

**Universidad de El Salvador
Facultad de Ciencias Agronómicas
Escuela de Posgrado y Educación Continua**

Programa de Posgrado en Agronomía Tropical Sostenible



**Evaluación de dos tecnologías artesanales para la remoción de
plomo y arsénico en agua para consumo humano**

Lic. Freddy Alexander Carranza Estrada

TESIS

**Presentada como requisito parcial para obtener el Grado de:
Maestro
en Gestión Integral del Agua**

San Salvador, El Salvador, Centro América, 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL:

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

DECANO:

ING. M. Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO:

ING. M. Sc. LUIS FERNANDO CASTANEDA ROMERO

Esta Tesis fue realizada bajo la dirección del Tribunal Evaluador de Tesis indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

Maestro

en Gestión Integral del Agua

San Salvador, El Salvador, Centro América, 2015

Tribunal Evaluador de Tesis

Ing. M. Sc. Efraín Antonio Rodríguez Urrutia
Asesor de Tesis y Presidente del Tribunal Evaluador de Tesis

Lic. M. Sc. María Elisa Vivar de Figueroa
Secretaria y Miembro del Tribunal Evaluador de Tesis

Lic. M. Sc. Cecilia Gallardo de Velázquez
Vocal y Miembro del Tribunal Evaluador de Tesis

Ing. M. Sc. Efraín Antonio Rodríguez Urrutia
Director de la Escuela de Posgrado y Educación Continua

Dedicatoria

A Dios Todo Poderoso, por brindarme salud y sabiduría durante el desarrollo de mis estudios y permitirme obtener este triunfo.

A mis padres, por apoyarme y darme ánimos en aquellos momentos difíciles, por haberme enseñado la importancia de estudiar y superarse en la vida.

A mi Esposa Caty de Carranza, por su amor, paciencia, comprensión y sacrificio realizado en el transcurso de este proyecto.

A mis hijas Daniela y Andrea Carranza, quienes son el motivo para superarme día con día y alcanzar las metas propuestas. Por estar allí siempre y brindarme una sonrisa para alegrarme el día.

A mis Hermanas y Hermano, por todo el apoyo que me brindaron.

Agradecimientos

A los miembros del tribunal evaluador de tesis Lic. M. Sc. María Elisa Vivar de Figueroa, Lic. M. Sc. Cecilia Gallardo de Velázquez e Ing. M. Sc. Efraín Antonio Rodríguez Urrutia, por su apoyo, tiempo y orientación en las diferentes áreas técnicas de la investigación y sugerencias realizadas durante el desarrollo de la misma.

A mis amigos del Departamento de Química Agrícola: Norbis, Flor, Milton y Lorena, por su colaboración en el desarrollo de la investigación y especialmente por darme ánimos en los momentos difíciles.

A la Escuela de Posgrado y Educación Continua de la Facultad de Ciencias Agronómicas, por brindarme la oportunidad de haber realizado esta Maestría, en especial al Ing. M. Sc. Efraín Rodríguez, que siempre me apoyo en todas las gestiones necesarias durante el desarrollo de esta investigación y por animarme a seguir siempre adelante.

A la Facultad de Ciencias Agronómicas y a la Universidad de El Salvador, por el apoyo y el financiamiento para la realización de mis estudios.

A mi amiga Lorena de Torres, que siempre me brinda su apoyo, amistad y tiempo. Por darme fuerza y acompañarme durante la realización de esta maestría.

Índice

	Página
Resumen	11
I. Introducción	13
II. Planteamiento del Problema.....	15
III. Objetivos	17
3.1 Objetivo general	17
3.2 Objetivos específicos.....	17
IV. Hipótesis.....	17
V. Marco Teórico Conceptual.....	18
5.1 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)	18
5.2 Calidad del agua	18
5.2.1 Calidad bacteriológica del agua	19
5.2.2 Calidad química del agua: “El disolvente universal”	20
5.3 Agua potable.....	21
5.3.1 Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua Potable	21
5.4 Presencia de metales en las fuentes de agua.....	22
5.5 Origen del arsénico (As).....	23
5.5.1 Origen Natural del arsénico.....	23
5.5.2 Origen Antrópico del arsénico	24
5.5.3 Química del arsénico en el Agua.....	24
5.5.4 Origen del arsénico en agua de bebida.....	24
5.5.5 Situación del arsénico en el agua a nivel mundial	25
5.5.6 Situación del arsénico en agua El Salvador	27
5.5.7 Enfermedades causadas por arsénico	28
5.5.8 Límites Máximos permitidos para arsénico en agua potable	29
5.6 Origen del plomo (Pb).....	29
5.6.1 Origen Natural del plomo.....	30
5.6.2 Origen Antrópico del plomo	30
5.6.3 Química del plomo en el agua.....	31
5.6.4 Situación del plomo en el agua en El Salvador.....	32
5.6.5 Enfermedades causadas por plomo	32
5.6.6 Límites Máximos permitidos para plomo en el agua potable	34

5.7	Metodologías utilizadas para la remoción de metales pesados	34
5.7.1	Intercambio iónico.....	34
5.7.2	Osmosis Inversa	36
5.7.3	Electrodeposición	36
5.7.4	Coagulación - Floculación	37
5.7.5	Alcalinización.....	40
5.8	Métodos utilizados para la remoción de arsénico (As)	41
5.9	Métodos utilizados para remoción de arsénico a nivel casero	42
5.9.1	Oxidación	42
5.9.2	Adsorción y Co-precipitación	42
5.9.3	Unidad de tratamiento con dos cubetas.....	43
5.9.4	Virutas de Hierro.....	43
5.9.5	Remoción de arsénico asistida por luz solar (RAOS).....	44
5.9.6	Bio-filtro de Arena Modificado.....	46
5.10	Métodos utilizados para la remoción de plomo.....	48
VI.	Metodología	50
6.1	Elaboración de tecnologías.....	50
6.1.1	Unidad de tratamiento con dos cubetas.....	50
6.1.2	Remoción asistida por luz solar (RAOS).....	54
6.2	Preparación de muestras	56
6.3	Evaluación de la fuente de Hierro trivalente	57
6.4	Evaluación de las tecnologías.....	59
6.4.1	Unidad de tratamiento con dos cubetas.....	59
6.4.2	Método de remoción asistida por luz solar (RAOS)	60
6.4.3	Tratamiento de los residuos.....	61
6.4.4	Porcentaje de remoción	62
6.5	Metodología de análisis de laboratorio	62
-	Análisis de plomo.....	62
-	Análisis de arsénico.....	63
-	Análisis de Hierro.....	63
6.6	Procesamiento de datos	63
VII.	Análisis de Resultados	67
7.1	Evaluación de la fuente de hierro trivalente.....	67
7.2	Evaluación de Tecnologías para la Remoción de plomo.	72

7.2.1 Método de remoción asistida por luz solar (RAOS).....	72
7.2.2 Unidad de tratamiento con dos cubetas.	74
7.3 Evaluación de Tecnologías para la Remoción de Arsénico.	76
7.3.1 Método de remoción asistida por luz solar (RAOS)	76
7.3.2 Unidad de tratamiento con dos cubetas.	78
7.4 Análisis estadístico	79
- Análisis estadísticos para plomo	82
- Análisis estadísticos para arsénico	82
7.5 Determinación de costos de fabricación y de operación.	83
VIII. Conclusiones	86
IX. Recomendaciones.....	88
X. Bibliografía	89
XI. Anexos	95

Índice de Cuadros

	Página
Cuadro 1. Valores para sustancias químicas de tipo inorgánico de alto riesgo para la salud.....	22
Cuadro 2. Límites máximos permitidos para arsénico en Agua potable.....	29
Cuadro 3. Límites máximos permitidos para plomo en Agua potable.....	34
Cuadro 4. Resultados obtenidos utilizando 5 g de clavos y 100 ml de agua destilada.....	67
Cuadro 5. Resultados obtenidos utilizando 10 g de clavos y 100 ml de agua destilada.....	70
Cuadro 6. Determinación de la cantidad de coagulante para remover Pb, método RAOS	72
Cuadro 7. Evaluación de la fiabilidad del método RAOS en la remoción de Pb	73
Cuadro 8. Determinación de la cantidad de coagulante para remover Pb por método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas	74
Cuadro 9. Evaluación de la fiabilidad del método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas en la remoción de Pb	75
Cuadro 10. Determinación de la cantidad de coagulante para remover As, método RAOS	76
Cuadro 11. Evaluación de la fiabilidad del método RAOS en la remoción de As.....	77
Cuadro 12. Determinación de la cantidad de coagulante para remover As por método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas	78
Cuadro 13. Evaluación de la fiabilidad del método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas en la remoción de As.....	79
Cuadro 14. Resultados de % de remoción obtenidos por ambas metodologías	80
Cuadro 15. Resultados en ppm remanente obtenidos por ambas metodologías.....	81
Cuadro 16. Materiales utilizados para el método RAOS.....	83
Cuadro 17. Materiales utilizados en la operación del método RAOS	84
Cuadro 18. Materiales utilizados para elaborar la Unidad de tratamiento con dos cubetas	84
Cuadro 19. Materiales utilizados en la operación de la Unidad de tratamiento con dos cubetas.....	85

Índice de Figuras

	Página
Figura 1 Lugares con concentración elevada de arsénico en el agua.	26
Figura 2. Matriz de un lecho de intercambio iónico.....	35
Figura 3. Proceso de osmosis inversa.	36
Figura 4. Proceso de electrodeposición.	37
Figura 5. Proceso de coagulación – floculación.	38
Figura 6. Remoción Asistida por Luz Solar (RAOS).....	46
Figura 7. Sistema Bio-filtro de Arena Modificado.....	47
Figura 8. Ubicación de la Universidad de El Salvador.....	50
Figura 9. Materiales utilizados para la elaboración del método con dos cubetas.....	51
Figura 10. Unidad de tratamiento con dos cubetas.....	53
Figura 11. Materiales utilizados para la elaboración del método RAOS.	54
Figura 12. Filtro para el método de la RAOS.....	55
Figura 13. Curva de distribución normal para dos colas	64
Figura 14. Curva de distribución normal para una cola	66
Figura 15. Formación de hidróxido de hierro III en el tiempo	68
Figura 16. Relación entre la cantidad de Fe y la cantidad de plomo remanente.	69
Figura 17. Comparación entre ppm de Fe y la relación cantidad de clavos en agua.....	70
Figura 18. Relación entre cantidad de Fe y cantidad de plomo remanente.	71
Figura 19. Ubicación de la t calculada en la curva de distribución normal.....	81
Figura 20. Ubicación de t calculada para resultados de plomo	82
Figura 21. Ubicación de t calculada para resultados de arsénico.	83

Índice de Anexos

	Página
Anexo 1. Elaboración de Unidad de tratamiento con dos cubetas	95
Anexo 2. Preparación de la arena de río	96
Anexo 3. Elaboración de la unidad de filtración	97
Anexo 4. Elaboración de embudo para filtración	98
Anexo 5. Determinación de plomo en agua. Método: 09717. Test con reactivos ref. Merck	98
Anexo 6. Determinación de arsénico por método colorimétrico Merck ref. 1.17927.0001.....	101
Anexo 7. Determinación de hierro en agua por espectrofotometría de absorción atómica	103
Anexo 8. Formación del hidróxido de férrico	106
Anexo 9. Cantidad de lejía y gotas de limón (Agentes oxidantes).....	107
Anexo 10. Ejemplo de cálculo del porcentaje de remoción	109
Anexo 11. Cuadro de resultados de herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel	110

Resumen

Carranza Estrada, FA. 2013. Evaluación de dos tecnologías artesanales para la remoción de plomo y arsénico en agua para consumo humano. Tesis M. Sc. San Salvador, El Salvador, Universidad de El Salvador. 111 p.

