmente se emplean para la remoción de estos contaminantes. Estos procesos resultan costosos e ineficientes, especialmente cuando la concentración de los metales es muy baja (Caviedes *et al.* 2015). A continuación se mencionan algunos ejemplos:

2.3.1.1 Filtración por membrana

Esta tecnología presenta altas eficiencias, requiere poco espacio, no es selectiva y es de fácil operación, pero genera una gran cantidad de lodos que contienen metales. Se emplea en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y en menor medida aguas residuales domésticas. Las membranas pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características como su peso molecular de corte, material de la membrana

(sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie (Wan y Chen 2009).

La separación por membrana se emplea comúnmente para tratar y recuperar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, en la producción alimentos y bebidas y en la explotación y producción de hidrocarburos (Caviedes *et al.* 2015).

2.3.1.2 Intercambio iónico

Es el proceso a través del cual los iones en solución se transfieren a una matriz sólida que, a su vez liberan iones de un tipo diferente, pero de la misma carga. El intercambio iónico es un proceso de separación física en la que los iones intercambiados no se modifican químicamente. Las principales ventajas de intercambio iónico son la recuperación del valor del metal, la selectividad, menos volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas (Caviedes *et al.* 2015).

2.3.1.3 Adsorción (convencional)

La técnica presenta remoción de una amplia variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo del adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo. Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos lignocelulósicos son algunos de los adsorbentes, generalmente con procesos variados de modificación química, comúnmente empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias (Caviedes *et al.* 2015).

2.3.1.4 Precipitación química

Es la técnica más utilizada en los procesos industriales ya que es relativamente sencilla de operar, económica y selectiva, aunque su mantenimiento sí es costoso debido a la alta generación de lodos. Igualmente se emplea la precipitación por sulfuros aunque con solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, por lo que puede lograr altos rendimientos; también se han empleado sustancias quelantes aunque presentan desventajas considerables

como la carencia de uniones necesarias y demasiados riesgos ambientales (Wan y Chen 2009).

2.3.1.5 Coagulación-Floculación

Es el método mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y aglomerar posteriormente. En la primera etapa la coagulación elimina la doble capa eléctrica que caracteriza a los coloides y con la floculación se aglomeran los coloides mediante la atracción de partículas con el aglutinamiento de los floculantes. Los factores más importantes que se deben tener en cuenta para esta técnica son la dosis química apropiada, el efecto energético de la mezcla y el tiempo de la mezcla; los coagulantes químicos que se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas residuales incluyen alumbre ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$), cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) y cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Caviedes *et al.* 2015).

2.3.2 Técnicas no convencionales de remoción de metales pesados

Las técnicas no convencionales, son aquellas que corresponden a procesos innovadores para la eliminación de metales en aguas residuales generalmente de origen industrial (Caviedes *et al.* 2015). Entre las cuales tenemos:

2.3.2.1 Bioadsorción

La bioadsorción es un proceso que permite la captación activa o pasiva de iones metálicos, debido a la propiedad que diversas biomasas vivas o muertas poseen para enlazar y acumular este tipo de contaminantes por diferentes mecanismos. Este método poco convencional busca principalmente la remoción de metales pesados usando como adsorbente diferentes materiales de origen biológico (vivo o muerto), tales como: algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y algunos tipos de biopolímeros. Estos materiales se encuentran en gran abundancia en la naturaleza, además, su transformación a biosorbente no es un proceso costoso (Tejada *et al.* 2014).

Por lo tanto, existe una urgente necesidad de que todas las fuentes posibles de los adsorbentes de bajo costo basados en la agroindustria deben explorarse y su viabilidad para la eliminación de metales pesados debe ser estudiada en detalle (Caviedes *et al.* 2015).

Entre las ventajas que presenta la bioadsorción, en comparación con las técnicas convencionales se tiene bajo costo, alta eficiencia, minimización de productos químicos y lodos

biológicos, no se requieren nutrientes adicionales, regeneración de los biosorbentes y posibilidad de recuperación de metales (Das 2010, citado por Tejada *et al.* 2014).

2.3.2.2 Materiales bioadsorbentes

Los bioadsorbentes son materiales provenientes de la flora microbiana, algas, plantas, biomasa, productos agroindustriales o algunos biopolímeros, estos deben ser capaces de adsorber directamente el metal de forma iónica de la solución. Los biomateriales son sometidos a tratamientos fisicoquímicos sencillos; con el fin de mejorar su capacidad de adsorción en los procesos de aplicación como remoción de metales pesados o recuperación de especies metálicas en solución (Tejada *et al.* 2014).

La calidad del bioadsorbente está ligada a la cantidad de sorbato que pueda atraer y retener; en este sentido, la búsqueda de nuevos materiales biosorbentes de bajo costo y con gran potencial de adsorción de iones metálicos presentes en aguas residuales, se ha convertido en el objetivo principal de la ciencia (Cuizano *et al.* 2009).

Según Caviedes *et al.* (2015), Tejada *et al.* (2014), Quiñones *et al.* (2013) entre los materiales bioadsorbentes usados para la adsorción de metales pesados se presentan algunos ejemplos:

- Organismos Vivos: *Penicillium* y *Aspergillus rizopus*
- Biomazas: bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*); tallos de maíz (*Zea mays*); cáscara de maní (*Arachis hypogaea*); hojas y semillas de Teberinto (*Moringa oleífera* Lam.)
- Biopolímeros: Bentonita – Quitosano; Quitosano Epiclorhidrinatrifosfato
- Carbón Activado: carbón activado a partir de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*); carbón activado a partir de cáscara de coco (*Cocos nucifera*); carbón activado obtenido a partir de vainas y cascarillas de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera* Lam.)
- Otros materiales: arena; cenizas volantes.

En general, la extracción de metales mediante biomazas se atribuye a sus proteínas, carbohidratos y componentes fenólicos que contienen grupos carboxilo, hidroxilo, sulfatos, fosfatos y amino, los cuales presentan gran afinidad por los iones metálicos, facilitando su captación (Tejada *et al.* 2014).

Por otra parte, los residuos agroindustriales son un gran problema ambiental, ya que representan un importante desecho de una gran variedad de industrias, principalmente las del sector alimenticio. En este sentido, la valorización de los residuos agroindustriales como materia prima en la producción de nuevos materiales, es de gran interés (Aceves y Castañeda 2012).

Recientemente, la bioadsorción ha sido propuesta como un procedimiento de tratamiento alternativo en la remoción de metales pesados en sistemas acuosos. En este sentido, los estudios de investigación en torno a la *Moringa oleífera* Lam. se han centrado en estudiar su potencial para resolver esta problemática medioambiental (Rodríguez *et al.* 2015).

2.4 Generalidades de la *Moringa oleífera* Lam.

2.4.1 Origen de la *Moringa oleífera* Lam.

La *Moringa oleífera* Lam., conocido comúnmente como Moringa o Teberinto, es un árbol nativo del norte de la India pero actualmente crece muy bien en los trópicos. En África la introducción data desde hace más de 1,000 años y se encuentra ampliamente distribuida en los países de la costa de África, en Australia, en Arabia y en el Caribe; también ha sido introducida en general en América Latina y Centroamérica donde se conoce con distintos nombres y naturalizada en los años 20 del siglo XX como árbol ornamental, cerca viva y cortina rompevientos (Núñez 2007).

La *Moringa oleífera* Lam. puede crecer en colinas o laderas, aunque lo más normal es encontrarla en praderas y orillas de río (Hernández 1997, citado por García *et al.* 2013).

2.4.2 Descripción botánica de la especie

La *Moringa oleífera* Lam. es un árbol siempre verde de tamaño pequeño y crecimiento acelerado que usualmente alcanza de 10 a 12 m de alto. Tiene una copa abierta y esparcida de ramas inclinadas y frágiles, un follaje plumoso de hojas pinadas en tres, y una corteza gruesa, blanquecina y de aspecto corchoso. Se valora principalmente por sus frutas, hojas, flores, raíces, todas comestibles, y por el aceite (también comestible) obtenido de las semillas. Este cultivo puede ser propagado por medio de semillas o por reproducción asexual (estacas) (Cáceres y Díaz 2005).

Una característica muy importante de la *Moringa oleífera* Lam. es su capacidad de resistencia a la sequía y el potencial agronómico siendo un árbol cultivable en regiones áridas y semiáridas. Esto es de particular importancia debido a que hoy en día se sabe que las condiciones climáticas ya no se rigen por las temporadas, esto debido a que con el paso del tiempo las estaciones del año han cambiado radicalmente de un clima caluroso en invierno hasta una sequía en verano (Sánchez *et al.* 2013).

Cáceres y Díaz en el 2005 hicieron una clasificación taxonómica de la *Moringa oleífera* Lam.:

Familia: Moringáceas

Origen: Capparidales

Clase: Magnoleopsida

Género: *Moringa*

Especie: *Moringa oleífera*

El árbol de *Moringa oleífera* Lam. posee una raíz pivotante tuberosa, blanca y de aspecto hinchado, con un olor picante característico, y escasas raíces laterales. Los árboles obtenidos de semillas desarrollan una raíz pivotante gruesa y profunda, con un sistema extenso de raíces laterales tuberosas y gruesas. Los árboles obtenidos de estacas no desarrollan raíces pivotantes (Parrotta 1993).

La corteza es blanquecina, el tronco generalmente espeso e irregular en tamaño y forma y la corona pequeña y densa; rara vez sobrepasa los 10 metros de altura (García *et al.* 2013).

Las hojas son compuestas, de unos 20 cm de largo, de color verde claro; tienen cualidades nutritivas sobresalientes, que están entre las mejores de todos los vegetales perennes. El contenido de proteína es del 27%; además tienen cantidades significativas de calcio, hierro y fósforo, así como vitamina A y C (García *et al.* 2013).

Las flores blanco-amarillentas, fragantes y bisexuales aparecen en grupos de flores laterales esparcidos o pendientes de 10 a 25 cm de largo. Las flores individuales son de aproximadamente 0.7 a 1 cm de largo y 2 cm de ancho con cinco pétalos blanco-amarillentos de tamaño desigual y con venas delgadas. Los polinizadores principales son las abejas, otros insectos y varias aves (Parrotta 1993).

El fruto está formado por tres lígulas en forma triangular y lineal que dan la apariencia de vaina usualmente miden de 20 a 45 cm de largo. Si se corta transversalmente se observa una sección triangular con varias semillas dispuestas a lo largo (Alfaro y Martínez 2008).

Las semillas son carnosas, cubiertas por una cáscara fina de color café. Poseen tres alas, o semillas aladas de 2.5 a 3 mm de largo. Al quitar la cáscara se obtiene el endospermo que es blanquecino y muy oleaginoso (Alfaro y Martínez 2008).

Cuando la semilla se produce con fines reproductivos, las vainas deben dejarse secar en el árbol de Teberinto hasta que se pongan café, la cosecha debe hacerse antes de que las vainas se abran y caigan las semillas, el período de cosecha de *Moringa oleífera* Lam. en El Salvador es de febrero a abril, siendo mayor esta cosecha en marzo (García *et al.* 2013).

2.4.3 Usos de la *Moringa oleífera* Lam.

La *Moringa oleífera* Lam. puede ser utilizada como materia prima en diversas industrias tanto cosméticas, farmacológicas, sanitarias, agronómicas, alimenticias, entre otras (García *et al.* 2013).

Las vainas verdes, las hojas, las flores y las semillas tostadas son muy nutritivas y se consumen en muchas partes del mundo. El árbol de Teberinto puede crecer como cercas vivas o cortinas rompevientos y es adecuado para áreas donde la combinación de fuertes vientos y largos períodos de sequía causan seria erosión al suelo. Se adapta bien y es una buena fuente de leña (Folkard y Sutherland 1996).

Con las hojas de la *Moringa oleífera* Lam. se pueden realizar infusiones para combatir problemas digestivos y diarreas, así como úlceras estomacales. Las flores se emplean para tratar problemas respiratorios, también tienen propiedades fungicidas y bactericidas (García 2003).

Las características nutricionales de la *Moringa oleífera* Lam. son excelentes, por lo que es usada como forraje a gran escala en varios países. Sus hojas y la torta de prensado de sus semillas pueden ser utilizadas en la formulación de raciones para la alimentación animal (Martín *et al.* 2013).

El aceite de la semilla de *Moringa oleífera* Lam. puede utilizarse en la cocina, para producir jabones, cosméticos y combustible para lámparas (García *et al.* 2013).

Los residuos de la extracción del aceite de las semillas pueden utilizarse como acondicionador del suelo o como fertilizante y tienen potencial para ser utilizados como suplemento alimenticio avícola y ganadero (Folkard y Sutherland 1996).

La *Moringa oleífera* Lam. puede ser usada, entre otras cosas, como proveedor de biogás, como agente doméstico de limpieza, como tinte, productor de goma natural, clarificador y productor de miel. También tiene usos ornamentales y funciona como coagulante natural para clarificación de agua, entre otros (Alfaro 2008).