En esta investigación se evaluaron dos tecnologías artesanales para la remoción de plomo y arsénico en agua para consumo humano: la unidad de tratamiento con dos cubetas y el método de remoción asistido por luz solar (RAOS). Ambas metodologías basadas en la propiedad coaguladora del hidróxido de hierro III, el cual por adsorción-floculación retiene las partículas del arsénico y plomo presentes en el agua a tratar.

Para la formación del coagulante se utilizaron clavos de hierro de una pulgada, los cuales se pusieron en contacto con agua destilada a diferentes periodos de tiempo.

Las muestras utilizadas fueron preparadas y tratadas en el laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, la concentración aproximada de las muestras fue de 1 ppm para cada elemento.

Los resultados obtenidos en la remoción de plomo fueron: por el método RAOS el porcentaje de remoción fue de 99.98% y para la Unidad de tratamiento con dos cubetas fue del 99.92%

Para el caso del arsénico el porcentaje de remoción por el método RAOS es del 81.5% y para la Unidad de tratamiento con dos cubetas fue de 83.5%.

Con ambos métodos se redujo el plomo por debajo del límite establecido por la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua potable NSO 13.07.01:08. Para el caso del arsénico no se logró cumplir con dicha normativa

Palabras claves: contaminación, agua, metales pesados, tecnologías de remoción, fabricación casera, coagulación-floculación, arsénico y plomo.

Abstract

Carranza Estrada, FA. 2013. Evaluation of two craft technologies for the removal of lead and arsenic in water for human consumption. MSc Thesis. San Salvador, El Salvador, University of El Salvador. 111p.

In this research two craft technologies were evaluated for the removal of lead and arsenic in water for human consumption: the treatment unit with two buckets and the removal method assisted by sunlight (RAOS in Spanish). Both methodologies are based on the coagulating property of iron hydroxide III, which by adsorption-flocculation retains particles of arsenic and lead present in the water to be treated.

For the formation of the coagulant one-inch iron nails were used, which were in contact with distilled water at different periods of time.

The samples were prepared and treated in the laboratory of Agricultural Chemistry at the School of Agricultural Sciences of the University of El Salvador; the approximate concentration of the samples was 1 ppm for each element.

The results obtained in the lead-removal were: by the RAOS method the removal percentage was 99.98 % and for the treatment unit with two buckets was 99.92 per cent.

In the case of the arsenic-removal percentage by the RAOS method is 81.5 % and for treatment unit with two buckets was of 83.5 %.

With both of these methods the lead was reduced below the limit set by the Salvadorian Required Standard for drinking water NSO 13.07.01:08. Such standard was not accomplished in the case of the arsenic

Key Words: pollution, water, heavy metals, removal technologies, homemade, coagulation-flocculation, arsenic and lead.

I. Introducción

Los metales pesados son de gran interés debido a que la presencia de estos en el ambiente tiene efectos negativos sobre la salud de las personas, animales y de los cultivos. Estos provienen de diversas fuentes, las más importantes son: el suelo contaminado, las aguas y lodos residuales, industria, botaderos de basura mal manejados, fertilizantes químicos y plaguicidas empleados en agricultura; aunado a esto, en nuestro país se presenta una alta actividad volcánica por lo que metales como el plomo y el arsénico, entre otros, se encuentran comúnmente en algunos mantos acuíferos y en nuestros ríos.

Los metales pesados ejercen efectos biológicos que pueden ser beneficiosos o perjudiciales para los distintos organismos. No son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos causando numerosas enfermedades y trastornos, razón por la cual han sido catalogados como una clase emergente de cancerígenos humanos (Farajzadeh y Monji 2004).

Por otro lado, metales como el plomo fueron utilizados como materia prima para la fabricación de tuberías utilizadas en fontanería, por lo que infraestructuras construidas antes de 1980 poseen este tipo de material, lo cual constituye una fuente más de contaminación del agua para el consumo humano.

El incremento en la concentración de los metales pesados en el agua puede causar un efecto tóxico a quien la consume, la gravedad de este dependerá de la naturaleza, cantidad y forma química de los metales, de la concentración de estos en el agua y de la resistencia del organismo.

La remoción de metales pesados del agua para consumo humano por medio de procesos como el intercambio iónico (resinas) y la adsorción (carbón activado), son alternativas eficientes, sin embargo, la utilización de estos materiales convencionales puede resultar restrictiva en muchas situaciones debido a los altos costos asociados a su adquisición, implementación y operación. Es por esta razón que durante las últimas décadas diversas investigaciones se han centrado en la búsqueda de adsorbentes no convencionales de bajo costo, tanto de origen

industrial como agrícola, que permitan reemplazar el carbón activado y las resinas de intercambio en el tratamiento de aguas (Koby et al. 2005).

En este documento se describen los métodos convencionales utilizados para la remoción de metales pesados así como también los métodos no convencionales, siendo estos últimos los que han tomado mayor relevancia en los últimos días, ya que se pueden elaborar a nivel artesanal y su operación y mantenimiento no requiere de conocimientos especializados. Los métodos que se evaluaron en esta investigación fueron: el Método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas y el Método de reducción asistido por luz solar (RAOS), estos se basan en el proceso de coagulación-floculación utilizando como agente coagulante el hierro trivalente (hierro III), el cual es uno de los más utilizados para el tratamiento de aguas que van a ser potabilizadas, así como también en plantas de tratamiento de aguas residuales para acelerar el proceso de sedimentación de los lodos, obteniéndose buenos resultados en la remoción de metales pesados y de otras sustancias presentes en el agua.

La investigación fue desarrollada en el laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

II. Planteamiento del Problema

En El Salvador, la mayoría de las aguas de los ríos se encuentra con algún grado de contaminación, principalmente aquellos que están ubicados en las cercanías de los asentamientos urbanos y zonas industriales.

La falta de cumplimiento de políticas y leyes que protejan el recurso hídrico, conlleva a que en los ríos sean descargados todo tipo de sustancias que son nocivas y peligrosas para la salud humana y animal, entre las más importantes que podemos mencionar están los metales pesados. Este tipo de sustancias son muy peligrosas ya que son bio-acumulables, por lo que, aunque se encuentren en concentraciones bajas estas se van acumulando hasta llegar a concentraciones que son peligrosas para la mayoría de seres vivos. Esto resulta alarmante ya que el agua de los ríos es la fuente principal de abastecimiento de agua para muchos usos: consumo humano, industria, ganaderías, recreación, otras.

Elevadas concentraciones de algunos de estos elementos en el ambiente o en determinados procesos pueden desencadenar una serie de problemáticas que van desde la degradación y pérdida de la fertilidad de suelos hasta afectar los mantos acuíferos y poner en riesgo la disponibilidad de agua segura para el consumo de los seres humanos.

Elementos tales como hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), cobre (Cu) y zinc (Zn) son considerados como esenciales para el correcto crecimiento y funcionamiento de plantas, animales y humanos, mientras que elementos como mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb), y arsénico (As) no son considerados esenciales para ningún organismo (Caussy et al. 2003).

El plomo es un elemento utilizado en la actualidad para la fabricación de muchos materiales de la vida cotidiana: pinturas, esmaltes, baterías, materiales para plomería y otros. Este se encuentra distribuido en todo el planeta debido a diferentes actividades industriales. Es un elemento bio-acumulable y altamente tóxico (OPS y CEPIS 2005).

El arsénico está ampliamente distribuido en el mundo debido principalmente a que este se encuentra de forma natural. En aguas superficiales y subterráneas de América Latina, la

presencia de arsénico está asociada al vulcanismo terciario y cuaternario, procesos que aún continúan y que se muestra en flujos de lava, géiseres, fumarolas, aguas termales y fenómenos geotérmicos. El arsénico es altamente tóxico y puede causar cáncer de piel, vejiga y pulmón, por lo que el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado el arsénico y sus compuestos como cancerígenos para los seres humanos (Troposfera 2005).

Existen diferentes tecnologías convencionales para la remoción de metales pesados presentes en el agua, pero estas requieren un alto costo de inversión, operación y mantenimiento, por lo que no son accesibles para todos, es por esto que en los últimos años se está trabajando en el desarrollo de metodologías no convencionales a las cuales puedan acceder todas aquellas personas que no cuentan con los recursos necesarios para poder adquirir tecnologías de alto costo.

Una de las propuestas que resultan más viables desde el punto de vista económico y de eficiencia en la remoción de metales se encuentra el proceso de coagulación-floculación y posterior sedimentación, en el cual se utilizan sustancias coagulantes (adsorbentes) como el hierro y el aluminio para provocar la floculación de los metales pesados y por sedimentación-decantación se separa el líquido (agua) sobrenadante ya libre de metales pesados (OPS y CEPIS 2005).

En esta investigación se elaboraron dos tecnologías: la unidad de tratamiento con dos cubetas y método de remoción asistida por luz solar, con las que se realizaron pruebas para determinar qué tan eficaces son en la remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano, tratando de utilizar materiales de fácil obtención para la construcción y operación de, utilizando como base el hierro trivalente que es el agente coagulante y responsable de la adsorción de los metales involucrados.

Las evaluaciones se realizaron en el laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la Universidad de El Salvador durante el periodo de septiembre de 2013 a abril de 2014.

III. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar dos tecnologías artesanales para la remoción de plomo y arsénico en agua para consumo humano.

3.2 Objetivos específicos

- Elaborar de la unidad de tratamiento con dos cubetas y la de remoción asistida por luz solar (RAOS) para la remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano.
- Calcular la cantidad de hierro trivalente necesario para remover arsénico y plomo presentes en el agua.
- Determinar el porcentaje de remoción de plomo y arsénico que presenta el método de dos cubetas y el método RAOS.
- Comparar los resultados obtenidos en la remoción de plomo y arsénico con la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua Potable NSO 13.07.01:08.
- Determinar los costos de fabricación y operación de las dos tecnologías propuestas.

IV. Hipótesis

El Método de la unidad con dos cubetas y el Método RAOS son efectivos para la remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano.

V. Marco Teórico Conceptual

5.1 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)

Los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas son ocho que los 191 Estados miembros de las Naciones Unidas convinieron en tratar de alcanzar para 2015. La Declaración del Milenio de las Naciones Unidas firmada en septiembre de 2000, compromete a los dirigentes mundiales a luchar contra la pobreza, el hambre, las enfermedades, el analfabetismo, la degradación del medio ambiente y la discriminación contra la mujer (OMS 2013b).

Los ODM resultantes de esa Declaración tienen metas e indicadores específicos, entre los cuales se encuentra el Objetivo 7 que está relacionado con la sostenibilidad del medio ambiente y cuyas metas son:

- Incorporar los principios del desarrollo sostenible en las políticas y los programas nacionales e invertir la pérdida de recursos del medio ambiente.
- Reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de personas que carezcan de acceso sostenible a agua potable y a servicios básicos de saneamiento.
- Haber mejorado considerablemente, para el año 2020, la vida de por lo menos 100 millones de habitantes de barrios marginales (Educación Sin Fronteras 2013).

Al llevar agua de calidad a la personas se contribuye de manera directa a mejorar la salud, el bienestar y el desarrollo de los países. La gestión de la calidad del agua contribuye directa e indirectamente a alcanzar las metas establecidas en cada uno de los ocho Objetivos de Desarrollo del Milenio, por lo que es un buen indicador para evaluar el progreso en el cumplimiento de los mismos.

5.2 Calidad del agua

El agua destinada al consumo humano es la que sirve para beber, cocinar, preparar alimentos u otros usos domésticos. Cada país regula la calidad del agua destinada al consumo humano; la cual establece que no puede contener ningún tipo de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un peligro para la salud humana.

Normalmente el agua es captada de manantiales de aguas cristalinas, extraída del suelo mediante pozos profundos o extrayendo el agua de un acuífero de buena calidad. No obstante, el agua debe ser tratada para el consumo humano, y puede ser necesaria la eliminación de sustancias disueltas, sin disolver o de microorganismos perjudiciales para la salud (ANDA 2015).

5.2.1 Calidad bacteriológica del agua

En localidades donde el suministro de agua no es continuo o se extrae directamente desde las fuentes (superficial o subterránea), los pobladores lo almacenan a nivel domiciliario en recipientes de cualquier tipo con el fin de atender sus necesidades básicas de bebida, alimentación, aseo y otros. El criterio principal de selección del recipiente es su comodidad para la extracción y el transporte del agua, antes que la conservación de su calidad bacteriológica. Diversos estudios demuestran que la mayor parte de las veces, la calidad bacteriológica del agua en la fuente no es apta para bebida. Además, el constante manipuleo intradomiciliario realizado para su extracción desde los recipientes de almacenamiento, conlleva a la re-contaminación y al consiguiente deterioro de su calidad bacteriológica, aumentando de esta manera la probabilidad de que el agua se convierta en la causa del brote de algún tipo de enfermedad gastrointestinal, principalmente entre la población no atendida con servicios adecuados de disposición de excretas. Ante esta situación tan común en las áreas deprimidas, el consumo de agua de buena calidad bacteriológica, constituye una de las intervenciones más importantes para interrumpir la vía de transmisión de enfermedades gastrointestinales hacia el hombre (OMS 2004).

Aunque es evidente que la instalación de sistemas públicos de abastecimiento de agua que funcionen ininterrumpidamente y suministren agua de buena calidad bacteriológica es la alternativa más eficaz para el control de las enfermedades gastrointestinales, no es realista esperar que las poblaciones que hoy no cuentan con esos servicios, puedan tenerlos en un futuro inmediato. Otros importantes factores de riesgo, dentro de la multicausalidad de las enfermedades gastrointestinales, son los alimentos que se consumen crudos y la falta de aplicación de adecuadas prácticas de higiene.

Por las razones expuestas, los sistemas de mejoramiento de la calidad del agua en los domicilios, constituyen una alternativa para atender a las poblaciones que no cuentan con un sistema público de abastecimiento de agua. El objetivo es proveer a la población de agua de buena calidad para beber, cocinar, lavar la vajilla y para la higiene bucal, así como para desinfectar los alimentos que se consumen crudos, y de esta manera, contribuir al control de las enfermedades de origen hídrico (OMS 2004).

5.2.2 Calidad química del agua: “El disolvente universal”

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y del mundo en el que vivimos. Tiene una gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en la naturaleza. Esta influencia no sólo se debe a sus propiedades fisicoquímicas como molécula bipolar sino también a los constituyentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en ella.

Se considera que el agua es un solvente universal, debido a que es capaz de disolverlo o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso (Barrenechea 2009).

La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua, que pueden ser de origen natural o antropogénico, define su composición física y química. Por otro lado, 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 e incluso en numerosas ciudades importantes del continente. 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.

Debido a la amplia gama de contaminantes, a los diferentes niveles de contaminación, así como a la cinética química de las sustancias, elementos, materia orgánica y microorganismos que se incorporan en el cuerpo de agua, es indispensable conocer las características físicas, químicas y biológicas del agua antes de seleccionarla como fuente de agua cruda.

Desde el punto de vista de la salud humana el agua ayuda a eliminar las sustancias resultantes de los procesos bioquímicos que se desarrollan en el organismo humano a través de los órganos excretores, en especial la orina y el sudor; sin embargo, por esta misma propiedad puede transportar una serie de tóxicos al organismo que pueden afectar a diferentes órganos de manera reversible e irreversible (Barrenechea 2009)

5.3 Agua potable

Se conoce con este nombre al agua que ha sido tratada con el objetivo de hacerla apta para el consumo humano, teniendo en cuenta todos sus usos domésticos. Algunas especies biológicas y fisicoquímicas pueden afectar la aceptabilidad del agua para consumo humano, por ejemplo:

- Su apariencia estética: turbiedad, olor, color, sabor, espuma.
- Su composición química: acidez, alcalinidad, aceites y grasas, compuestos orgánicos e inorgánicos en general. Es necesario, asimismo, considerar las transformaciones químicas y bioquímicas a que están expuestos los contaminantes del ambiente acuático.

Las alteraciones químicas pueden afectar su disponibilidad biológica o tóxica (aumentarla o disminuirlas). Poco se sabe acerca de estos procesos químicos, físicos y biológicos y sus mecanismos, a pesar de que son indispensables para comprender los efectos en la salud del consumidor. Por citar un ejemplo, aún no se entiende bien la relación que existe entre la dureza del agua y las trazas metálicas, y los efectos en el organismo del consumidor, pero se sabe que estos factores pueden influir en la salud y tal vez estar relacionados con algunas enfermedades de la población en diferentes áreas geográficas (FAO 20013).

5.3.1 Norma Salvadoreña Obligatoria para 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 y microbiológicos establecidos en esta norma. Entre los valores límites para sustancias químicas de tipo inorgánico de alto riesgo para la salud se muestran en el siguiente cuadro:

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

	Parámetro	Límite Máximo Permisible (mg/l)
→	Arsénico	0.010
	Bario	0.700
	Boro	0.300
	Cadmio	0.003
	Cianuros	0.050
	Cromo	0.050
	Mercurio	0.001
	Níquel	0.020
	Nitrato	45.00
	Nitrito (medido como nitrógeno)	1.00
	Molibdeno	0.070
→	Plomo	0.010
	Selenio	0.010

Fuente: NSO 13.07.01:08.

5.4 Presencia de metales en las fuentes de agua

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, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso

Por otro lado, 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 e incluso en numerosas ciudades importantes del continente. 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. (OPS y CEPIS 2005).

Entre los contaminantes se tiene el plomo, mercurio, cadmio, cromo y arsénico, que son algunos de los metales pesados que producen las industrias de productos dentales, mineras, plaguicidas y de baterías de plomo, así como las plantas de recubrimientos electrolíticos y

recicladoras de baterías. Estos metales al ser desechados a los cuerpos de agua, son capaces de alterar la cadena de vida de varias especies.

Debido a la amplia gama de contaminantes, a los diferentes niveles de contaminación, así como a la cinética química de las sustancias que se incorporan en el cuerpo de agua, es indispensable conocer las características fisicoquímicas y biológicas del agua antes de seleccionarla como fuente de agua para las diferentes actividades y usos (Barrenechea 2009)

5.5 Origen del arsénico (As)

El arsénico es un metaloide que se encuentra en forma natural en el planeta tierra y es usado comercial e industrialmente en la elaboración de diferentes productos, tales como aditivo para preservar madera y algunos alimentos. A mayores concentraciones también es utilizado para la elaboración de plaguicidas. Las concentraciones de As en aguas naturales usualmente son menores de 10 $\mu\text{g/l}$; sin embargo, en zonas mineras pueden encontrarse concentraciones entre 0.2 y 1 g/l (OPS y CEPIS 2005).

5.5.1 Origen Natural del arsénico

El arsénico se presenta en forma natural en rocas sedimentarias y rocas volcánicas (forma el 0.00005% de la corteza terrestre) y también en aguas geotermales. En la naturaleza se presenta con mayor frecuencia en forma de sulfuro de arsénico (oropimente, As_2S_3) y arsenopirita (FeAsS), encontrándose éstos generalmente como impurezas en depósitos mineros.

Según diversos estudios realizados en Estados Unidos (acuíferos detríticos en Wisconsin), una de las fuentes naturales de arsénico en las aguas subterráneas puede tener relación con ambientes geoquímicos que requieren la presencia de pirita y arsenopirita entre sus constituyentes minerales y medios reductores. En este tipo de ambiente el arsénico inorgánico se moviliza en forma de trióxido de arsénico (As_2O_3). Una vez que las capas de pirita de los pozos subterráneos se ponen en contacto con el oxígeno y, al impulsar el agua desde el interior del pozo, se solubiliza el arsénico, las grandes presiones y temperaturas a que quedan sometidas las aguas subterráneas profundas pueden originar un medio reductor con incorporación del arsénico al agua subterránea (Miliarium 2008).

5.5.2 Origen Antrópico del arsénico

La presencia de arsénico en las aguas subterráneas también se puede explicar como resultado de la utilización a veces excesiva y sin control de productos relacionados con actividades agrícolas, la jardinería y limpieza de malezas, como son los fungicidas, insecticidas y plaguicidas en general. Muchos de ellos tienen arsénico como compuesto tóxico, porque su utilización está indicada para erradicar plagas diversas (Miliarium 2008).