2.4.4 Antecedentes

Los nombres comunes que recibe la *Moringa oleífera* Lam. hacen mención específica a la capacidad de la planta para purificar agua, por ejemplo en el valle del río Nilo, la *Moringa oleífera* Lam. es conocida como "Shagara al Rauwaq" que textualmente significa "árbol que purifica" (Molano 2011).

A la planta de *Moringa oleífera* Lam. se le atribuyen características medicinales, alimenticias, comerciales y la propiedad de ser un coagulante natural, ya que de las semillas se extrae un floculante tipo polielectrolito con función aniónica y catiónica, el cual sirve perfectamente en la purificación de agua potable y para la sedimentación de partículas minerales orgánicas en aguas residuales (Melo y Turriago 2012).

Según García *et al.* (2013), el estado actual del cultivo en El Salvador demuestra que el árbol *Moringa oleífera* Lam. no ha sido un recurso explotado en la agricultura salvadoreña, siendo una especie con claro valor potencial a futuro que necesita de su estudio e investigación y que se encuentra en transición.

Existen algunas organizaciones no gubernamentales en El Salvador, como Visión Mundial, dedicadas a promover el cultivo del Teberinto con fines nutricionales para que las hojas producidas por el árbol sean incluidas en la dieta alimenticia como fuente de proteínas. Promoviendo así campañas a nivel nacional con énfasis en la zona oriental del país en los departamentos de Usulután, San Miguel y Morazán, y en las zonas costeras de Ahuachapán

y Sonsonate con más de 30,000 árboles sembrados en dicho proyecto. En dicha investigación también se conoció la existencia de algunos productores locales que cultivan la *Moringa oleífera* Lam. con fines de comercialización y el resto de árboles sembrados en el país se utilizan únicamente como cortinas rompevientos, cercos vivos, árboles forrajeros o plantas ornamentales (García *et al.* 2013).

Existen experiencias a nivel internacional que ilustran el uso de *Moringa oleífera* Lam. en el proceso de potabilización de aguas. En Honduras se realizó un estudio sobre la validación de la efectividad de la semilla de *Moringa oleífera* Lam. como coagulante natural del agua destinada al consumo humano en la región del Yeguaré. En el que se obtuvo una eficiencia de un 98% en semillas con testa y un 93% sin testa. Estos rendimientos obtenidos están en un ámbito de turbidez de 150 a 500 UNT y se observó mayor eficiencia del coagulante de las semillas del teberinto en turbidez alta (Núñez 2007).

Por otra parte, los estudios comparativos de la *Moringa oleífera* Lam. y el sulfato de aluminio para la remoción de metales en agua demuestran que es una alternativa viable como coagulante para el tratamiento de agua potable en países en vías de desarrollo. Una de las ventajas de la *Moringa oleífera* Lam. es, que no se necesita controlar el pH a diferencia de los tratamientos con sulfato de aluminio, además es de bajo costo y de fácil acceso para familias que viven en zonas rurales pobres (Gómez 2010).

Recientemente se descubrió que tanto las semillas como la corteza de *Moringa oleífera* Lam. pueden ser utilizadas para la adsorción de metales pesados como el cadmio, el plomo y el níquel (Reddy *et al.* 2011, citado por Martín *et al.* 2013).

Existen trabajos previos que estudian el potencial de la *Moringa oleífera* Lam. en la eliminación de metales pesados tales como cromo, zinc, níquel, mercurio y plomo utilizando distintos sustratos obtenidos a partir de *Moringa oleífera* Lam como adsorbente. Entre los más utilizados se encuentran las semillas crudas trituradas, el carbón activo a partir de madera, extractos de semillas o la cáscara de la misma con resultados variables (García *et al.* 2012).

Un estudio realizado en Brasil en el 2013, investigaron las semillas de *Moringa oleífera* Lam. para la eliminación de iones de manganeso a partir de soluciones acuosas. Basándose en los resultados obtenidos, se determinó que las semillas de *M. oleífera* Lam. son muy eficientes en

la eliminación de iones de manganeso a partir de suministros de agua potable que tienen niveles de este metal por encima de los límites legales. Las eficiencias de extracción del metal fueron mayores que 95% a partir de muestras de agua (Marqués *et al.* 2013).

2.4.5 Utilización de la semilla de *Moringa oleífera* Lam. en tratamientos de agua

Uno de los coagulantes ampliamente utilizado con éxito en el tratamiento de aguas para consumo humano y de aguas residuales son las semillas de *Moringa oleífera* Lam., debido a la presencia de proteínas catiónicas solubles en la semilla. Una fracción del contenido proteico de las semillas, cercana al 1%, está constituida por proteínas activas que neutralizan y precipitan los coloides del agua, igual que como lo hacen los coagulantes industriales sólo que a menor costo (Más y Rubí *et al.* 2013).

En El Salvador se han realizado investigaciones evaluando las propiedades coagulantes y floculantes de las semillas de *Moringa oleífera* Lam. para el tratamiento de aguas, además se ha estudiado la factibilidad de usar ésta semilla para tratar aguas de desecho de una industria química de adhesivos ubicada en el área metropolitana de San Salvador (Cáceres y Díaz 2005).

Otras investigaciones han demostrado que las semillas de *Moringa oleífera* Lam. remueven metales pesados por el proceso de adsorción, el mecanismo que provoca la adsorción de metales pesados es a través del ion metálico positivo que forma un puente entre el polielectrolito aniónico y cargados negativamente de los grupos funcionales de las proteínas que están presentes en la semillas (Más y Rubí *et al.* 2013).

La utilización de las semillas de *Moringa oleífera* Lam. molidas ha dado muy buenos resultados en países asiáticos y africanos para la clarificación de aguas. Las semillas de Teberinto podrían llegar a ser una alternativa para evitar muchas de las muertes que ocasiona anualmente el agua contaminada. Las semillas poseen una sustancia coagulante y floculante que captura las partículas en suspensión en el agua y provocan que se precipiten. Las semillas pueden emplearse artesanalmente moliéndolas y en gran escala para purificar el agua (Melo y Turriago 2012).

El principal inconveniente que presenta la *Moringa oleífera* Lam. y el resto de bioadsorbentes naturales, es que cuando se adicionan al agua en forma de semillas pulverizadas, incrementan

la carga orgánica de ésta de manera significativa añadiendo hasta un 90% de sustancias orgánicas que no actúan como agentes floculantes. Este hecho, impide almacenar el agua tratada por un tiempo superior a 24 horas (Jahn 1988, citado por García 2007).

La *Moringa oleífera* Lam. aumenta la turbidez del agua cuando se agrega más de lo indicado y en concentraciones de aguas con bajos niveles de turbidez. Esto se explica porque al entrar en contacto los coagulantes de la *Moringa oleífera* Lam. con las partículas coloides (menores en niveles bajos de turbidez) no encuentran la suficiente materia para adherirse y sedimentarse, lo que hace que quede suelto y se convierta en aporte orgánico y material en suspensión en el agua tratada (Nuñez 2007).

Se hace necesario notar que este método de clarificación del agua destinada a consumo humano constituye únicamente un proceso de pre-tratamiento del agua, por lo que es indispensable aplicar algún método de desinfección posterior (ebullición, desinfección solar, entre otras) para garantizar la eliminación de organismos patógenos (Nuñez 2007).

Según los estudios realizados por Melo y Turriago (2012), a su vez la semilla de *Moringa oleífera* Lam. presenta una alta actividad bactericida y, se logra remover entre el 90–99.9% de bacterias que están adheridas a las partículas sólidas. Sin embargo, algunos microorganismos nocivos para la salud no son removidos en el proceso, todo depende del grado de contaminación que presente el agua. Por lo tanto para lograr obtener agua totalmente potable, se recomienda usar algún tipo de purificación complementario puede ser hirviendo el agua tratada o usando un filtro sencillo de arena.

El árbol de *Moringa oleífera* Lam. produce semillas con contenidos elevados de proteínas de bajo peso y carga positiva que actúan como los polímeros sintéticos utilizados industrialmente para el tratamiento de aguas. Al ser agregadas a aguas no tratadas, estas proteínas se adhieren a las partículas coloidales con cargas negativas en suspensión, las neutralizan y las aglutinan, favoreciendo su posterior remoción mediante sedimentación o filtración (Nuñez 2007).

Según Nuñez (2007), el uso de semilla de *Moringa oleífera* Lam. ofrecen excelentes ventajas en comparación con los coagulantes convencionales tales como sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$); dichas ventajas son:

- La acción de bioadsorbente de la semilla no tiene ninguna influencia en los niveles de pH del agua a purificar.
- La producción del lodo se reduce y se puede convertir en un abono en los suelos al carecer de residuos de metales.

2.4.6 Toxicidad y contenido químico de la *Moringa oleífera* Lam.

Los compuestos de la *Moringa oleífera* Lam. tienen una toxicidad muy baja. En la prueba de toxicidad aguda en ratones, la planta mostró un amplio margen de seguridad. Estudios sobre toxicidad aguda de la infusión de hojas y semilla no presentó toxicidad aparente en ratones a una dosis de 5 g/kg de peso (Cáceres 1992, citado por Alfaro 2008).

Los cotiledones de las semillas presentan efectos tóxicos por inhibición de la enzima acetilcolinesterasa; el efecto tóxico se cree que es debido a los constituyentes antimicrobianos; sin embargo, se considera que no constituye un riesgo para la salud humana a las concentraciones utilizadas con propósitos nutricionales, medicinales o de purificación de agua. Estudios de toxicidad crónica demuestran que las semillas molidas administradas por vía oral a ratas durante 6 semanas no producen alteraciones histológicas en 28 órganos examinados de los animales (Alfaro 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del estudio

La “Evaluación de la efectividad de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera* Lam.) como método de remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano,” se desarrolló en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, en el periodo comprendido de junio 2016 a abril 2017.

En el estudio las unidades experimentales fueron las muestras de agua de un litro que contenían 1.0 mg/l de arsénico (3 repeticiones por tratamiento) y 1.00 mg/l de plomo (3 repeticiones por tratamiento), bajo dos factores de estudio, siendo el factor “a” las dosis de harina de semillas de *Moringa oleífera* Lam. (0.25, 0.50 y 1.00 g/l de agua) y el factor “b” los tiempos de remoción de dichos metales (1, 2 y 3 horas), y la interacción entre ellos (dosis – tiempo).

3.2 Metodología de campo

3.2.1 Recolección de vainas de *Moringa oleífera* Lam.

Se recolectó la cantidad de vainas (con madurez fisiológica) necesarias para completar aproximadamente 1000 g de semillas del árbol de *Moringa oleífera* Lam. La recolección tuvo lugar en el Municipio de Aguilares del departamento de San Salvador con georreferencia de: 13°56'32.1"N y 89°11'30.9"O, a una altura aproximada de 299 msnm.

Las vainas se dejaron secar en el árbol de *Moringa oleífera* Lam. hasta obtener un color café, la cosecha se hizo antes de que las vainas se abrieran y cayeran al suelo las semillas. Durante la recolección se evitó subirse al árbol y el jaloneo de vainas (Figura A- 1). Recolectándose suficiente material vegetal para la investigación (2000 g aproximados de vainas).

3.2.2 Construcción del filtro casero

Los materiales utilizados para la elaboración del filtro casero fueron los siguientes:

- Frascos plásticos de bebidas carbonatadas transparentes, cuyo material de fabricación sea a partir de PET (Tereftalato de polietileno) de 2.5 litros de capacidad.
- Algodón natural
- Grava de río

El procedimiento para la construcción del filtro se realizó de la siguiente manera (Figura A- 2):

- Se perforaron seis agujeros al tapón del recipiente plástico con una varilla metálica (acero inoxidable) fina y puntiaguda previamente calentada. Se utiliza acero inoxidable para no transferir metal al material.

- Se enroscó el tapón y se tomó el recipiente de plástico transparente previamente lavado con agua del grifo y enjuagado con agua destilada y bidestilada. Luego se cortó por la parte superior a una altura de 25.0 cm de la boca a la base, creando una especie de embudo, colocando la boca del recipiente plástico con su tapón hacia abajo.

- Se rellenó el interior del recipiente plástico con una capa de algodón de 6.0 cm, a esta capa se le adicionaron pequeñas cantidades de agua destilada, aplicándole un poco de presión al algodón para garantizar que quedara bien comprimido.

- Después se colocó en la parte superior una capa de 6.0 cm de grava lavada, con la intención de proveer soporte al algodón y garantizar que este no se moviera al momento de filtrar. Además de retener los sólidos suspendidos en esta zona.

- Como soporte para el filtro y para la recolección de la muestra filtrada, se utilizó otro recipiente plástico y se cortó hasta el hombro del mismo aproximadamente 15.0 cm de altura.

- Finalmente se colocó el filtro encima del recipiente contenedor. Al recipiente contenedor se le perforó un agujero con la ayuda de una varilla metálica (acero inoxidable) caliente, aproximadamente 3.0 cm por debajo del corte realizado, para evitar que se generará vacío al momento de filtrar (Figura 1).



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Construcción del filtro casero

3.3 Metodología de laboratorio

3.3.1 Procesamiento de la semilla de *Moringa oleífera* Lam. como bioadsorbente

Para llevar a cabo la investigación se recolectaron 2000 g aproximados de vainas, de las cuales se obtuvieron 812.38 g de semillas con testa de *Moringa oleífera* Lam., con un rendimiento de 627.37 g de harina.

La preparación de los 627.37 g de harina se realizó en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

A continuación se describe el modo de preparación de la harina de *Moringa oleífera* Lam. como bioadsorbente (Figura A- 3):

- Se extrajeron las semillas contenidas en las vainas secas de *Moringa oleífera* Lam. Las semillas utilizadas debieron cumplir con ciertos requerimientos físicos: semilla sin

daños mecánicos o por insectos, libre de hongos y con una madurez óptima (testa de color café oscuro).

- Las semillas con testa fueron puestas en una bandeja para secarlas en una estufa de aire circulante, de acero inoxidable marca Memmert, a una temperatura de 60°C por 24 horas y de esta manera se extrajo la humedad de las semillas, y evitar la desnaturalización de la materia prima.
- Teniendo las semillas secas se procedió a triturarlas con un mortero para facilitar el proceso del pulverizado.
- Posteriormente en una licuadora industrial de la marca Waring, de acero inoxidable se pulverizaron las semillas secas de *Moringa oleífera* Lam., para obtener una muestra homogénea, se pasó por un tamiz de 0.5 mm y de esta manera resultó un polvo fino, similar al de una harina.
- La harina se almacenó en bolsas de sello hermético (ziploc) y posterior se guardó en un desecador para su conservación y evitar así que fuera contaminada o adquiriera humedad nuevamente.

Además se calculó el rendimiento, expresado como la cantidad de harina obtenida en función de la cantidad de semillas con testa utilizadas, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento de harina (\%)} = \frac{\text{Peso de harina (g)}}{\text{Peso de semillas secas (g)}} \times 100$$

3.3.2 Preparación de las muestras de agua

Las muestras de agua enriquecidas con metales para cada tratamiento, se prepararon en el laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas, se empezó con la preparación de dos muestras con 40.0 litros de agua cada una, la primera con una concentración aproximada de 1.0 mg/l de arsénico utilizando como fuente de arsénico el arsenito de sodio (NaAsO₂). La segunda muestra con una concentración aproximada de 1.0 mg/l de plomo utilizando como fuente de plomo el nitrato de plomo (Pb(NO₃)₂) (Figura A- 4 y Figura A- 5).

Las muestras de agua enriquecidas con los metales As y Pb, se dosificaron a frascos plásticos limpios y secos de 1.0 litro, que fueron las muestras utilizadas para evaluar cada uno de los tratamientos en estudio (Figura A- 4 e y Figura A- 5 e).

a) Preparación de la fuente de arsénico y plomo

- Se colocó el nitrato de plomo y el arsenito de sodio en vidrio de reloj cada uno y se colocaron en una estufa a una temperatura de 105 °C, durante dos horas para eliminar la humedad que contienen dichos reactivos.
- Posteriormente se dejó enfriar y se pesó la cantidad necesaria según el siguiente cálculo:

b) Preparación de la solución de arsénico 1.0 mg/l

$$\text{ppm} = \frac{\text{mg de arsénico}}{\text{litros de solución}} \quad \text{mg de arsénico} = \text{ppm} \times \text{litros de solución}$$

$$\text{mg de arsénico} = 1.0 \text{ mg/l} \times 1.0 \text{ l} = 1.0 \text{ mg} = 0.001 \text{ g/l}$$

Como la fuente de arsénico es el Arsenito de Sodio (NaAsO_2):

Peso molecular del (NaAsO_2) = 129.92 g/mol

Peso molecular del As = 74.92 g/mol

Entonces:

129.92 g de NaAsO_2 ----- 74.92 g de As

X ----- 0.001g de As

X = 0.0017 g de arsenito de sodio

Para facilitar el trabajo se preparó una solución madre de 1,000 mg/l de la siguiente manera: Con una balanza analítica marca Shimadzu, se pesó 1.7 g de arsenito de sodio, se disolvió en agua destilada y luego se llevó a un volumen de un litro para tener una concentración aproximada de 1,000 mg/l de arsénico en la solución madre (Figura A- 4).

Preparada la solución madre de una concentración aproximada de 1,000 mg/l de arsénico se procedió a preparar la solución estándar de trabajo (concentración aproximada de 1.0 mg/l). Para ello fue necesario tomar alícuotas de un mililitro de la solución madre (1,000 mg/l),

agregar agua destilada y llevar a un volumen de un litro. El procedimiento anterior se realizó para preparar 40.0 litros de la solución estándar de trabajo (Figura A- 4 d).

c) Preparación de la solución de plomo 1.0 mg/l

$$\text{ppm} = \frac{\text{mg de plomo}}{\text{litros de solución}} \qquad \text{mg de plomo} = \text{ppm} \times \text{litros de solución}$$

$$\text{mg de plomo} = 1.0 \text{ mg/l} \times 1.0 \text{ l} = 1.0 \text{ mg} \approx 0.001 \text{ g/l}$$

Como la fuente de plomo es el Nitrato de Plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$):

Peso molecular del $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 = 331.2 \text{ g/mol}$

Peso molecular del Pb = 207.2 g/mol

Entonces:

331.2 g de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ----- 207.2 g de Pb

X ----- 0.001g de Pb

X = 0.0016 g de nitrato de plomo

De igual manera se procedió a preparar una solución madre de 1,000 mg/l: Se pesó 1.6 g de nitrato de plomo, con una balanza analítica marca Shimadzu, luego se disolvió en agua destilada y se llevó a un volumen de un litro para tener una concentración aproximada de 1,000 mg/l de plomo en la solución madre (Figura A- 5).

Preparada la solución madre de una concentración aproximada de 1,000 mg/l de plomo se procedió a preparar la solución de trabajo (concentración aproximada de 1.0 mg/l). Para ello fue necesario tomar alícuotas de un mililitro de la solución madre (1,000 mg/l), agregar agua destilada y llevar a un volumen de un litro. El procedimiento anterior se realizó para preparar 40.0 litros de la solución estándar de trabajo (Figura A- 5 d).

d) Determinación de la concentración real de arsénico y plomo

Después de preparar la solución estándar de trabajo se verificó la concentración real de los metales en contacto con el bioadsorbente utilizando los métodos correspondientes; se determinó el arsénico por medio de espectrofotometría de absorción atómica con generador de hidruros (A- 6) y el plomo por análisis de espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (A- 7), obteniendo resultados con concentración en unidades mg/l.

3.3.3 Preparación de los tratamientos

Se prepararon los respectivos tratamientos de la siguiente forma (Figura A- 8):

- Se adicionaron dosis de 0.25 g, 0.50 g y 1.00 g de harina de *Moringa oleífera* Lam. (bioadsorbente) a los frascos con muestras de un litro de agua preparadas con As y Pb según el tratamiento, las dosis de harina fueron pesadas en una balanza analítica marca Ohaus, para ser más exacta la cantidad.
- Luego se taparon los recipientes y se realizó una agitación constante durante un minuto, para evitar la formación de grumos en la muestra. Posteriormente se dejó en reposo de acuerdo al tiempo indicado según el tratamiento correspondiente (1 hora, 2 horas y 3 horas), para lograr la sedimentación de los flóculos (grumo de materia orgánica) formados.
- Durante la preparación de los tratamientos se evitó el uso de material metálico ya que estos podrían incorporar residuos de metales e interferir en el análisis.
- Las muestras de agua se dosificaron en recipientes plásticos de un litro, en donde se les aplicaron las dosis y se realizaron tres repeticiones por tratamiento, haciendo un total de veintisiete muestras (Cuadro 4).

Cuadro 4. Distribución de tratamientos y repeticiones

Tratamientos	Dosis: 0.25 g			Dosis: 0.50 g			Dosis: 1.00 g			
	Tiempo			Tiempo			Tiempo			
	1 H	2 H	3 H	1 H	2 H	3 H	1 H	2 H	3 H	
Replicas	R ₁	D ₁ T ₁	D ₁ T ₂	D ₁ T ₃	D ₂ T ₁	D ₂ T ₂	D ₂ T ₃	D ₃ T ₁	D ₃ T ₂	D ₃ T ₃
	R ₂	D ₁ T ₁	D ₁ T ₂	D ₁ T ₃	D ₂ T ₁	D ₂ T ₂	D ₂ T ₃	D ₃ T ₁	D ₃ T ₂	D ₃ T ₃
	R ₃	D ₁ T ₁	D ₁ T ₂	D ₁ T ₃	D ₂ T ₁	D ₂ T ₂	D ₂ T ₃	D ₃ T ₁	D ₃ T ₂	D ₃ T ₃

Fuente: Elaboración propia.

- Transcurrido el tiempo de reposo, utilizando el filtro casero, se procedió a filtrar el agua tratada con las dosis de semilla de *Moringa oleífera* Lam., con el propósito de remover los flóculos formados posterior al tratamiento (Figura A- 8 e).
- Finalmente, se realizó el proceso de digestión (método que se usa para reducir interferencias debido a la presencia de materia orgánica y convertir los metales a una

forma en que se puedan analizar) de las muestras filtradas y se depositaron en viales, para su conservación se almacenaron en refrigeración (Figura A- 9).

Para asegurarnos de que el filtro no interfería en la remoción de metales, se evaluó un blanco de las muestras, en donde se filtraba el agua contaminada sin tratamientos.

Para favorecer nuevamente la sedimentación, durante la noche se dejó en reposo el agua que contenía los flóculos resultantes del método. El agua se descargó al drenaje al ser agua con calidad aceptable y el residuo restante de la harina de moringa se expuso al sol para que por evaporación se eliminará el agua remanente. Todo el algodón utilizado en el proceso de filtración se expuso al sol para secarlo completamente. Luego se colectó en recipiente plástico y se procedió a transportar los residuos a un relleno sanitario, para su deposición final.

3.3.4 Análisis de laboratorio

Los análisis de las muestras se realizaron por el método de espectrofotometría de absorción atómica, con un aparato modelo AA-7000, marca Shimadzu (Figura A- 10), utilizando para la determinación de arsénico la metodología de espectrofotometría de absorción atómica con generador de hidruros (A-6) y para la cuantificación de plomo por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (A-7).

Este análisis se utilizó para medir la concentración de los metales antes y después del tratamiento con el objetivo de verificar la efectividad de las semillas de *Moringa oleifera* Lam en la remoción de dichos metales.

3.3.5 Porcentaje de remoción de metales pesados

Para calcular los porcentajes de remoción de arsénico y plomo se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = \frac{(\text{concentración inicial} - \text{concentración final})}{\text{concentración inicial}} \times 100$$

Donde:

La concentración inicial de determina a partir de la concentración real de las muestras preparadas con plomo y arsénico, y la concentración final: corresponde a la concentración

encontrada de plomo y arsénico en las muestras después del tratamiento de remoción con semillas de *Moringa oleífera* Lam.

3.4 Metodología estadística

Las variables independientes o factores en estudio fueron:

- Dosis de harina de semilla de *Moringa oleífera* Lam.: 0.25, 0.50 y 1.00 g/l
- Tiempo de remoción: 1, 2 y 3 horas

Las variables dependientes o respuesta fueron:

- Porcentaje de remoción de arsénico
- Porcentaje de remoción de plomo

El efecto de tres dosis de harina de semilla de *Moringa oleífera* Lam. y de tres tiempos de remoción fue evaluado por medio de un diseño factorial de tres por tres, dando lugar a nueve tratamientos (Cuadro 5), se realizaron tres replicas por tratamiento, con un total de 27 observaciones. Los tratamientos se conformaron de la siguiente manera:

Cuadro 5. Distribución de los tratamientos (dosis – tiempo)

N° Tratamientos	Dosis (g)	Tiempo (H)
1	0.25	1.00
2		2.00
3		3.00
4	0.50	1.00
5		2.00
6		3.00
7	1.00	1.00
8		2.00
9		3.00

Fuente: Elaboración propia

El análisis de las variables en estudio se rigió por el Diseño Factorial, cuyo modelo matemático es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + FA + FB + AxB + \epsilon$$

Dónde:

- μ = Representa la media de los factores
- FA = Representa al factor Dosis
- FB = Representa al factor Tiempo
- AxB = Representa la interacción entre Dosis y Tiempo
- ϵ = Representa el margen de error del 5% (Gutiérrez y De la Vara 2008).

Para analizar estadísticamente los resultados obtenidos se utilizó el Programa Estadístico InfoStat 2014-E y el Software IBM PASS SPSS 22 Statistics a un nivel de confianza del 95% ($p \leq 0.05$).