5.5.3 Química del arsénico en el Agua

Numerosos estudios acerca de la movilidad del arsénico en el medio ambiente describen aspectos fundamentales de su comportamiento, distribución de especies químicas de arsénico en diversos entornos, reacciones de equilibrio fundamentales, rol de las interacciones del arsénico en interfaces sólidos-agua en la distribución y su acumulación en organismos. En el ambiente acuático las valencias más comunes del arsénico son +3 (arsenito) y +5 (arsenato) formando las especies hidrolizadas inorgánicas: ácido arsenioso (H_3AsO_3), ion dihidrógeno arsenito (H_2AsO_3^-), ion monohidrógeno arsenito (HAsO_3^{2-}) y ion arsenito (AsO_3^{3-}) (valencia +3); ácido arsénico (H_3AsO_4), ion dihidrógeno arseniato (H_2AsO_4^-), ion monohidrógeno arseniato (HAsO_4^{2-}) y ion arseniato AsO_4^{3-} (valencia +5). El arsénico también se encuentra presente en menores concentraciones en forma orgánica. Se asume que la formación de estos compuestos proviene exclusivamente de la actividad de organismos vivos.

Debido a las marcadas diferencias en el comportamiento químico de ambas formas del arsénico, es altamente recomendable conocer su distribución para un tratamiento eficiente de remoción de arsénico del agua (Barrenechea 2009).

5.5.4 Origen del arsénico en agua de bebida

En general, en América Latina la presencia de arsénico en el ambiente y específicamente en las fuentes de agua captadas para consumo humano se debe a factores naturales de origen geológico, así como a actividades antropogénicas que involucran la explotación minera y la refinación de metales por fundición, procesos electrolíticos de producción de metales de alta calidad como cadmio y cinc, y en menor proporción en la agricultura por el empleo de plaguicidas arsenicales orgánicos.

La presencia natural de arsénico en aguas superficiales y subterráneas de América Latina está asociada al volcanismo terciario y cuaternario desarrollado en la Cordillera de Los Andes, proceso que aún continúa y que se muestra en flujos de lava, géiseres, fumarolas, aguas termales y fenómenos geotérmicos relacionados con el volcanismo circumpacífico del llamado “Círculo de fuego del Pacífico”. Este volcanismo también ejerce influencia en algunas características de estas aguas como son pH alto, alcalinidad variable, baja dureza, moderada salinidad y presencia de boro, flúor, sílice y vanadio (CEPIS y OPS 2006).

Esta misma situación geológica ha condicionado la presencia de importantes yacimientos de cobre, principalmente en Chile, Perú y Bolivia, cuya explotación y posterior fundición contribuye a aumentar los ya elevados niveles de arsénico ambiental.

El arsénico en las aguas superficiales y en las aguas subterráneas proviene de la disolución de minerales, la erosión y desintegración de rocas y por deposición atmosférica. También en forma mineral, aerosoles y en el agua se puede encontrar arsénico en sus formas trivalente y pentavalente, según las condiciones del medio. Con mayor frecuencia en el agua superficial predominan las formas oxidadas y en el agua subterránea sobre todo, en las más profundas, las formas reducidas (CEPIS y OPS 2006).

5.5.5 Situación del arsénico en el agua a nivel mundial

Aunque la mayor parte de arsénico a escala mundial se encuentra en forma natural en los suelos, se ha visto incrementado por actividades antropogénicas, especialmente por la industria del cobre, plomo, zinc y la agricultura.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación (UNESCO), entregaron comunicados donde se informaba sobre la contaminación de aguas subterráneas con arsénico en Argentina, Bangladesh, México, El Salvador, Estados Unidos, China, Tailandia, Chile y otros (CEPIS y OPS 2006).



Fuente: Wordpress 2009.

Figura 1 Lugares con concentración elevada de arsénico en el agua.

En Argentina, la mayor presencia de arsénico en el agua es de origen natural, las aguas subterráneas en las áreas afectadas presentan concentraciones de arsénico variables que van de valores menores de 0.10 mg/l hasta valores mayores de 1 mg/l. La fuente de arsénico en las capas freáticas de la región central y norte del territorio argentino es de origen volcánico y en menor importancia la contaminación también puede proceder de la actividad agrícola (Benítez et al citado por (CEPIS y OPS 2006).

En México, la presencia de arsénico se debe a que está dentro del cinturón volcánico, con suelos ricos en arsénico que contaminan los mantos freáticos. Otra posible fuente de contaminación es el uso de plaguicidas órgano arsenicales empleados desde antes de 1945.

En Chile, el arsénico se encuentra presente en todos los ecosistemas de la zona norte del país debido a la predominancia del volcanismo cuaternario en la zona. En Antofagasta entre 1955 y 1970 encontraron niveles de arsénico en el agua con una media de 0.598 mg/l. Los valores actuales indican una media de 0.04 mg/l (Sancha et al. 1998).

En Bolivia, la fuente de agua más importante de La Paz antes de llegar a la planta potabilizadora recibe los escurrimientos provenientes de la zona minera de Milluni. En la zona metalúrgica urbanizada donde se localizan tres pequeñas empresas (Calbol, Hormet y Bustos), se libera al ambiente un 0.7% de arsénico. Se determinó que los suelos y el agua potable contenían este elemento, encontrándose los valores máximos en un área de recreación cercana a la fundición (ECO et al. 1997).

En Perú, la ciudad de Ilo emplea el agua proveniente de la Laguna de Aricota para el uso doméstico e industrial. Esta laguna tiene dos afluentes: el río Callazas y el río Salado que pasan por el volcán Yucamane, que al parecer es la fuente de contaminación de ésta agua. También existe exposición elevada a arsénico inorgánico en la Fundición de Minerales de La Oroya.

En Brasil se emplean alrededor de 1,500 toneladas de arsénico/año en la producción electrolítica de cinc y cadmio. Los desechos industriales y las emisiones atmosféricas de arsina son las principales fuentes de contaminación del ambiente con arsénico. Las concentraciones de arsénico en los sedimentos fueron de 0.1 y 80 mg/kg, pero se encontraron concentraciones más elevadas cerca del punto de vertimiento del agua cercana a la Ensenada Enseño (ECO et al. 1994).

5.5.6 Situación del arsénico en 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), para la que se muestrearon la mayoría de principales ríos de las Regiones Hidrográficas del país, se tomaron muestras de agua y de sedimento en un total de 114 sitios de muestreo. Los resultados de dicha investigación fueron:

- El contaminante arsénico se reporta en 62 sitios de muestreo equivalente al 55% de las muestras recolectadas. 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) (SNET 2006).

5.5.7 Enfermedades causadas por arsénico

La contaminación natural del arsénico es una causa de preocupación en muchos países como Argentina, Bangladesh, Chile, China, India, México, Tailandia e incluso en Estados Unidos, debido a sus efectos visibles tardíos, y a la mala información e incluso desconocimiento en muchos lugares, los problemas causados por el arsénico en agua potable no son muy conocidos ni están bien documentados (Lenntech s.f.).

El arsénico existe tanto en forma orgánica como inorgánica. Los compuestos de arsénico inorgánico (como los que se encuentran en el agua) son extremadamente tóxicos, en tanto que los compuestos de arsénico orgánico (como los que se encuentran en pescados y mariscos) son menos perjudiciales para la salud. Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea, seguidamente aparecen otros efectos como entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos la muerte (OMS 2013a).

Los primeros síntomas de la exposición prolongada a altos niveles de arsénico inorgánico (por ejemplo, a través del consumo de agua y alimentos contaminados) se observan generalmente en la piel e incluyen cambios de pigmentación, lesiones cutáneas, dureza y callosidades en las palmas de las manos y en las plantas de los pies (hiperqueratosis). Estos efectos se producen tras una exposición mínima de aproximadamente cinco años y pueden ser precursores de cáncer de piel. Además, la exposición prolongada al arsénico también puede causar cáncer de vejiga y de pulmón. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado el arsénico y los compuestos de arsénico como cancerígenos para los seres humanos; el arsénico presente en el agua de bebida también ha sido incluido en esa categoría por el CIIC (OMS 2013a).

Entre los demás efectos perjudiciales para la salud que se pueden asociar a la ingesta prolongada de arsénico destacan los que siguen: problemas relacionados con el desarrollo, neurotoxicidad, diabetes y enfermedades cardiovasculares. La arsenicosis es una enfermedad

crónica que resulta de beber agua con altos niveles de arsénico durante un largo periodo de tiempo (entre 5 a 20 años). También se denomina envenenamiento por arsénico.

En resumen, las consecuencias en la salud incluyen problemas de la piel, cáncer de la piel, cáncer del hígado, riñón y pulmones, problemas de los vasos sanguíneos en los pies y las piernas; otros síntomas posibles son diabetes, alta presión sanguínea y problemas reproductivos (OMS 2013a).

5.5.8 Límites Máximos permitidos para arsénico en agua potable

En el cuadro siguiente 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	Unión Europea	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos	El Salvador
	0.01	0.01	0.01	0.01

Fuente: Elaboración propia.

5.6 Origen del plomo (Pb)

El plomo es un metal de la corteza terrestre que se encuentra normalmente junto con otros metales como el zinc, la plata y el cobre. El plomo tiene muchos usos entre los que se incluyen la fabricación de pinturas, baterías y señuelos para pescar. Las soldaduras a base de plomo que se utilizaban para conectar las tuberías de cobre para el agua potable fueron prohibidas en la década de 1980; sin embargo, todavía continúan siendo una fuente de plomo en el agua para beber de muchas casas viejas. En los Estados Unidos el plomo se utilizaba en la gasolina como aditivo pero su uso fue eliminado en 1996. En México el uso de gasolina con plomo ha disminuido desde 1986 y en 1991 se introdujo la gasolina sin plomo en todo el país (Universidad de Arizona 2011).

5.6.1 Origen Natural del plomo

El plomo es un metal que se encuentra en forma natural en la corteza terrestre y que desde los primeros tiempos de la historia de la humanidad ha sido aprovechado en múltiples usos por ser muy suave, maleable, fácil de fundir y de enrollar. Aún en la actualidad, sus usos siguen siendo muy variados, lo anterior hace que el plomo intervenga en numerosas cadenas productivas y el consumo de los productos que lo contienen esté ampliamente difundido en el mundo. Es un elemento metálico blando de color gris azulado o plateado. En la corteza terrestre el plomo se presenta en una concentración de 13 mg/kg y lo hace en forma de rocas ígneas y metamórficas, o en rocas sedimentarias, las cuales tienen concentraciones de 10 a 20 mg/kg (OPS, citado por Universidad de las Américas Puebla 2008).

Este metal no abunda en la naturaleza –muchas veces se presenta con otros metales como plata y zinc–, generalmente se encuentra en forma de galena, el cual es un mineral plateado lustroso; entre otros minerales menos importantes que también contienen plomo se encuentran la cerusita (PbCO_3), anglesita (PbSO_4) y la piromorfita ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$) (Cobble 1964).

El plomo también se encuentra en el aire, agua y suelos, la presencia del plomo en estos se debe a la erosión de los suelos y a la actividad volcánica, y son lavados por efecto de la precipitación pluvial, transportada a los arroyos y posteriormente se depositan con los sedimentos en ríos, lagos y océanos.