Inicialmente se determinó si el conjunto de datos cumplía con los supuestos del Análisis de la Varianza (ANVA) mediante la prueba de normalidad de Shapiro Wilks, para los análisis de remoción de As y Pb. A los datos que cumplieron con el supuesto de normalidad se les aplicó un análisis de varianza paramétrico, y para comparar si existían diferencias entre las dosis y tiempo de remoción se utilizó la Prueba de Duncan. A los datos que no cumplieron con el supuesto, se les aplicó un análisis de varianza no paramétrico, utilizando la Prueba de Kruskal-Wallis, y para determinar la existencia de diferencia entre factores se aplicó la prueba de comparación de pares.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Fase pre-tratamiento

Se destiló agua para la preparación del agua enriquecida con As y Pb a tratar.

4.1.1 Concentración inicial de muestras de agua preparadas

Se determinó la concentración inicial de arsénico y plomo contenida en las muestras de agua. Las concentraciones determinadas fueron mayores a las establecidas por la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua Potable (NSO 13.07.01:08) que fueron utilizadas para cada tratamiento; obteniendo los resultados reflejados en el Cuadro 6:

Cuadro 6. Concentración inicial de As y Pb en agua pre-tratamiento

Conc. inicial muestras de agua		n	Desviación estándar	
Arsénico (As)	Plomo (Pb)		Arsénico (As)	Plomo (Pb)
1.025 mg/l	0.9676mg/l	27	0.0184	0.0016

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones aproximadas a 1.00 mg/l se establecieron con el propósito de evaluar la capacidad de remoción de estos metales una vez sometidos a los tratamientos; a pesar de no ser muestras de agua provenientes de ríos contaminados se adecuaron a una concentración mayor 88% en arsénico y 31.07% en plomo, ya que las concentraciones encontradas en los ríos de El Salvador, en un estudio realizado por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2006) el valor más alto reportado para el contaminante arsénico en agua de río fue de 0.1230 mg/l encontrado en el río Jiboa; mientras que para plomo se reporta el valor más alto en el río Acahuapa, con una concentración de 0.667 mg/l de plomo.

4.1.2 Rendimiento de la harina de *Moringa oleífera* Lam.

De la preparación de harina de semillas de *Moringa oleífera* Lam. se obtuvo un rendimiento del 77.23% a partir de 812.38 g de semillas previamente deshidratadas (A- 11).

La harina se obtuvo a partir de los endospermos junto con la testa que los recubre, ya que según Núñez (2007) en la región de Yeguaré en Honduras, se realizó un estudio para validar la efectividad de la semilla del teberinto, como coagulante natural del agua destinada al consumo humano; donde se obtuvo una eficiencia de un 98% en semillas con testa y un 93% sin testa.

4.2 Fase de post-tratamiento del arsénico

A partir de los resultados obtenidos en el Cuadro A- 12, A- 13 y A- 14 se determinó la remoción final de arsénico. A continuación se presenta el análisis estadístico de los datos producidos en los métodos de laboratorio para arsénico:

4.2.1 Prueba de normalidad

Cuadro 7. Pruebas de normalidad Shapiro-Wilks para As

Variables	n	Media	D.E.	w*	p (Unilateral D)
Rem final As	27	0.00	0.04	0.94	0.3207

Para el arsénico los datos se distribuyen normalmente, con resultados de p valor mayor al nivel de probabilidad de error del 0.05% cumpliendo con el supuesto de normalidad.

4.2.2 Análisis de varianza paramétrico

Cuadro 8. Análisis de varianza paramétrico para As

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	0.18	8	0.02	35.50	<0.0001
Dosis (g)	0.12	2	0.06	91.86	<0.0001
Tiempo (H)	0.04	2	0.02	30.14	<0.0001
Dosis (g)*Tiempo (H)	0.03	4	0.01	10.00	0.0002
Error	0.01	18	0.00065		
Total	0.2	26			

El análisis de varianza para arsénico indica que el modelo estadístico se ajustó correctamente, al igual que para los factores de dosis, tiempo y la interacción entre ellos, aceptando la hipótesis alterna que tanto la dosis como el tiempo por individual así como su interacción si influyeron en la remoción de arsénico, a un nivel de confianza del 95%.

4.2.3 Prueba posteriori

Para identificar si existen diferencias significativas entre dosis, tiempo y la interacción entre ellos, se aplicó prueba de Duncan, obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 9. Prueba de Duncan para comparación entre dosis de As

Dosis (g)	n	Medias	E.E.	Diferencias
0.25	9	0.67	0.01	A
0.50	9	0.73	0.01	B
1.00	9	0.83	0.01	C

Las dosis obtuvieron diferencias significativas entre sí, con un nivel de confianza del 95%, siendo la dosis de 1.00 g la de mejor resultado, en comparación de medias con las dosis restantes. A pesar que pueden obtenerse mayor efecto de remoción con dosis altas, la *Moringa oleífera* Lam. y el resto de bioadsorbentes naturales, presentan un inconveniente y es que cuando se adicionan al agua en forma de semillas pulverizadas, incrementan de manera significativa la carga orgánica, añadiendo hasta un 90% de sustancias orgánicas que no actúan como agentes floculantes. Este hecho, impide almacenar el agua tratada por un tiempo superior a 24 horas (Jahn 1988, citado por García 2007).

Cuadro 10. Prueba de Duncan para comparación entre tiempos para As

Tiempo (H)	n	Medias	E.E.	Diferencias
1.00	9	0.71	0.01	A
2.00	9	0.72	0.01	A
3.00	9	0.80	0.01	B

El tiempo de remoción para arsénico obtuvo dos bloques de comportamientos, para 1 y 2 horas, no presentan diferencias significativas entre sí, siendo el tiempo de 3 horas el que presentó valores de media mayor que el resto (0.80 mg/l) con un nivel de probabilidad de error del 5%. Además para determinar el mejor tratamiento para remoción de arsénico, se evaluó la interacción dosis-tiempo donde se obtuvo:

Cuadro 11. Comparación con prueba de Duncan para dosis-tiempo en la remoción de As

Dosis (g)	Tiempo (H)	n	Medias	E.E.	Diferencias
0.25	1.00	3	0.63	0.01	A
0.25	2.00	3	0.64	0.01	A
0.50	1.00	3	0.68	0.01	B
0.50	2.00	3	0.69	0.01	C
0.25	3.00	3	0.74	0.01	D
1.00	2.00	3	0.83	0.01	E
1.00	3.00	3	0.83	0.01	E
0.50	3.00	3	0.83	0.01	E
1.00	1.00	3	0.84	0.01	E

La interacción aplicada a los tratamientos presenta 4 bloques de comportamientos diferente, pero muy similares dentro de sí. El tratamiento de 1.00 g - 1 hora presentó un valor de media mayor que el resto, a pesar de que su efecto sea similar a los tratamientos del bloque E, presenta una diferencia significativa al resto de los bloques.

Según lo reportado por Vásquez (2016), la concentración de As en el agua disminuyó de 100 $\mu\text{g/l}$ a un promedio de 9.89 $\mu\text{g/l}$ en agua tratada con las dosis de 0.25, 0.50 y 0.75 g/l, de hojas pulverizadas de *Moringa oleífera* Lam. y una concentración de As del agua tratada de 10.13, 9.81 y 9.75 $\mu\text{g/l}$ respectivamente.

4.2.4 Porcentaje de remoción final arsénico

El arsénico experimentó un rango de remoción entre 60.98% a 82.11% (Cuadro A- 15) (Figura 2), respecto a la concentración inicial obtenida.

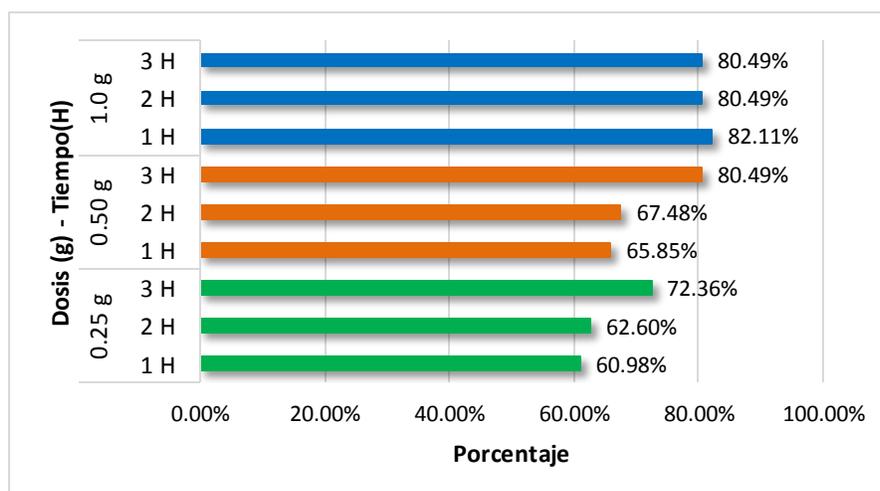


Figura 2. Remoción porcentual arsénico (%)

Gráficamente se observa que los porcentajes de remoción del arsénico sobre pasan el 60% en todos los tratamientos, siendo el tratamiento de 1.00 g – 1 hora el de mayor remoción con un porcentaje de 82.11%.

En estudios realizados por Vásquez (2016) en la remoción de arsénico en agua para consumo a partir de dosis de hojas de *Moringa oleífera* Lam. (0.25, 0.50 y 0.75 g), obtuvo resultados estadísticamente similares en la efectividad de bioadsorción del arsénico, removiendo en promedio hasta un 89% la cantidad inicial en el agua contaminada.

La toxicidad del arsénico en el agua es eliminada con un proceso oxidativo, para la transformación de la forma más tóxica de As (III) a la forma menos tóxica de As (V) (Cha *et al.* 2015, citado por Vásquez 2016).

4.2.5 Resultados de arsénico comparados con la normativa para agua potable NSO 13.070.01:08

Cuadro 12. Comparación de resultados de arsénico con valores exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08

Dosis (g)	Tiempo (H)	NSO 13.07.01:08 Arsénico (mg/l)	Conc. Inicial (mg/l)	Conc. Final (mg/l)
0.25	1	0.01	1.025	0.400
	2			0.383
	3			0.283
0.50	1			0.350
	2			0.333
	3			0.200
1.00	1			0.183
	2			0.200
	3			0.200

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se observa detalladamente el comportamiento de las medias de los tratamientos, respecto a la concentración exigida por normativa.

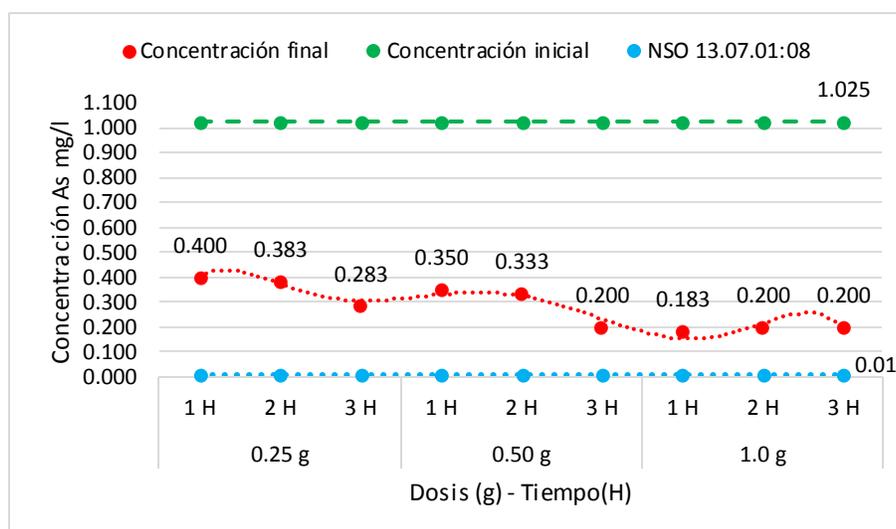


Figura 3. Comparación de la remoción de arsénico según normativa para agua potable

A pesar de haber removido más del 80% de arsénico, a partir de una concentración inicial de 1.025 mg/l, no se cumplió con los valores establecidos por la normativa NSO 13.07.01:08 para agua potable. Esta comparación al igual que en los valores porcentuales, el tratamiento de

1.00 g – 1 hora fue el más efectivo, obteniendo la concentración final (0.183 mg/l) más baja respecto al resto de tratamientos.

Desde hace más de 100 años la contaminación de los recursos hídricos superficiales que, muchas veces se destina como agua para riego directo, es un problema cada vez más grave, debido a que estos se usan como destino final de residuos domésticos e industriales, sobre todo en las áreas urbanas. Estas actividades son las principales responsables de la alteración de la calidad de las aguas naturales, que en algunos casos llegan a estar tan contaminadas que su potabilización resulta muy difícil y costosa (Vargas 2004, citado por Cuadra y Romero 2006; Silva *et al.* 2002, citado por Vásquez 2016); y aunque no existe un nivel de exposición al plomo o al arsénico que pueda considerarse seguro, la intoxicación es totalmente prevenible.

4.2.6 Determinación del efecto dosis-tiempo sobre remoción de arsénico

A continuación se presenta el análisis estadístico en forma gráfica, de los datos producidos en los métodos de laboratorio para arsénico:

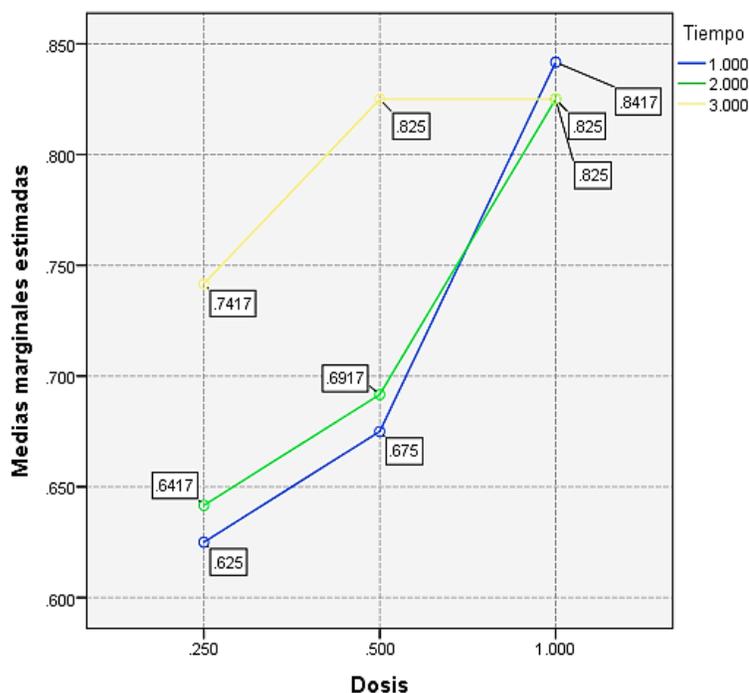


Figura 4. Efecto dosis-tiempo en la remoción de arsénico

Nota: Las medias marginales estimadas indican la concentración de arsénico en mg/l removida por los tratamientos.

La Figura 4, indica que el tiempo de 1 y 2 horas con las tres dosis se comportan directamente proporcional, ya que a medida aumenta el tiempo de contacto, la remoción del arsénico aumenta, no así para tres horas, que aunque inicia siendo la de mayor remoción, a medida se incrementa la dosis, dicha remoción tiende a ser constante. Cabe mencionar que el tratamiento que produjo la mayor remoción fue el de 1.00 g – 1 hora.

Vásquez (2016) en su investigación sobre bioadsorción de arsénico utilizando la hoja de *Moringa oleífera* Lam., obtuvo que todos los tratamientos fueron estadísticamente similares en efectividad en la bioadsorción de arsénico. Sin embargo, observó una tendencia de reducción de arsénico en el agua al incrementar la dosis de polvo de hoja.

4.3 Fase de post-tratamiento del plomo

A partir de los resultados obtenidos en el Cuadro A- 12, A- 13 y A- 14 se determinó la remoción final de plomo. A continuación se presenta el análisis estadístico de los datos producidos en los métodos de laboratorio para plomo:

4.3.1 Prueba de normalidad

Cuadro 13. Pruebas de normalidad Shapiro-Wilks para Pb

Variables	n	Media	D.E.	w*	p (Unilateral D)
Rem final Pb	27	0.00	0.003	0.82	< 0.0001

El plomo presentó datos heterogéneos pues su p valor es inferior a la probabilidad de error de 0.05% por lo que no se ajusta el modelo y por lo que es necesario aplicar un análisis de varianza no paramétrico.

4.3.2 Análisis de varianza no paramétrica

Cuadro 14. Análisis de varianza no paramétrico para Pb

Variable	Dosis (g)	Tiempo (H)	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Remoción final	0.25	1.00	3	0.96	0.01000	0.96	19.29	0.0089
	0.25	2.00	3	0.96	0.00120	0.96		
	0.25	3.00	3	0.96	0.00120	0.96		
	0.50	1.00	3	0.96	0.00100	0.96		
	0.50	2.00	3	0.96	0.00058	0.96		
	0.50	3.00	3	0.97	0.00000	0.97		
	1.00	1.00	3	0.96	0.00058	0.96		
	1.00	2.00	3	0.97	0.00000	0.97		
	1.00	3.00	3	0.97	0.00000	0.97		

El análisis de varianza no paramétrico para plomo indica que el modelo estadístico se ajustó correctamente, y a pesar que sus medias presentan efectos similares en todos los tratamientos, se acepta la hipótesis alterna que indica que al menos un tratamiento presenta diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

4.3.3 Prueba posteriori

Para identificar si existen diferencias significativas entre dosis, tiempo y la interacción entre ellos, se aplicó prueba de comparación de a pares, obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 15. Prueba de comparación de a pares entre dosis de Pb

Dosis (g)	Rangos	Diferencias
0.25	6.94	A B B
0.50	15.06	
1.00	20.00	

Una vez cumplido el análisis de varianza para dosis de plomo (Cuadro A- 18) se comparan las dosis entre sí, obteniendo que pesar que todas las dosis son capaces de remover el plomo, la dosis de 0.25 g presentó diferencia significativa en comparación al resto, con un nivel de significancia del 5%.

En el caso del tiempo no hubo diferencias significativa, por lo que todos se comportan de igual manera (Cuadro A- 19) por ende no existen comparación entre ellos.

Para definir el tratamiento con mejores resultados se determinó la interacción entre factores, obteniendo los resultados siguientes:

Cuadro 16. Prueba de comparación de a pares entre factores para Pb

Tratamientos	Rangos	Diferencias
0.25 : 2.00	4.67	A
0.25 : 3.00	7.17	A
0.50 : 1.00	8.67	A
0.25 : 1.00	9.00	A
0.50 : 2.00	14.00	A
1.00 : 1.00	15.00	A B
1.00 : 3.00	22.50	B
1.00 : 2.00	22.50	B
0.50 : 3.00	22.50	B

Estadísticamente los tratamientos en general presentaron dos series de comportamiento, de modo que los tratamientos (A) con dosis de 0.25 g para los tres tiempos (1, 2 y 3 horas), y en dosis de 0.50 g para los tiempos de 2 y 3 horas (A) presentan una mínima diferencia respecto a los tratamientos (B) con dosis de 1.00 g en tiempos de 2 y 3 horas, y para dosis de 0.50 g en tiempo de 3 horas. El único tratamiento que produce los mismos efectos entre ambos comportamientos fue 1.00 g – 1 hora.

4.3.4 Porcentaje de remoción final plomo

El plomo expreso un rango de remoción entre el 98% y el 99.90% (Cuadro A- 16) (Figura 5), comparados con los valores iniciales.

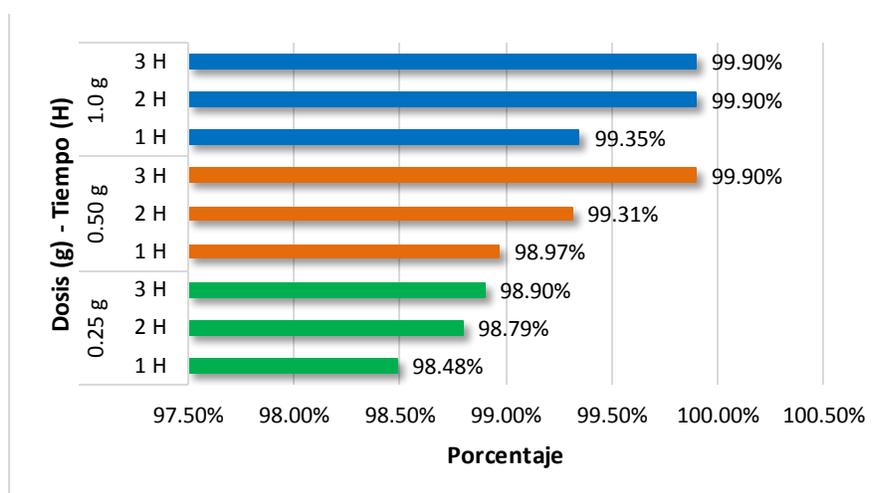


Figura 5. Remoción porcentual de plomo (%)

Como se observa en la Figura 5, todos los tratamientos removió más del 98% de plomo; a pesar que las diferencias entre tratamientos es mínima, los que obtuvieron mejores resultados fueron el tratamiento de 0.50 g – 3 horas y los tratamientos de 1.00 g para 2 y 3 horas, removiendo hasta un total de 99.90%.

En datos reportados por Más y Rubí *et al.* (2013) quienes evaluaron el efecto de las semillas de *Moringa oleífera* Lam. como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbiedad, obtuvieron que las semillas de *Moringa oleífera* Lam. lograron reducir la concentración de metales tales como Cd, Cu, Zn, Fe y Ni presentes en el agua residual, con valores iniciales de: 0.07 mg/l; 0.81 mg/l; 1.20 mg/l; 1.94 mg/l y 0.63 mg/l respectivamente, con una dosis óptima de 25 mg/l, obteniéndose una remoción de metales expresada en forma porcentual de: Cd: 71.4%; Cu:75.3%; Zn:99.2%; Fe:60.8% y Ni: 73%.

En otro estudio realizado en semillas de *Moringa oleífera* Lam. para la eliminación de iones de manganeso a partir de soluciones acuosas, se determinó que las semillas de *M. oleífera* Lam. son muy eficientes en la eliminación de iones de manganeso a partir de suministros de agua potable que tienen niveles de este metal por encima de los límites legales. Las eficiencias de extracción del metal fueron mayores que 95% a partir de muestras de agua (Marqués *et al.* 2013).

4.3.5 Resultados de plomo comparados con la normativa para agua potable (NSO 13.07.01:08)

Al comparar la remoción de los metales con los valores exigidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria para agua potable NSO 13.07.01:08 (CONACYT 2009), se obtuvieron los resultados:

En el caso del plomo las concentraciones removidas fueron arriba del 98%, por lo tanto cumplieron con los límites máximos exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08 (0.01 mg/l Pb), e incluso presentaron valores inferiores al máximo permitido por dicha norma.

Cuadro 17. Comparación de resultados de plomo con valores exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08

Dosis (g)	Tiempo (H)	NSO 13.07.01:08 Plomo (mg/l)	Conc. Inicial (mg/l)	Conc. Final (mg/l)
0.25	1	0.01	0.9676	0.015
	2			0.012
	3			0.011
0.50	1			0.010
	2			0.007
	3			0.001
1.00	1			0.006
	2			0.001
	3			0.001

Las medias de los tratamientos de 0.50 g y 1.00 g para los tres tiempos indican que cumplen con la concentración exigida por normativa, lo que hace más confiable el uso de dichos tratamientos para el agua de consumo.

En la Figura 6 se expresan los resultados obtenidos en la remoción de plomo en agua tratada con *Moringa oleifera* Lam., comparándolos con la normativa para agua potable NSO 13.07.01:08 (CONACYT 2009), mostrando así un comportamiento, en donde la concentración inicial se redujo incluso por debajo del límite exigido.

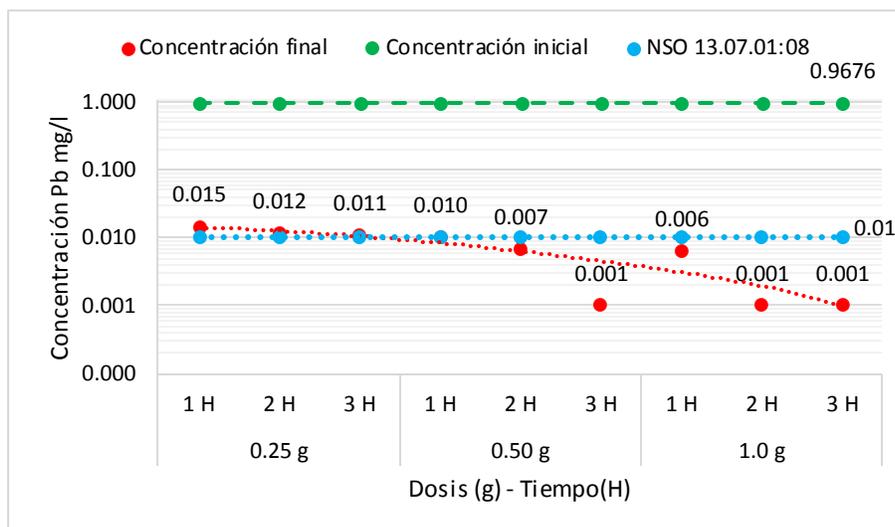


Figura 6. Comparación de la remoción de plomo según normativa para agua potable

En el caso del plomo las concentraciones removidas arriba del 98%, cumplieron con los límites máximos exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08, e incluso presentaron valores inferiores al máximo permitido por dicha norma. En el caso del tratamiento de 0.50 g – 3 horas y los tratamientos de 1.00 g para 2 y 3 horas, presentaron la concentración final más baja, por lo que se vuelven más confiables al momento de remover plomo.