5.6.2 Origen Antrópico del plomo

Los vehículos con motor a gasolina han sido durante años una de las principales fuentes de emisión de plomo a la atmósfera al ser utilizados derivados alquílicos de plomo (tetraetil y tetrametil plomo) como aditivos antidetonantes de la gasolina. Las actuales normativas medioambientales prohíben y limitan su utilización, disminuyendo bastante dichas emisiones con el uso generalizado de gasolinas sin plomo. Otras fuentes antropogénicas de plomo a destacar son las industrias químicas (pinturas, esmaltes, otras), industrias mineras, procesos de fundición y recuperación de metales, incineración de residuos, fangos de depuración, combustión de carbón, fabricación de baterías, fabricación de óxido de plomo, otras.

Las emisiones de Pb a la atmósfera son en forma de partículas y como compuestos gaseosos. Las emisiones gaseosas (compuestos inorgánicos) están generadas principalmente por la combustión de los aditivos alquilados del Pb, mientras que las partículas (compuestos orgánicos) provienen de todos los tipos de fuente de emisión. Además, se puede incorporar al agua potable por lixiviación desde cierto tipo de instalaciones sanitarias: cañerías de plomo o de cobre con soldadura de plomo o grifería de bronce. La mayor parte del plomo en la atmósfera se encuentra en forma de partículas finas menores de 1.0 micrómetro de diámetro. Se considera muy peligroso para el medio ambiente debido a su elevada toxicidad y a que no sufre ni degradación química ni biológica, lo que provoca que permanezca en el medio durante largos períodos de tiempo, afectando muy gravemente a las cadenas tróficas debido a la acumulación de plomo en los organismos de los seres vivos (Troposfera 2005).

5.6.3 Química del plomo en el agua

En condiciones normales el plomo no reacciona con el agua; sin embargo, cuando el plomo se pone en contacto con aire húmedo la reactividad con el agua aumenta. En la superficie del metal se forma una pequeña capa de óxido de plomo (PbO) y en presencia de oxígeno y agua, el plomo metálico se convierte en hidróxido de plomo (Pb(OH)₂):



El plomo elemental no se disuelve en agua en condiciones normales (20° C y presión de 1 bar); sin embargo, la reacción tiene lugar cuando está disuelto en agua en las formas de carbonato Plumboso (PbCO₃) o carbonato plúmbico (Pb(CO₃)₂). Un ejemplo bien conocido de compuesto de plomo soluble en agua es el azúcar de plomo (acetato de plomo) cuyo nombre deriva de su naturaleza dulce.

El plomo se une frecuentemente al azufre en forma de sulfuro (S²⁻), o al fósforo en forma de fosfato (PO₄³⁻). En estas formas el plomo es extremadamente insoluble y se presenta formando compuestos inmóviles en el medio ambiente. Los compuestos de plomo son generalmente solubles en agua blanda y levemente ácida (Lenntech 2012).

Los compuestos de plomo solubles en agua se adsorben con menor afinidad a los suelos y por lo tanto, son rápidamente transportados desde el suelo hasta los cuerpos de aguas superficiales y profundas. Por el contrario, los compuestos menos solubles se podrán encontrar en suelos, sedimentos y en partículas en suspensión de cuerpos de agua. Otro factor que afecta la solubilidad del plomo es el pH del agua, a un pH mayor a 5.4 la solubilidad del plomo es aproximadamente de 30 µg/l en agua dura (alto contenido de sales disueltas) y de 500 µg/l en agua blanda (con bajo contenido de sales disueltas). En general el contenido de plomo disuelto en agua es bajo debido a que este metal forma complejos de baja solubilidad con aniones como los hidróxidos, carbonatos, sulfatos y fosfatos. Se han encontrado valores hasta de 27:1 para la relación plomo en sólidos suspendidos: plomo disuelto en agua (CEPIS y OPS 1999).

5.6.4 Situación del plomo en el agua en El Salvador

Según un estudio realizado por el 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), para la que se muestrearon la mayoría de principales ríos de las Regiones Hidrográficas del país, 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. El valor más alto fue de 0.667 ppm (río Acahuapa).
- El 100% de las muestras de sedimentos presentan plomo, la concentración mayor encontrada es 103.04 ppm (río Acelhuate).

5.6.5 Enfermedades causadas por plomo

Independientemente de la vía de ingreso del plomo al organismo, el plomo circula por la sangre depositándose inicialmente en tejidos blandos, en los huesos (94%) y en otros tejidos (6%), incluido el cerebro, así como también en los glóbulos rojos. La exposición humana al plomo por períodos prolongados mayores o iguales a un año tiene incidencia en la salud de las personas, pudiendo producir efectos crónicos. Existe evidencia de que la cantidad de plomo en el organismo se relaciona con los niveles de concentración de plomo en el ambiente y,

también, de que los efectos en salud se relacionan con la carga corporal de plomo y que la manera más utilizada para medir ésta es determinando el nivel de plomo presente en la sangre.

Los efectos tóxicos del plomo se manifiestan principalmente en el sistema nervioso central, pero prácticamente todos los sistemas pueden ser dañados si se exponen a altas dosis. Los lactantes son particularmente susceptibles a la toxicidad plúmbica, debido a su sistema nervioso en desarrollo, menor masa corporal, mayor capacidad de absorción intestinal y menor tasa de eliminación. Recientes estudios internacionales han revelado diversos efectos del plomo en niños y niñas pequeños: efectos neurológicos (hiperactividad, trastornos de la atención), psicológicos (trastornos conductuales), hematológicos (anemia), metabólicos y cardiovasculares. Durante el período de gestación el plomo se acumula en los tejidos fetales, lo que podría producir en una exposición intrauterina temprana un retardo del crecimiento intrauterino, bajo peso del niño o niña al nacer y una interferencia en el desarrollo físico y mental durante el primer año de vida (Troposfera 2005).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha establecido que los niveles mínimos de plomo en la sangre a los cuales se observa un efecto sobre la salud de las personas son de 15-20 mg/dl en adultos y 10 µg/dl en niños y niñas.

Los efectos del plomo inhalado en salud dependen entre otros del tamaño de las partículas. Una alta proporción de partículas pequeñas inhaladas (menor a 2.5 micrómetros) se deposita en la parte más profunda del sistema respiratorio, alvéolos, desde donde el plomo se difunde casi en un 100% al torrente sanguíneo. Las partículas en un rango de tamaño de 2.5 a 10 micrómetros (µm) se depositan preferentemente en la región traqueobronquial y nasofaríngea, desde donde se elevan y se tragan y que la absorción del plomo por el tracto gastrointestinal es menos eficiente en los adultos (8 a 10%), pero puede llegar hasta un 50% en los niños y niñas. En áreas urbanas la mayoría de partículas de plomo tienen un tamaño que varía entre 0.25 a 1.4 µm, pero en áreas cercanas a determinados tipos específicos de fuentes tales como acopios de minerales que contienen plomo podrían presentarse partículas de plomo con un tamaño incluso superior a 10 µm (Troposfera 2005).

En la vegetación el plomo se acumula principalmente en las hojas por deposición atmosférica y depende de la distancia de las plantas a la fuente de emisión. El plomo presente en la hoja rompe la cutícula y pasa al interior de la misma, se acumula en las vesículas y puede originar efectos como:

- Inhibición de la mitosis y por tanto del crecimiento de la planta.
- Inhibición de la síntesis del ATP y del rendimiento energético.
- Disminución de la viabilidad de las semillas (Troposfera 2005).

5.6.6 Límites Máximos permitidos para plomo en el agua potable

En el cuadro siguiente 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	Unión Europea	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos	El Salvador
	0.01	0.05	0.015	0.01

Fuente: Elaboración propia.

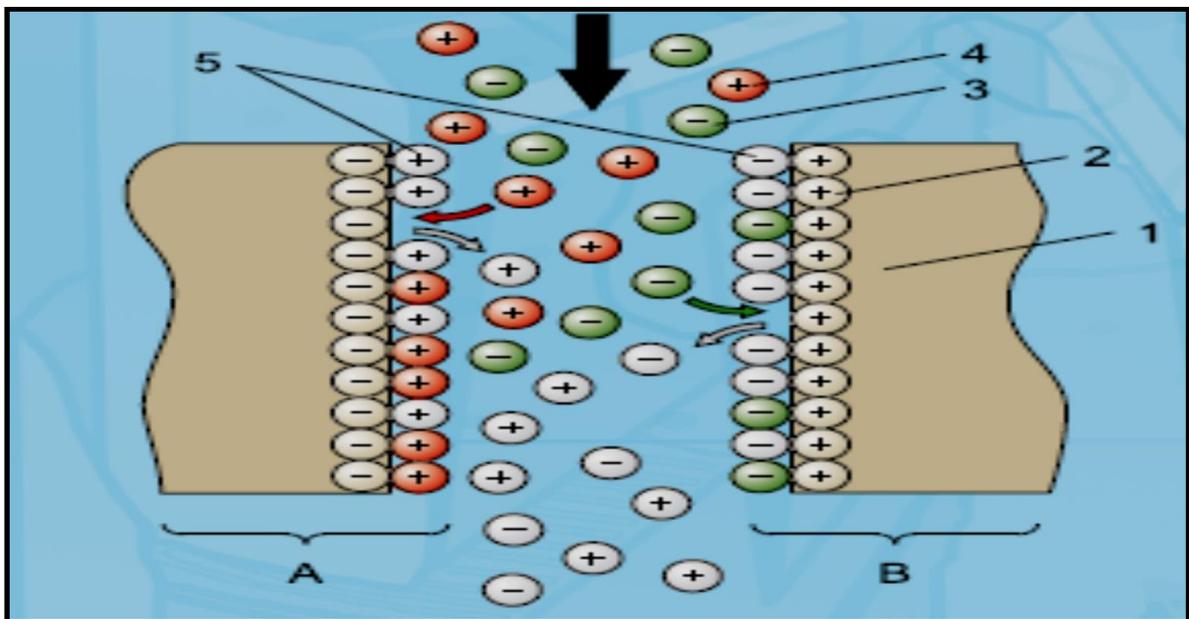
5.7 Metodologías utilizadas para la remoción de metales pesados

Los métodos convencionales para remover metales pesados provenientes de efluentes industriales como precipitación, oxidación y reducción química, intercambio iónico, osmosis inversa, separación por membranas, tratamiento electroquímico y evaporación, son frecuentemente inefectivos y costosos cuando son aplicados en efluentes diluidos con concentraciones de metales pesados menores a 100 mg/l. Entre las más utilizadas se encuentran:

5.7.1 Intercambio iónico

Un intercambiador iónico consta de una matriz con iones ligandos fijos y contra iones inversamente cargados. Éstos son reemplazados por los iones que se deben eliminar del agua. Este se basa en que los iones se ligan a un intercambiador iónico con tanta mayor fuerza

cuanta más alta es su valencia (carga). Según esto, los iones divalentes pueden intercambiarse con contra iones monovalentes. Estos sólo pueden intercambiar una cantidad determinada de iones. Una vez agotada su capacidad de intercambio se procede a su regeneración, para esto se aprovecha el hecho de que este método convencional no depende sólo de la carga de los iones implicados sino también de su concentración. Esto permite que un gran número de iones de carga menor puedan desplazar a un pequeño número de iones de carga más alta. Mediante la regeneración los contra-iones originales se retornan al intercambiador iónico agotado en concentración elevada. En el caso de intercambiadores catiónicos, esto se realiza con ácidos, y en los intercambiadores aniónicos con álcalis (Purepro 2008).



Fuente: Purepro 2008.

Figura 2. Matriz de un lecho de intercambio iónico.

En donde:

A: intercambiador catiónico.

B: intercambiador aniónico.

1: matriz.

2: iones ligados fijos.

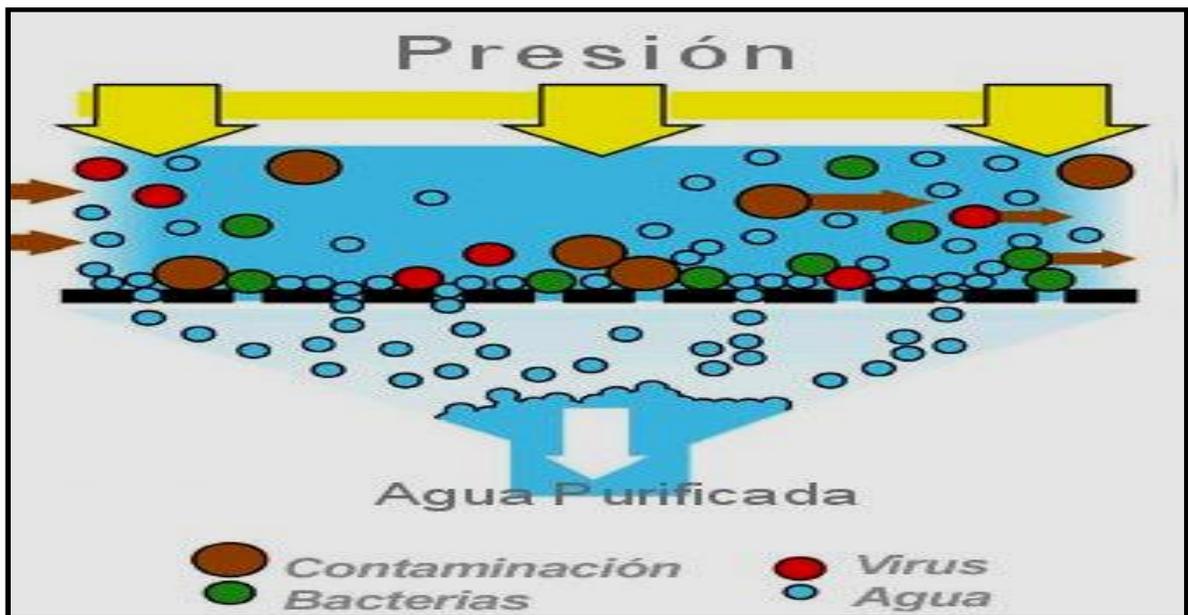
3: aniones.

4: cationes.

5: contra-iones.

5.7.2 Osmosis Inversa

Es el proceso por el cual el agua atraviesa una membrana ultra fina, semi-permeable. Esta membrana solo es permeable para las moléculas más finas, es decir, las del agua pura. Este proceso no almacena los contaminantes, al contrario de los filtros clásicos. Se llama proceso inverso porque necesita una presión suficiente para forzar al agua pura a pasar a través de la membrana. Este proceso tiene muy buenos resultados porque elimina de 98% a 99% de las partículas sólidas disueltas y el 99% de los micro-organismos (Purepro 2008).

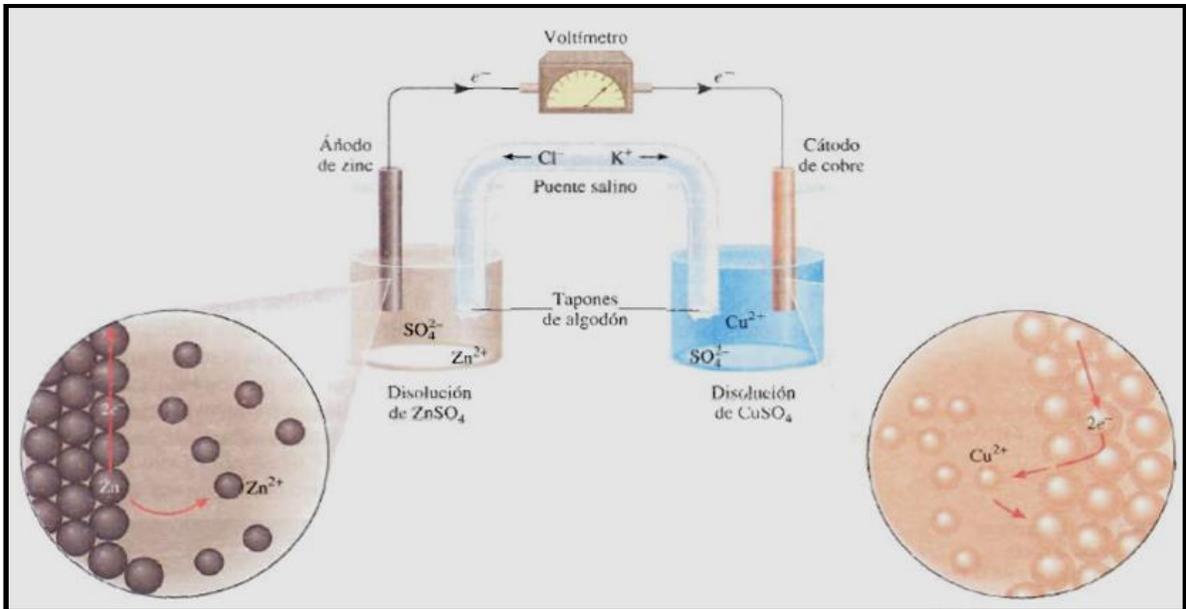


Fuente: Purepro 2008.

Figura 3. Proceso de osmosis inversa.

5.7.3 Electrodeposición

La electrodeposición es un proceso electroquímico de chapado donde los cationes metálicos contenidos en una solución acuosa se depositan en una capa sobre un objeto conductor. El proceso utiliza una corriente eléctrica para reducir sobre la superficie del cátodo los cationes (metales) contenidos en una solución acuosa. Al ser reducidos los cationes precipitan sobre la superficie creando un recubrimiento (Raymond Chang 2002).



Fuente: Raymond Chang 2002.

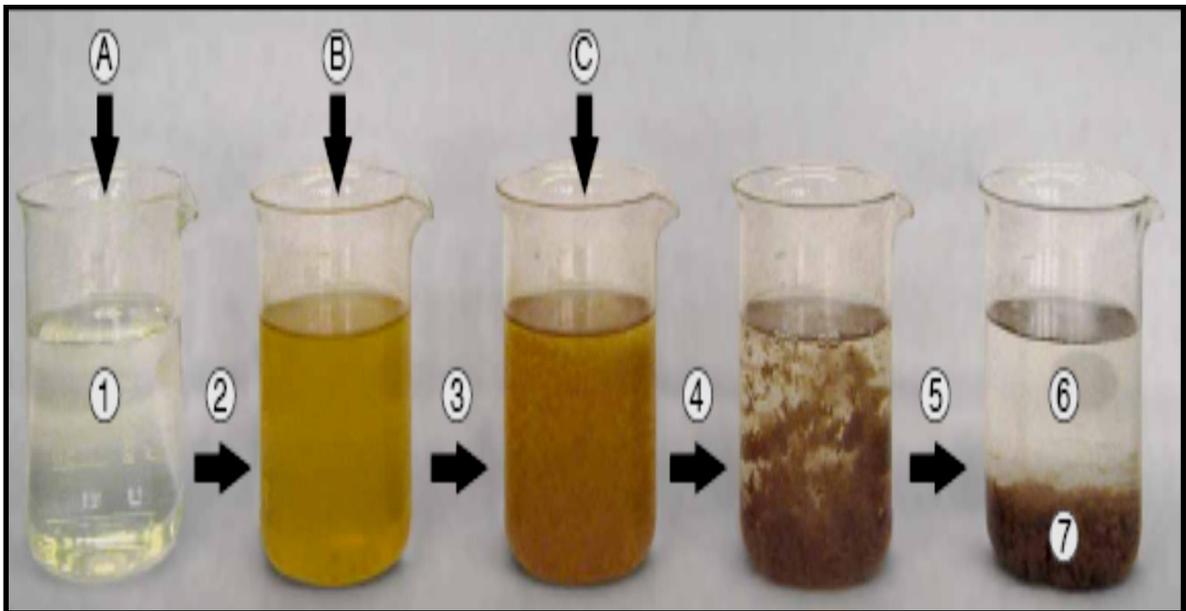
Figura 4. Proceso de electrodeposición.

5.7.4 Coagulación - Floculación

La coagulación/floculación es un proceso químico unitario empleado en el tratamiento de aguas que persigue alterar el estado de los sólidos filtrables y en suspensión para facilitar su separación mediante sedimentación. Una suspensión coloidal es un conjunto de partículas de pequeña dimensión (del orden de mili- y decena de micras) que soportan cargas eléctricas del mismo signo repartidas en su superficie. Estas partículas en suspensión forman parte de las impurezas del agua causantes de turbidez y color (por ejemplo: arenas, arcillas, cienos, partículas orgánicas, otros), y se caracterizan por su gran estabilidad ya que las repulsiones electrostáticas entre los coloides impiden su agregación en partículas mayores sedimentables (SEDEPAL 2000).

La coagulación es una operación consistente en neutralizar las cargas eléctricas de una suspensión coloidal. De esta forma dejan de actuar las fuerzas de repulsión y las partículas coloidales comienzan a agregarse. Los productos químicos que suelen utilizarse para favorecer la coagulación de las partículas coloidales suelen ser sales de hierro y aluminio ($[(Al_2(SO_4)_3)]$, $[(Fe_2(SO_4)_3)]$, $[FeCl_3]$).

La floculación es una operación basada en la agregación de las partículas coloidales previamente desestabilizadas en la etapa de coagulación, formando partículas de mayor tamaño (flóculos) que permitan su sedimentación. La formación de estos flóculos se favorece con la adición de polielectrolitos que se caracterizan por moléculas orgánicas poliméricas que son ionizables. Estos compuestos forman puentes entre las partículas dando lugar al fenómeno de floculación con partículas de mayor tamaño que resultan sedimentables (SEDEPAL 2000)



Fuente: SEDEPAL 2000

Figura 5. Proceso de coagulación – floculación.