Para Gómez (2010), los estudios comparativos de la *Moringa oleifera* Lam. y el sulfato de aluminio para el tratamiento de agua demuestran que es una alternativa viable como coagulante para el tratamiento de agua potable en países en vías de desarrollo, ya que es de bajo costo y de fácil acceso para familias que viven en zonas rurales pobres.

Recientemente, la bioadsorción ha sido propuesta como un procedimiento de tratamiento alternativo en la remoción de metales pesados en sistemas acuosos. En este sentido, los estudios de investigación en torno al Teberinto se han centrado en estudiar su potencial para resolver esta problemática medioambiental (Rodríguez *et al.* 2015).

Dentro de las ventajas están: pueden ser aplicados tanto en soluciones individuales como en sistemas comunitarios; la operación y el mantenimiento son más sencillos, ya que no se requiere adicionar químicos, junto con el hecho de que pueden ser modificados para incrementar la eficiencia (Acuña *et al.* 2016).

4.4 Determinación del efecto dosis-tiempo sobre remoción de plomo

En el Cuadro A- 20 se resume la interacción del efecto dosis-tiempo sobre la remoción de plomo, la cual se expresa gráficamente obteniendo:

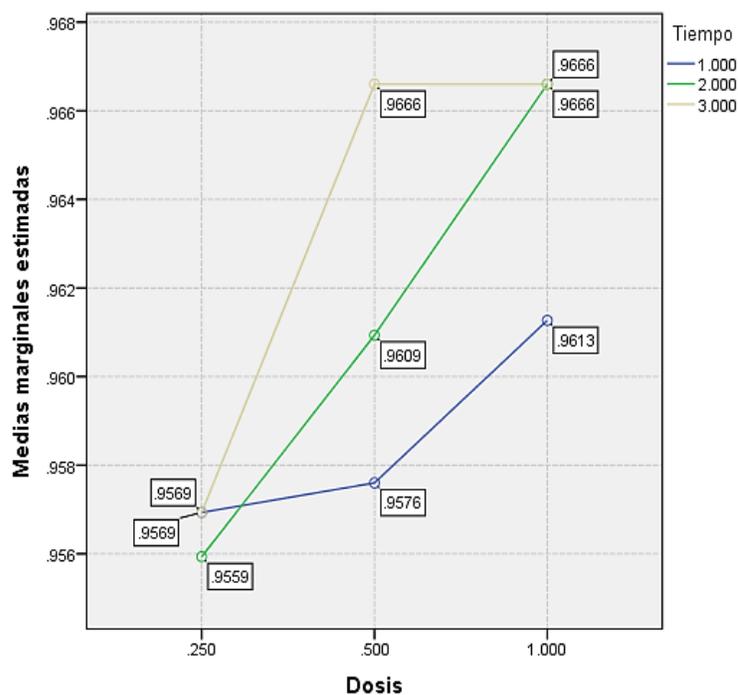


Figura 7. Efecto dosis-tiempo en la remoción de plomo

Nota: Las medias marginales estimadas indican la concentración de plomo en mg/l removida por los tratamientos.

Todos los tratamientos evaluados resultaron positivos para la remoción de plomo, la diferencia de remoción entre tratamientos es mínima. Gráficamente se observa que en los tratamientos de 1 y 2 horas la tendencia de remoción es ascendente a medida se incrementan las dosis, en cambio los tratamientos de 3 horas alcanzaron la mayor remoción en dosis de 0.50 g manteniendo la tendencia de remoción al incrementar la dosis a 1.00 g. Cabe mencionar que el tratamiento de 0.25 g – 2 horas presentó la remoción más baja (0.9559 mg/l) y los

tratamientos de 0.50 g – 3 horas y de 1.00 g – 2 y 3 horas presentaron la mayor remoción de plomo (0.9666 mg/l) en comparación con los demás tratamientos.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Rodríguez *et al.* (2015), se evidencia el potencial bioadsorbente de las cápsulas de *Moringa oleífera* Lam. en la remoción de Mn (II) en sistemas acuosos bajo las condiciones experimentales usadas de 25 ml de solución de 4 mg/l Mn (II) y 0.25 g de cápsulas de moringa natural, tratadas hidrotérmicamente y con NaOH 0.1 mol/l. El porcentaje óptimo de remoción fue alcanzado a los 5 min (79%, 97% y 98% respectivamente).

Por lo tanto con estas investigaciones queda demostrado que los tratamientos de agua utilizando las partes como semillas y las hojas del árbol de *Moringa oleífera* Lam. incrementa la capacidad de adsorción de especies metálicas. Además el empleo de este bioadsorbente de metales pesados ofrece un proceso de bajo costo, fácil adquisición, eficiente en tiempo, amigable al ambiente y a pH relativamente neutros.

5. CONCLUSIONES

- Las concentraciones de arsénico se redujeron hasta en un 82.11% a partir de la concentración inicial, mientras que las de plomo se redujeron hasta en un 99.90%; lo anterior es debido al proceso de adsorción que permite la captación activa o pasiva de los iones metálicos.
- Los efectos dosis y tiempo presentan diferencias significativas sobre la remoción de arsénico, indican un comportamiento inversamente proporcional, a medida se incrementa la dosis, el tiempo de contacto se reduce y viceversa.
- Para la remoción de plomo, los efectos dosis y tiempo presentan diferencias significativas con un comportamiento directamente proporcional, ya que a medida se incrementa la dosis, el tiempo de contacto aumenta.
- Al comparar los resultados de remoción de arsénico con los valores exigidos por normativa para agua potable NSO 13.07.01:08 se determinó que no cumplen con dichos valores, pues el rango de concentración final de arsénico (0.18 – 0.40 mg/l) es superior a los límites máximos permisibles para agua potable (0.01 mg/l).
- Comparando los resultados obtenidos en plomo con la normativa para agua potable NSO 13.07.01:08 se determinó que todos los tratamientos lograron remover la concentración de plomo a niveles iguales o inferiores a los exigidos por dicha normativa.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda como tratamiento ideal la dosis de 0.50 g con tiempo de 3 horas, pues los resultados indican que este tratamiento se mantiene estable y garantiza obtener resultados más confiables al momento de su aplicación.
- El método de remoción de metales pesados en agua destinada al consumo humano usando como bioadsorbente la semilla de *Moringa oleífera* Lam. aquí evaluado, constituye únicamente un proceso de tratamiento físico-químico del agua, por lo que es necesario aplicar algún método de desinfección ya sea: ebullición, cloración, desinfección solar, entre otros, ya que el método evaluado constituye un tratamiento físico-químico, con el objetivo de garantizar la eliminación de organismos patógenos.
- Después de utilizado el filtro este se debe desarmar y volver a lavar bien, con parte del agua tratada, tanto el envase como la grava, y remplazar el algodón ya que este acumula las partículas de harina de semilla de *Moringa oleífera* Lam. y tiende a generar mal olor pasadas 24 horas.
- El agua tratada debe ser consumida en un periodo no mayor a 24 horas, pues por las proteínas y demás componentes presentes en la semilla de Teberinto, el agua tiende a descomponerse, generando mal olor.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aceves, A.; Castañeda, L. 2012. Producción biotecnológica de lipasas microbianas, una alternativa sostenible para la utilización de residuos agroindustriales. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica* 19(3): 244-247.

Acuña, A.; Araya, A.; Romero, L. 2016. Selección teórica de absorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 29(3):23-34.

Alfaro, N. 2008. Rendimiento y Uso Potencial de Paraíso Blanco, *Moringa oleífera* Lam. en la Producción de Alimentos de Alto Valor Nutritivo para su Utilización en Comunidades de Alta Vulnerabilidad Alimentario-nutricional de Guatemala. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), Guatemala. 150 p.

Alfaro, N.; Martínez, W. 2008. Uso Potencial de la Moringa (*Moringa oleífera*, Lam.) para la Producción de Alimentos Nutricionalmente Mejorados, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), Guatemala. p. 6.

Bayona, B.; Sánchez, S.; Cisneros, E.; Escobedo, J.; Moorillón, M.; Muñoz, R.; García, B.; Enríquez, G. 2009. Tratamiento biológico del agua residual procedente de una industria papelería mediante la utilización de una columna empacada. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 5 (2): 180-185.

Cáceres, C.; Díaz, J. 2005. Propuesta de tratamiento de aguas de desecho de una industria química de adhesivos utilizando extracto acuoso de la semilla de *Moringa oleífera* (Teberinto), Tesis M.Sc. San Salvador, SV. UES. 120 p.

Cañizares, R. 2000. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42:131-143.

Carabantes, A.; Fernicola, N. 2003. Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* 39(4):365- 372.

Carranza, F. 2015. Evaluación de dos tecnologías artesanales para la remoción de plomo y arsénico en agua para consumo humano. Tesis M. Sc. San Salvador, SV, UES. 112 p.

Cartaya, O.; Reynaldo, I.; Peniche, C. 2008. Cinética de adsorción de iones cobre (II) por una mezcla de oligogalacturónidos. *Revista Iberoamericana de Polímero* 9(5):473-479.

Caviedes, D.; Muñoz, R.; Perdomo, A.; Rodríguez, D.; Sandoval, I. 2015. Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Huila, CO. *Revista Ingeniería y Región* 13(1):73-90.

CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, SV). 2009. Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07. 01:08 Agua, Agua Potable (en línea). Consultado 29 abr. 2017. Disponible en http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/normas/NORMA_AGUA_POTABLE_2_a.pdf

Cuadra, C.; Romero, D. 2006. Aplicación de biomonitores para evaluar la contaminación por metales pesados en el Lago Suchitlán. Tesis Ing. en alimentos. San Salvador, SV, UES. 198p.

Cuéllar, N. 2001. Los desafíos del agua y la reforma del sector hídrico en El Salvador: La respuesta institucional. PRISMA No 45. San Salvador, El Salvador. p 3.

Cuizano, N.; Llanos, B.; Navarro, A. 2009. Aplicaciones ambientales de la adsorción mediante biopolímeros naturales: Parte 1-Compuestos fenólicos. *Rev. la Soc. Química del Perú* 75(4):488-494.

Folkard, G.; Sutherland, J. 1996. *Moringa oleífera* un árbol con enormes potencialidades. Trad. A. Jiménez. *Agroforestry Today* 8(3):5-8.

García, A.; Martínez, R.; Rodríguez, I. 2013. Evaluación de los usos potenciales del teberinto (*Moringa oleífera*) como generador de materia prima para la industria química. Tesis Ing. Químico. San Salvador, SV, UES. 204 p.

García, B. 2007. Metodología de extracción in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Tesis Master en Seguridad Industrial y Medioambiente. Valencia, España. ISIRYMUPV. 121 p.

García, B.; Arnal, J.; Alandia, S. 2012. Estudio de la descontaminación de efluentes líquidos con elevada concentración de metales pesados mediante bioadsorbentes de *Moringa oleífera*. España, ISIRYMUPV. p. 1098-1108.

García, M. 2003. Producción de semillas forestales de especies forrajeras enfatizados en sistemas silvopastoriles: *Moringa oleífera* Lam. (en línea). Consultado 09 nov. 2016. Disponible en www.inafor.gob.ni/.../22-produccion-de-semillas-forestales-especies-forajeras.html

Gómez, K. 2010. Eficiencia del coagulante de la semilla de *Moringa oleífera* en el tratamiento de agua con baja turbidez. Tesis Ing. en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. Zamorano, Honduras. Escuela Agrícola Panamericana el Zamorano. 20 p.

Gutiérrez, H.; De la Vara, R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México, DF, McGraw-Hill. 564 p.

Marqués, T.; Alves, V.; Coelho, L.; Coelho, N. 2013. Assessment of the use of *Moringa oleífera* seeds for removal of Manganese Ions from Aqueous systems. *BioResources* 8(2):2738-2751.

Martín, C.; Martín, G.; A. García, A.; Fernández, T.; Hernández, E.; Puls, J. 2013. Potenciales aplicaciones de *Moringa oleífera*. Matanzas, CU. v.36, p. 137-149.

Más y Rubí, M.; Carrasquero, S.; Martínez, D.; Mejías, D.; Vargas, L. 2013. Eficiencia de las semillas de *Moringa oleífera* como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbidez. *Revista tecnocientífica URU* no.5:27-37.

Melo, G.; Turriago, F. 2012. Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de *Moringa oleífera* como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales del Caño Cola de Pato ubicado en el sector rural del Municipio de Acacias. Tesis Ing. Agroforestal. Villavicencio, CO, UNAD. 82 p.

Molano, L. 2011. Las semillas de *Moringa oleífera* Lam. como alternativa de coagulante natural para la purificación de agua. Monografía Especialista en Química Ambiental. Bucaramanga, CO, UIS. 43 p.

Montero, V.; Quesada, J.; Ledezma, A.; Sandoval, J. 2010. Determinación de arsénico en abastecimientos de agua para consumo humano de la provincia de Cartago, Costa Rica. Acta Médica Costarricense 52(2):96-101.

Núñez, E. 2007. Validación de la efectividad de la *Moringa oleífera*. Tesis Ing. Agr. Zamorano, Honduras. Escuela Agrícola Panamericana el Zamorano. 23 p.