En donde:

A: agua a tratar

B: floculante a utilizar

C: mezcla de A y B

1: agua a tratar

2: precipitación

3: coagulación

4: floculación,

5: sedimentación

6: agua tratada

7: hidróxido de hierro + contaminantes

Entre los coagulantes más utilizados tenemos:

a) Cloruro férrico

Producto obtenido por ataque con ácido clorhídrico de óxido de hierro II y III, con posterior oxidación del cloruro de hierro II. El Cloruro férrico se utiliza para depurar las aguas residuales y para tratamiento de aguas de consumo. Este en medio acuoso ligeramente básico reacciona con el ión hidróxido para formar flóculos de óxido de hierro- hidróxido de hierro ($\text{FeO}(\text{OH})^-$), que puede eliminar los materiales en suspensión.

Cuando se disuelve en agua, el cloruro de hierro (III) sufre hidrólisis y libera calor en una reacción exotérmica. De lo que resulta una solución ácida y corrosiva que se utiliza como coagulante en el tratamiento de aguas residuales y la potabilización del agua. También se utiliza en el acondicionamiento de lodos orgánicos antes de su deshidratación, principalmente en filtros prensa. Se utiliza también en la eliminación del fósforo de las aguas residuales (Coagulantes del cinco 2012).

b) Sulfato de Aluminio

Producto obtenido por reacción del hidróxido de aluminio con ácido sulfúrico en cantidades y condiciones adecuadas. El sulfato de aluminio se emplea extensamente como floculante en el tratamiento de aguas residuales, industriales, aguas potables y piscinas. Permite que la materia orgánica e inorgánica en suspensión se asocie en partículas más grandes susceptibles de ser filtradas (flóculos). También se usa como mordiente en la industria textil y como antitranspirante en desodorantes cosméticos.

Cuando el pH del agua es neutro, en torno a 7, el aluminio precipita arrastrando las partículas en suspensión, dejando el agua transparente (procesos de coagulación-floculación).

Las sales férricas son comparativamente más eficientes basándonos en el peso y tiene un rango de pH entre 6.0 y 8.5. La alumbre es más efectiva en un rango de 7.2 – 7.5 (Coagulantes del cinco 2012).

5.7.5 Alcalinización

Es la capacidad del agua de neutralizar ácidos, sin embargo, aniones de ácidos débiles (bicarbonatos, carbonatos, hidróxido, sulfuro, bisulfuro, silicato y fosfato) pueden contribuir a la alcalinidad. La alcalinidad está influenciada por el pH, la composición general del agua, la temperatura y la fuerza iónica. Por lo general, está presente en las aguas naturales como un equilibrio de carbonatos y bicarbonatos con el ácido carbónico, con tendencia a que prevalezcan los iones de bicarbonato. De ahí que un agua pueda tener baja alcalinidad y un pH relativamente alto o viceversa (OPS y CEPIS 2005).

La alcalinidad es importante en el tratamiento del agua porque reacciona con coagulantes hidrolizables (como sales de hierro y aluminio) durante el proceso de coagulación. Además, este parámetro tiene incidencia sobre el carácter corrosivo o incrustante que pueda tener el agua y, cuando alcanza niveles altos puede tener efectos sobre el sabor.

Durante el tratamiento, las aguas crudas de muy baja alcalinidad pueden requerir la adición de un alcalinizante primario (como el hidróxido de calcio). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) no hace recomendaciones respecto a la alcalinidad en fuentes de agua, ya que esta se liga a factores como el pH y la dureza, pero concluye que una fuente no debe mostrar cambios bruscos o repentinos en el contenido de la alcalinidad, pues esto podría indicar un cambio en la calidad del agua.

El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección. Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) exhiben un pH en el rango de 5 a 9. Se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debería estar entre 5.0 y 9.0. Por lo general este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua. Las guías canadienses han establecido el rango de pH 6.5 a 8.5 para el agua potable (OPS y CEPIS 2005).

Con la ayuda de los conceptos anteriormente descritos, se puede decir que la alcalinización es un proceso en la cual se adiciona un álcali (por lo general cal - CaO), cuando se tratan aguas ácidas o se quiere modificar el pH y así optimizar los procesos de coagulación.

Entre los alcalinizantes más comunes están:

La cal virgen o viva, la cal hidratada o extinta y la cal dolomítica son denominaciones comerciales del óxido de calcio (CaO), del hidróxido de calcio [Ca(OH)₂] y de mezclas derivadas tales como el óxido de magnesio (MgO) y el hidróxido de magnesio [Mg(OH)₂] en proporciones que pueden alcanzar el 50%. Los efectos de la neutralización del CaO o MgO, Ca(OH)₂ o Mg(OH)₂ son teóricamente equivalentes.

En la práctica, en la corrección final del pH, la parte de magnesio de la mezcla tiene menor solubilidad que la del calcio. Inicialmente se presenta en el agua como turbidez. La parte de calcio se solubiliza y actúa hasta alcanzar el pH deseado. La turbidez de magnesio (de solubilidad retardada) al solubilizarse en la tubería produce un aumento en el pH (OPS y CEPIS 2005).

5.8 Métodos utilizados para la remoción de arsénico (As)

Las tecnologías para la remoción de arsénico se basan en un proceso fisicoquímico o en la combinación de varios. Los métodos más conocidos de tratamiento de agua para remover arsénico se clasifican en:

- a) Procesos de coagulación y precipitación.
- b) Intercambio iónico.
- c) Adsorción en lechos granulares de materiales que retienen arsénico.
- d) Osmosis inversa.

Para todos los procesos mencionados anteriormente se requiere de una oxidación completa de arsénico (III). Esto se debe a que el arsénico (III) se remueve en menor proporción que el arsénico (V). Por lo tanto, cualquier tecnología de remoción incluye a la oxidación como pre-tratamiento.

5.9 Métodos utilizados para remoción de arsénico a nivel casero

5.9.1 Oxidación

Para la oxidación del As (III) a As (V) se puede utilizar el oxígeno atmosférico, hipoclorito y permanganato, estos productos son los más usados en el proceso de oxidación de arsénico en los países en desarrollo. Las unidades de tratamiento casero se utilizan básicamente para proporcionar agua segura de beber y para la cocción de alimentos de una familia, requieren cerca de 5 litros de agua per cápita por día.

Varias unidades de tratamiento casero se están proponiendo actualmente y otras están en desarrollo. Normalmente el agua de una fuente afectada con arsénico se recoge y se vierte manualmente en las unidades (OPS y CEPIS 2005).

5.9.2 Adsorción y Co-precipitación

Algunos tratamientos convencionales como la coagulación es un método efectivo en la remoción de arsénico. En este método se adiciona un coagulante, que puede ser cloruro de aluminio o cloruro férrico, y mediante una mezcla rápida por aproximadamente un minuto, el hidróxido de Aluminio o el férrico forman los micro-flóculos (coagulación). Entonces el agua se revuelve suavemente por algunos minutos (floculación) y la gran cantidad de los micro-flóculos se aglomeran y forman flóculos más grandes y estables.

Durante la coagulación-floculación algunas micro-partículas y iones de carga negativa se unen a los flóculos. El arsénico también se une a los flóculos (adsorción). Subsecuentemente se sedimenta y filtra (co-precipitación) separando así los flóculos junto con el arsénico que fue adsorbido.

Los coagulantes que son comúnmente usados son Alumbre ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$); cloruro férrico (FeCl_3); y sulfato férrico ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Las sales férricas son comparativamente más eficientes basándonos en el peso y tienen un rango de pH entre 6.0 y 8.5. La alumbre es más efectiva en un rango de 7.2 – 7.5. En ambos casos, As (III) no se remueve eficazmente, pero el

As (V) si se remueve. Por ello, la oxidación antes de los procesos es altamente recomendado. (OPS y CEPIS 2005).

5.9.3 Unidad de tratamiento con dos cubetas

Este método se basa en el proceso de la co-precipitación. La unidad consiste en dos cubos, cada uno con capacidad de 20 litros. Se colocan normalmente uno sobre el otro. El agua contaminada con arsénico se vierte adentro del cubo superior. El producto químico entonces se agrega y se revuelve vigorosamente con una paleta por uno o dos minutos. Luego se revuelve suavemente para la floculación por otros dos a tres minutos. El agua mezclada se deja reposar para que sedimente por cerca de dos horas. El producto químico agregado es una mezcla del coagulante (alumbre, cloruro o sulfato férrico) y oxidante (permanganato de potasio, hipoclorito de calcio) en forma de polvo.

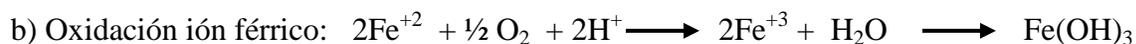
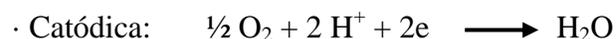
Después de sedimentar, los dos tercios superiores del agua flotante del primer cubo se vierten suavemente en el segundo cubo. El segundo cubo se llena a la mitad con arena filtrante y tiene un tubo de desagüe inferior perforado conectado con un grifo externo. Cuando se abre el grifo el agua del cubo pasa a través de la arena del filtro, que quita los micro-flocs restantes.

La arena del filtro en el segundo cubo necesita limpiado manual una vez o dos veces a la semana. También se necesita de capacitación en la operación y mantenimiento del sistema y en la prevención de contaminación bacteriológica del agua. La eficiencia varía con las habilidades de operación y mantenimiento de las unidades y de los parámetros de calidad del agua, especialmente el pH. Las sales férricas son las más eficientes en la remoción del arsénico (OPS y CEPIS 2005).

5.9.4 Virutas de Hierro

El agua a tratar, idealmente saturada en oxígeno, se hace escurrir en un reactor donde se encuentra hierro metálico en forma de lana, viruta o similar, que presenta una alta área superficial para maximizar la corrosión. En estas condiciones tienen lugar las siguientes reacciones:

a) Reacciones óxido - reducción:



Los productos de corrosión, siendo el hidróxido de hierro (III) ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) predominante, precipitan en forma de pequeñas partículas coloidales que lentamente se aglomeran y poseen la capacidad de retener arsénico por adsorción. La mayor parte del hierro oxidado con arsénico retenido abandona el reactor el cual posteriormente es separado por filtración (OPS y CEPIS 2005).

Las ventajas más relevantes de este proceso son:

- No se requiere de productos químicos, solo de hierro comercial de calidad corriente en forma de lana, residuos de la industria metalmeccánica (viruta) o similar.
- Fácil de operar.
- Residuos férricos de alta densidad, lo que facilita su disposición final.

Los aspectos de operación esenciales de este proceso son:

- La corrosión y adsorción de arsénico ocurren en forma simultánea.
- Requiere de una máxima concentración de oxígeno disuelto en el agua a tratar.