OMS (Organización Mundial de la Salud, ES). 2012. Arsénico (en línea). Consultado 10 oct. 2016. Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/>

_____. 2015. Intoxicación por plomo y salud (en línea). Consultado 08 oct. 2016. Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>

OPS (Organización Panamericana de la Salud, PE); CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, PE). 2005. Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero (en línea). Consultado 23 nov. 16. Disponible en <http://docplayer.es/220767-Guia-para-el-mejoramiento-de-la-calidad-del-agua-a-nivel-casero.html>

Palacios, S.; Guglielmino, C.; Vereá, M.; Pecotche, D. 2012. Hidroarsenicismo crónico regional y endémico: presentación de un caso clínico y breve reseña bibliográfica. Arch Argent Dermatol 62: 233-238.

Parrotta, J. 1993. *Moringa oleífera* Lam. Resedá, horseradish tree. New Orleans, US. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. p. 366-370.

Pérez, D. 2013. Semana internacional de prevención de la intoxicación por plomo (en línea). Consultado 26 nov. 16. Disponible en <http://cuidatusaludcondiane.com/semana-internacional-de-prevencion-de-la-intoxicacion-por-plomo/>

Quiñones, E.; Tejada, C.; Arcia, C.; Ruiz, V. 2013. Remoción de plomo y níquel en soluciones acuosas usando biomasa lignocelulósicas: una revisión. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 16(2): 479-489.

Rivière, T. 2002. Remoción de metales pesados. Burdeos, FR. p. 44.

Rodríguez, M.; Flores, S.; Rangel, M.; Cubillán, L.; Argotte, A. 2015. Un estudio de la remoción de manganeso (II) a partir de sistemas acuosos usando cápsulas de *Moringa oleífera* como bioadsorbente. *Revista CENIC Ciencias Biológicas* 46:424-433.

Sánchez, Y.; Martínez, G.; Sinagawa, S.; Vázquez, J. 2013. *Moringa oleífera*; Importancia, Funcionalidad y Estudios Involucrados. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila* 5(9):25-30.

Shimadzu Corporation. s.f. Japanese Industrial Standard JIS K-102-1993. Testing methods for industrial waste water Environmental standard concerning water contamination. Atomic Absorption, Iron Determination. s.p.

SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SV). 2006. Informe Final Diagnóstico Nacional de la Calidad Sanitaria de las Aguas Superficiales de El Salvador. Contrato MARN-BID-1209/OC-ES No.60/2006 (en línea). Consultado 26 nov. 2016. Disponible en <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00246/doc00246-contenido.pdf>

Tejada, C.; Villabona, Á.; Garcés, L. 2014. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. Cartagena, CO. Editorial Tecnológicas. Vol. 18. p. 109-123.

Vásquez, F. 2016. Biosorción de arsénico por hojas de Moringa, Tesis Ing. Procesos ambientales. Torreón, MX, UAAAN. 51 p.

Wang, J.; Chen, C.; 2009. Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances* 27:195–226.

8. ANEXOS



Figura A- 1. Recolección de vainas de *Moringa oleífera* Lam.



a. Perforación del tapón



b. Recorte de los recipientes plásticos



c. Colocación de capa de algodón



d. Colocación de capa de grava



e. Perforación del recipiente contenedor

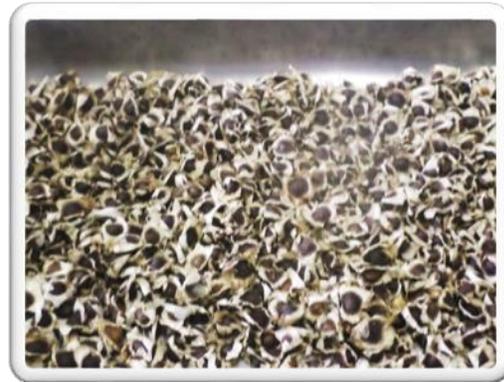


f. Filtro casero elaborado

Figura A- 2. Construcción del filtro casero



a. Extracción de las semillas de la vaina



b. Semillas con testa de *Moringa oleífera* Lam.



c. Secado de las semillas



d. Semillas trituradas de *Moringa Oleífera* Lam.

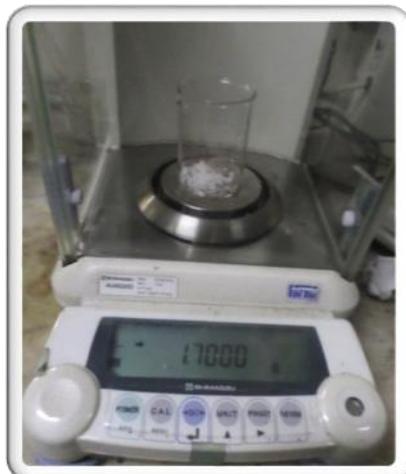


e. Pulverizado de las semillas

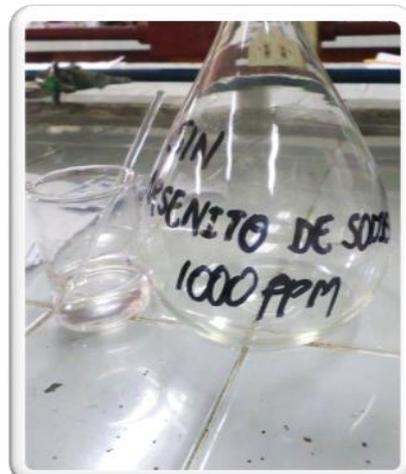


f. Tamizado de la harina

Figura A- 3. Procesamiento de la semilla de *M. oleífera* Lam. como bioadsorbente



a. Pesado de arsenito de sodio



b. Arsenito de sodio disuelto en agua destilada



c. Solución de arsenito de sodio 1 ppm



d. Solución madre de arsenito de sodio



e. Dosificación de la solución madre en recipientes de 1 litro

Figura A- 4. Preparación de solución de arsenito de sodio (NaAsO_2)



a. Pesado de nitrato de plomo



b. Nitrato de plomo disuelto en agua destilada



c. Solución de nitrato de plomo 1 ppm



d. Solución madre de nitrato de plomo



e. Dosificación de la solución madre en recipientes de 1 litro

Figura A- 5. Preparación de solución de nitrato de plomo (PbNO₃)

A- 6. Determinación de arsénico

Referencia. Shimadzu Corporation. s.f. Japanese Industrial Standard JIS K-102-1993. Testing methods for industrial waste water Environmental standard concerning water contamination. Atomic Absorption, Iron Determination. s.p.

Las muestras de agua digeridas se midieron directamente en el espectrofotómetro de absorción atómica AA-7000, marca Shimadzu utilizando viales plásticos. Se obtuvieron los resultados en concentración de ppm.

a. Fundamento

La muestra es atomizada mediante un nebulizador y posteriormente se quema en una llama de aire-acetileno. Se hace pasar un haz de luz utilizando una lámpara de cátodo hueco para As que proporciona una longitud de onda de 193.7 nm. La cantidad de energía absorbida por la muestra está relacionada directamente con la concentración de arsénico en la misma.

b. Tratamiento de la muestra (Digestión con ácido clorhídrico)

Cuando la muestra presenta una cantidad de sustancias orgánicas muy pequeña o en suspensión, se adicionan 5 ml de ácido clorhídrico por cada 100 ml de muestra. Se calienta y se ebulle durante 10 minutos.

c. Reactivos

- Solución de yoduro de potasio.
- Solución de tetrahidrobórate de sodio (0.5 % p/v)
- Solución de NaOH 0.1 M.
- HCl (1+1): Mezclar HCl en igual cantidad de agua bidestilada.
- Solución estándar de As (100 ppb)
- Ácido clorhídrico concentrado.
- Agua bidestilada.

d. Equipo

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica de llama.
- Hot plate.
- Cristalería de laboratorio en general.

e. Procedimiento

1. Utilizar la muestra tratada directamente para la medición o diluir la muestra tratada con ácido clorhídrico (1 + 50), de tal manera que su concentración este dentro del intervalo de cuantificación.
2. Llevar un blanco de reactivos utilizando agua bidestilada en igual cantidad que la muestra y llevar a cabo el mismo procedimiento. El valor obtenido del blanco será utilizado para la corrección del valor obtenido en la medición de la muestra.
3. Para la curva de calibración preparar estándares de 0.50, 1.0, 2.0 y 5.00 ppb de As partiendo de la solución estándar de As (100 ppb), utilizando frascos volumétricos de 10 ml, luego adicionar ácido clorhídrico de manera de obtener similares condiciones como en la muestra. Llevar a volumen con agua bidestilada.

f. Medición

1. Encender el equipo e introducir los parámetros necesarios para la determinación de arsénico:
 - Longitud de onda: 193.7 nm
 - Estándares a utilizar: 0.50, 1.0, 2.0 y 5.00 ppb de As
 - Corriente de lámpara: 10 mA
 - Slit: 0.2 nm
 - Modo de corrección; BGC-D2
 - Número de repeticiones por cada lectura.
2. Dejar que el equipo se estabilice durante 15 minutos.
3. Aspirar el blanco preparado, este se utilizó para corregir cualquier interferencia producida por los reactivos.
4. Aspirar los estándares en el equipo para realizar la curva de calibración.
5. Aspirar la muestra.
6. Anotar la lectura de la muestra obtenida directamente del equipo; si se realizó alguna dilución de la muestra multiplicar por el factor de dilución para obtener el resultado.
7. Corregir el resultado con el blanco si es necesario.
8. Aspirar agua destilada para limpiar el equipo y apagar.
9. El resultado esta expresado en mg/l de arsénico.

g. Preparación de reactivos, estándares y muestras para arsénico

- Procedimiento para preparación de reactivos:
 1. Solución de yoduro de potasio (200 g/L): Se disolvió 200 g de KI en agua bidestilada y llevar a volumen de 1000 ml (preparación reciente).
 2. Solución de tetrahidrobórate de sodio (0.5 % p/v): Disolver 2.5 g de NaBH_4 en 500 ml de NaOH 0.1 M.
 3. Solución de NaOH 0.1 M: Disolver 2.0 g de NaOH en 100 ml de agua bidestilada y llevar a volumen de 500 ml.
 4. HCl (1+1): Mezclar HCl en igual cantidad de agua bidestilada.

- Preparación de solución stock de 100 ppb:
 1. De la solución comercial de 1000 ppb de arsénico se toma 25 ml y se deposita en un balón de 250 ml, se agregan 12.5 ml de HCl concentrado se afora con agua bidestilada. A partir de la solución stock se prepararon los estándares siguientes:

- Procedimiento para preparación de estándares
 1. Estándar de 0.5 ppb, del estándar de 100 ppb se toman 0.25 ml y se depositan en un balón de 50 ml, se agregan 4 ml de HCl (1+1) y 2 ml de KI se afora con agua bidestilada. Luego se ponen a calentar (sin ebulir) por 30 minutos a $\pm 85^\circ\text{C}$. Se deja enfriar y se lleva a volumen con agua bidestilada.
 2. Estándar de 1.0 ppb, del estándar de 100 ppb se toman 0.5 ml y se depositan en un balón de 50 ml, se agregan 4 ml de HCl (1+1) y 2 ml de KI se afora con agua bidestilada. Luego se ponen a calentar (sin ebulir) por 30 minutos a $\pm 85^\circ\text{C}$. Se deja enfriar y se lleva a volumen con agua bidestilada.
 3. Estándar de 2.0 ppb, del estándar de 100 ppb se toman 1.5 ml y se depositan en un balón de 50 ml, se agregan 4 ml de HCl (1+1) y 2 ml de KI se afora con agua bidestilada. Luego se ponen a calentar (sin ebulir) por 30 minutos a $\pm 85^\circ\text{C}$. Se deja enfriar y se lleva a volumen con agua bidestilada.
 4. Estándar de 5.0 ppb, del estándar de 100 ppb se toman 2.5 ml y se depositan en un balón de 50 ml, se agregan 4 ml de HCl (1+1) y 2 ml de KI se afora con agua bidestilada. Luego se ponen a calentar (sin ebulir) por 30 minutos a $\pm 85^\circ\text{C}$. Se deja enfriar y se lleva a volumen con agua bidestilada.

- Procedimiento para preparación de muestras
 1. De la muestra tratada, se toma 10 ml y se deposita en un balón de 50 ml, se agrega 1 ml de HCl (1+1) y 2 ml de solución KI y se afora con agua bidestilada. Luego se ponen a calentar (sin ebulir) por 30 minutos a $\pm 85^{\circ}\text{C}$. Se deja enfriar y se lleva a volumen con agua bidestilada.

A- 7. Determinación de plomo

Las muestras de agua digeridas se midieron directamente en el espectrofotómetro de absorción atómica AA-7000, marca Shimadzu utilizando viales plásticos. Los resultados obtenidos están expresados en mg/l (ppm).

a. Fundamento

La muestra es atomizada mediante un nebulizador y posteriormente se quema en una llama de aire-acetileno. Se hace pasar un haz de luz utilizando una lámpara de cátodo hueco para Pb que proporciona una longitud de onda de 283.3 nm. La cantidad de energía absorbida por la muestra está relacionada directamente con la concentración de plomo en la misma.

b. Tratamiento de la muestra (Digestión con ácido clorhídrico)

Cuando la muestra presenta una cantidad de sustancias orgánicas muy pequeña o en suspensión, se adicionan 5 ml de ácido clorhídrico por cada 100 ml de muestra. Se calienta y se ebulle durante 10 minutos.

c. Reactivos

- Solución de nitrato de paladio (A).
- Solución de nitrato de paladio (B).
- Ácido nítrico (1+1)
- Solución estándar de Pb (40 ppb)
- Ácido clorhídrico concentrado.
- Agua bidestilada.

d. Equipo

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica con horno de grafito.
- Hot plate.
- Cristalería de laboratorio en general.

e. Procedimiento

1. Utilizar la muestra tratada directamente para la medición o diluir la muestra tratada con ácido clorhídrico (1 + 50), de tal manera que su concentración este dentro del intervalo de cuantificación.
2. Llevar un blanco de reactivos utilizando agua bidestilada en igual cantidad que la muestra y llevar a cabo el mismo procedimiento. El valor obtenido del blanco será utilizado para la corrección del valor obtenido en la medición de la muestra.
3. Para la curva de calibración preparar estándares de 1.00, 5.00, 10.00 y 20.00 ppb de Pb partiendo de la solución estándar de Pb (40 ppb), utilizando frascos volumétricos de 10 ml, luego adicionar ácido clorhídrico de manera de obtener similares condiciones como en la muestra. Llevar a volumen con agua bidestilada.

f. Medición

1. Encender el equipo e introducir los parámetros necesarios para la determinación de plomo:
 - Longitud de onda: 283.3 nm.
 - Estándares a utilizar: 1.00, 5.00, 10.00 y 20.00 ppb de Pb
 - Corriente de lámpara: 10 mA
 - Slit: 0.2 nm
 - Modo de corrección; BGC-D2
 - Número de repeticiones por cada lectura.
2. Dejar que el equipo se estabilice durante 15 minutos.
3. Aspirar el blanco preparado, este se utilizó para corregir cualquier interferencia producida por los reactivos.
4. Aspirar los estándares en el equipo para realizar la curva de calibración.
5. Aspirar la muestra.
6. Anotar la lectura de la muestra obtenida directamente del equipo; si se realizó alguna dilución de la muestra multiplicar por el factor de dilución para obtener el resultado.
7. Corregir el resultado con el blanco si es necesario.
8. Aspirar agua destilada para limpiar el equipo y apagar.
9. El resultado esta expresado en mg/l de plomo.

g. Preparación de reactivos, estándares y muestras para plomo

- Procedimiento para preparación de reactivos:
 1. Solución de nitrato de paladio (A): Se pesó 0.108 g de $\text{Pd}(\text{NO}_2)_3$ y se disolvió con 10 ml de HNO_3 (1+1) y llevar a volumen de 500 ml.
 2. Solución de nitrato de paladio (B): Se transfieren 20 ml de la solución anterior y llevar a 200 ml con agua bidestilada.
 3. Ácido nítrico (1+1): Mezclar HNO_3 en igual volumen de agua bidestilada.

- Preparación de solución stock de 40 ppb:
 1. De la solución comercial de 1000 ppb de plomo se toma 10 ml y se deposita en un balón de 250 ml, se agregan 12.5 ml de HCl concentrado y se afora con agua bidestilada. A partir de la solución stock se preparan los estándares siguientes:

- Procedimiento para preparación de estándares:
 1. Estándar de 1.0 ppb, del estándar de 40 ppb se toma 0.25 ml y se depositan en un balón de 10 ml, se agregan 5 ml de HNO_3 (1+1) y 1 ml de $\text{Pd}(\text{NO}_2)_3$ se afora con agua bidestilada.
 2. Estándar de 5.0 ppb, del estándar de 40 ppb se toma 1.25 ml y se depositan en un balón de 10 ml, se agregan 5 ml de HNO_3 (1+1) y 1 ml de $\text{Pd}(\text{NO}_2)_3$ se afora con agua bidestilada.
 3. Estándar de 10.0 ppb, del estándar de 40 ppb se toma 2.5 ml y se depositan en un balón de 10 ml, se agregan 5 ml de HNO_3 (1+1) y 1 ml de $\text{Pd}(\text{NO}_2)_3$ se afora con agua bidestilada.
 4. Estándar de 20.0 ppb, del estándar de 40 ppb se toma 5.0 ml y se depositan en un balón de 10 ml, se agregan 5 ml de HNO_3 (1+1) y 1 ml de $\text{Pd}(\text{NO}_2)_3$ se afora con agua bidestilada.

- Procedimiento para preparación de muestras:
 1. De la muestra tratada (50 ml) se toman 4 ml y se depositan en un balón de 10 ml, se agregan 5 ml de HNO_3 (1+1) y 1 ml de $\text{Pd}(\text{NO}_2)_3$ se afora con agua bidestilada.



a. Pesado de las dosis de harina de semilla de *Moringa oleífera*
Lam. 0.25, 0.50 y 1.00 g



b. Adición de harina a cada muestra de agua



c. Agitación de las muestras de agua con harina



d. Reposo de los tratamientos 1,2 y 3 horas



e. Filtración de las muestras de agua con harina



f. Agua filtrada para digerir

Figura A- 8. Preparación de los tratamientos



a. Se miden 50 ml de agua filtrada con balón y se ponen en beaker



b. Se agrega 2.5 ml de HCl concentrado con bureta



c. Las muestras tratadas se ponen a ebulir por 10 minutos y después se dejan enfriar



d. Aforado de muestras de agua digeridas



e. Conservación de las muestras de agua digeridas

Figura A- 9. Digestión de las muestras



a. Análisis de las muestras de aguas tratadas por espectrofotometría de absorción atómica



b. Espectrofotómetro de absorción atómica (modelo AA-7000, marca Shimadzu)

Figura A- 10. Análisis de laboratorio

A- 11. Cálculo de rendimiento de harina de la semilla de *Moringa oleífera* Lam.

$$\text{Rendimiento de harina (\%)} = \frac{\text{Peso de harina (g)}}{\text{Peso de semillas secas (g)}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento de harina (\%)} = \frac{627.37 \text{ g}}{812.38 \text{ g}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento de harina (\%)} = 77.23 \%$$

Cuadro A- 12. Datos obtenidos en los tratamientos (Variable Independiente)

Arsénico						
Lectura inicial [] ppm	Tratamiento	Dosis (g)	Horas (H)	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1.025	1	0.25	1	0.400	0.400	0.400
	2		2	0.350	0.400	0.400
	3		3	0.250	0.300	0.300
	4	0.50	1	0.350	0.350	0.350
	5		2	0.300	0.350	0.350
	6		3	0.250	0.150	0.200
	7	1.00	1	0.150	0.200	0.200
	8		2	0.200	0.200	0.200
	9		3	0.200	0.200	0.200
Plomo						
Lectura inicial [] ppm	Tratamiento	Dosis (g)	Horas (H)	Replica 1	Replica 2	Replica 3
0.9676	1	0.25	1	0.013	0.012	0.019
	2		2	0.011	0.011	0.013
	3		3	0.010	0.010	0.012
	4	0.50	1	0.010	0.011	0.009
	5		2	0.007	0.007	0.006
	6		3	0.001	0.001	0.001
	7	1.00	1	0.006	0.007	0.006
	8		2	0.001	0.001	0.001
	9		3	0.001	0.001	0.001

Cuadro A- 13. Resumen de remoción porcentual en arsénico

ARSENICO			Replica 1			Replica 2			Replica 3		
Dosis (g)	Tiempo (H)	Conc. inicial mg/l	Conc. Final mg/l	Remoción total	Porc. de remoción %	Conc. Final mg/l	Remoción total	Porc. de remoción %	Conc. Final mg/l	Remoción total	Porc. de remoción %
0.25	1	1.025	0.400	0.625	60.98	0.400	0.625	60.98	0.400	0.625	60.98
0.25	2	1.025	0.350	0.675	65.85	0.400	0.625	60.98	0.400	0.625	60.98
0.25	3	1.025	0.250	0.775	75.61	0.300	0.725	70.73	0.300	0.725	70.73
0.50	1	1.025	0.350	0.675	65.85	0.350	0.675	65.85	0.350	0.675	65.85
0.50	2	1.025	0.300	0.725	70.73	0.350	0.675	65.85	0.350	0.675	65.85
0.50	3	1.025	0.250	0.775	75.61	0.150	0.875	85.37	0.200	0.825	80.49
1.00	1	1.025	0.150	0.875	85.37	0.200	0.825	80.49	0.200	0.825	80.49
1.00	2	1.025	0.200	0.825	80.49	0.200	0.825	80.49	0.200	0.825	80.49
1.00	3	1.025	0.200	0.825	80.49	0.200	0.825	80.49	0.200	0.825	80.49

Cuadro A- 14. Resumen de remoción porcentual en plomo

PLOMO			Replica 1			Replica 2			Replica 3		
Dosis (g)	Tiempo (H)	Conc. inicial mg/l	Conc. Final mg/l	Remoción total	Porc. de remoción %	Conc. Final mg/l	Remoción total	Porc. de remoción %	Conc. Final mg/l	Remoción total	Porc. de remoción %
0.25	1	0.9676	0.013	0.955	98.66	0.012	0.956	98.76	0.019	0.949	98.04
0.25	2	0.9676	0.011	0.957	98.86	0.011	0.957	98.86	0.013	0.955	98.66
0.25	3	0.9676	0.010	0.958	98.97	0.010	0.958	98.97	0.012	0.956	98.76
0.50	1	0.9676	0.010	0.958	98.97	0.011	0.957	98.86	0.009	0.959	99.07
0.50	2	0.9676	0.007	0.961	99.28	0.007	0.961	99.28	0.006	0.962	99.38
0.50	3	0.9676	0.001	0.967	99.90	0.001	0.967	99.90	0.001	0.967	99.90
1.00	1	0.9676	0.006	0.962	99.38	0.007	0.961	99.28	0.006	0.962	99.38
1.00	2	0.9676	0.001	0.967	99.90	0.001	0.967	99.90	0.001	0.967	99.90
1.00	3	0.9676	0.001	0.967	99.90	0.001	0.967	99.90	0.001	0.967	99.90

Cuadro A- 15. Resumen del promedio porcentual de remoción final de arsénico

Dosis (g)	Tiempo (H)	n	Porcentaje de remoción promedio (%)
0.25	1	3	60.98
	2		62.60
	3		72.36
0.50	1		65.85
	2		67.48
	3		80.49
1.00	1		82.11
	2		80.49
	3		80.49

Cuadro A- 16. Resumen del promedio porcentual de remoción final de plomo

Dosis (g)	Tiempo (H)	n	Porcentaje de remoción promedio (%)
0.25	1	3	98.48
	2		98.79
	3		98.90
0.50	1		98.97
	2		99.31
	3		99.90
1.00	1		99.35
	2		99.90
	3		99.90

Cuadro A- 17. Efecto Dosis-Tiempo en la remoción de arsénico

Dosis (g)	Tiempo (H)	n	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
0.25	1.00	3	0.625	0.000	0.625	0.625
	2.00	3	0.642	0.029	0.625	0.675
	3.00	3	0.742	0.029	0.725	0.775
0.50	1.00	3	0.675	0.000	0.675	0.675
	2.00	3	0.692	0.029	0.675	0.725
	3.00	3	0.825	0.050	0.775	0.875
1.00	1.00	3	0.842	0.029	0.825	0.875
	2.00	3	0.825	0.000	0.825	0.825
	3.00	3	0.825	0.000	0.825	0.825

Cuadro A- 18. Análisis de varianza no paramétrica para dosis de Pb

Variable	Dosis (g)	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Remoción final	0.25	9	0.96	0.0046	0.96	12.41	0.0014
	0.50	9	0.96	0.0040	0.96		
	1.00	9	0.96	0.0027	0.97		

Cuadro A- 19. Análisis de varianza no paramétrica para tiempo de Pb

Variable	Tiempo (H)	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Remoción final	1.00	9	0.96	0.01	0.96	3.03	0.2006
	2.00	9	0.96	0.0047	0.96		
	3.00	9	0.96	0.0049	0.97		

Cuadro A- 20. Efecto dosis-tiempo en la remoción de Plomo

Dosis (g)	Tiempo (H)	n	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
0.25	1	3	0.957	0.009	0.949	0.967
	2	3	0.956	0.001	0.955	0.957
	3	3	0.957	0.001	0.956	0.958
0.50	1	3	0.958	0.001	0.957	0.959
	2	3	0.961	0.001	0.961	0.962
	3	3	0.967	0.000	0.967	0.967
1.00	1	3	0.961	0.001	0.961	0.962
	2	3	0.967	0.000	0.967	0.967
	3	3	0.967	0.000	0.967	0.967