Es necesario minimizar la acumulación de productos de corrosión de hierro sobre las superficies de hierro metálico para mantener una tasa de corrosión constante. Se debe ajustar la tasa de corrosión de acuerdo al contenido de arsénico del agua.

5.9.5 Remoción de arsénico asistida por luz solar (RAOS)

Para eliminar la contaminación por arsénico en zonas aisladas se propuso otra tecnología muy simple: la remoción de arsénico por oxidación solar (RAOS). El método es una variante de las

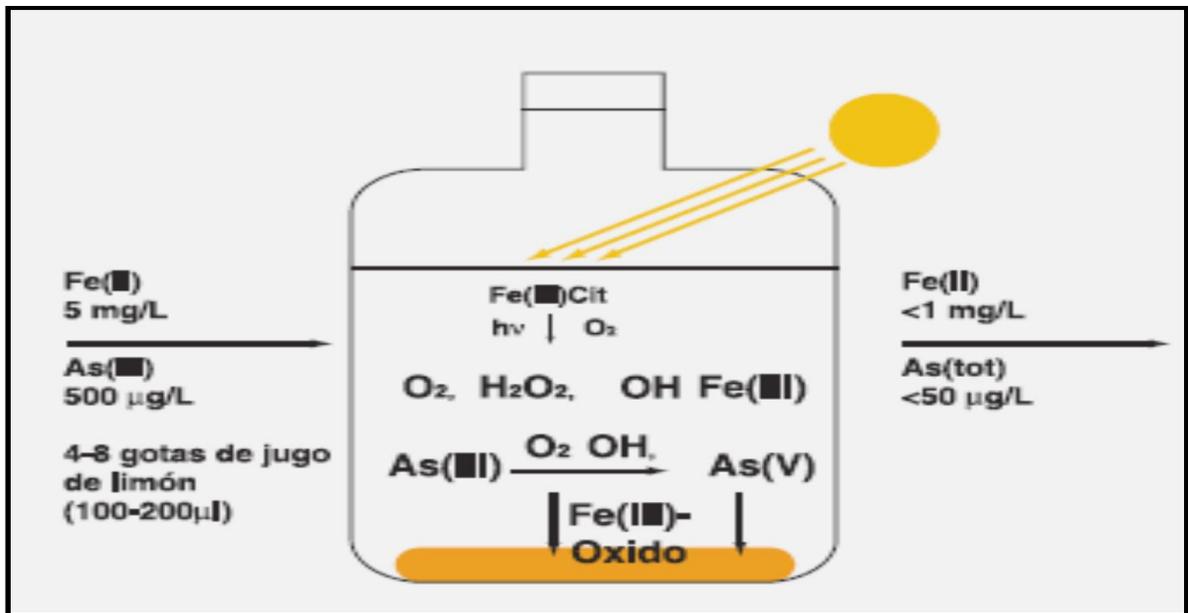
tecnologías bien conocidas de remoción de arsénico con flóculos de hidróxidos de aluminio o de hierro. Para que la remoción sea eficaz es necesario que el arsénico se encuentre en su forma oxidada, el arseniato AsO_4^{3-} , y no en su forma reducida, el arsenito AsO_3^{3-} .

La RAOS busca generar el flóculo de hidróxido de hierro por oxidación solar de sales de hierro en presencia de citrato y de aire. Las reacciones fotoquímicas que tienen lugar no sólo generan el precipitado de hidróxido de hierro, sino que simultáneamente promueven la formación de especies muy activas que oxidan el arsénico a arseniato, el cual se adsorbe en el flóculo. El citrato se agrega en forma de jugo de limón al agua (que generalmente ya posee hierro) contenida en botellas plásticas que se exponen al sol por algunas horas.

Durante la noche las botellas se colocan en posición vertical. Así, el hierro y el arsénico floculan y el agua purificada se decanta de las partículas o se filtra a través de simples paños textiles o algodón (OPS y CEPIS 2005).

Las reacciones involucradas se basan en la formación del complejo citrato de Fe (III), que permite la oxidación del As (III) a As (V) a través de especies activas formadas por irradiación con luz solar en presencia de oxígeno. El As (V) se adsorbe fuertemente sobre el precipitado de hidróxido de hierro que se forma en esas condiciones, y flocula. Se agregan al agua algunas gotas de jugo de limón y una solución de Fe (II) como por ejemplo la sal de Mohr ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Como puede deducirse, este método no requiere equipos caros, ni elevados costos de energía. Sólo necesita la acción permanente del sol, y es, por lo tanto, aplicable a regiones con alta incidencia de radiación diurna, es decir, con más de 3,000 horas de sol en promedio por año. Esta tecnología ha sido aplicada con bastante éxito en países como Colombia, Tailandia, México y Bangladesh (OPS y CEPIS 2005).



Fuente: OPS y CEPIS 2005.

Figura 6. Remoción Asistida por Luz Solar (RAOS).

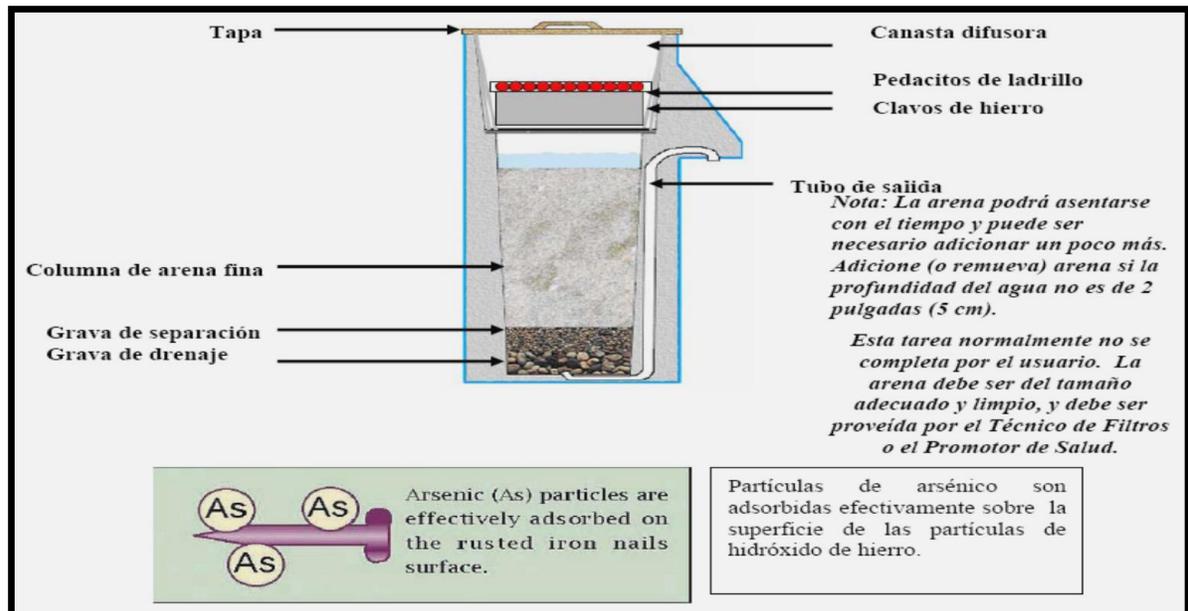
5.9.6 Bio-filtro de Arena Modificado

El filtro biológico de arena es una adaptación del filtro de arena lento tradicional, apropiado para usarse a nivel domiciliario ya que es más pequeño y está adaptado para el uso continuo. El componente principal de este filtro es la formación de una biocapa o la cual mediante la combinación de procesos físicos y biológicos presentes en la inter-fase biocapa-arena se eliminan los patógenos y sólidos suspendidos. La biocapa ideal aumentará la eficiencia del tratamiento eliminando hasta un 99% de los patógenos (IMTA 2011).

El filtro biológico de arena puede modificarse para retirar un cierto nivel de arsénico del agua agregando 5 kg de clavos de hierro no galvanizado, cubiertos por una capa de pedazos de ladrillo rojo común. Esto se logra reemplazando la placa difusora con una canasta profunda de difusión (Figura 7). Los clavos de hierro de la canasta de difusión se oxidarán rápidamente al contacto con el agua y el aire, formando posteriormente hidróxido de hierro.

El óxido de hierro (hidróxido de hierro) es un adsorbente excelente para el arsénico. Cuando el agua contaminada con arsénico se vierte en el filtro, el arsénico reacciona con la superficie del hierro, y el arsénico es adsorbido rápidamente sobre la superficie de las partículas de

hidróxido de hierro. Las partículas de hierro y arsénico se caen y se quedan atrapadas encima de la arena fina. El propósito de los pedacitos de ladrillo es de proteger los clavos de hierro para que no se dispersen debido a la fuerza del agua (OPS y CEPIS 2005).



Fuente: OPS y CEPIS 2005.

Figura 7. Sistema Bio-filtro de Arena Modificado.

Para la utilización del bio-filtro de concreto modificado siga las instrucciones abajo descritas:

a) Materiales requeridos:

- 1.5 kg (3.3 lb) de clavos de hierro no galvanizados. Clavos pequeños son mejores porque tienen mayor área superficial. Idealmente los clavos deberían medir menos de 20 mm (0.8”) de largo, pero no deberán ser tan pequeños como para caerse por las perforaciones en la caja difusora. Los clavos tienen que ser no galvanizados (porque el hierro deberá oxidarse rápidamente), para que el arsénico se remueva efectivamente. Evite clavos que sean oleosos o que tengan contaminación visible.
- Pedazos de 5-10 cm (2-4”) de diámetro de ladrillo roto. Se puede usar cualquier tipo de ladrillo, pero deben estar limpios.

b) Procedimiento:

- Lave los clavos de hierro para quitar cualquier polvo, suciedad, piedras, aceite, y otros materiales ajenos.

- Lave los pedazos de ladrillo para quitar cualquier polvo, suciedad, piedras, aceite, y otros materiales ajenos.

- Coloque los 5 kg (11 lb) de clavos de hierro en la caja difusora. Es importante que los clavos estén parejamente distribuidos y que cubran el fondo entero de la caja.

- Coloque una capa de pedazos de ladrillo encima de los clavos para cubrirlos completamente. El propósito del ladrillo es de impedir que los clavos se dispersen con la fuerza del agua.

Nota 1: No coloque pedazos de tela debajo de los pedazos de ladrillo. La tela se tatará rápidamente con óxido de hierro y el flujo disminuirá dramáticamente.

Nota 2: Dependiendo de los clavos y la condición del agua, las perforaciones de 3 mm (1/8") se pueden tapar con óxido de hierro. Si eso sucede, aumente el tamaño de los poros hasta 5 mm (3/16") ó 6 mm (1/4"); sin embargo, no haga las perforaciones tan grandes para que los clavos se caigan a través de ellas (OPS y CEPIS 2005).

5.10 Métodos utilizados para la remoción de plomo a nivel casero.

Las tecnologías utilizadas para la remoción del plomo son las mismas que las utilizadas para el arsénico (numeral 5.9):

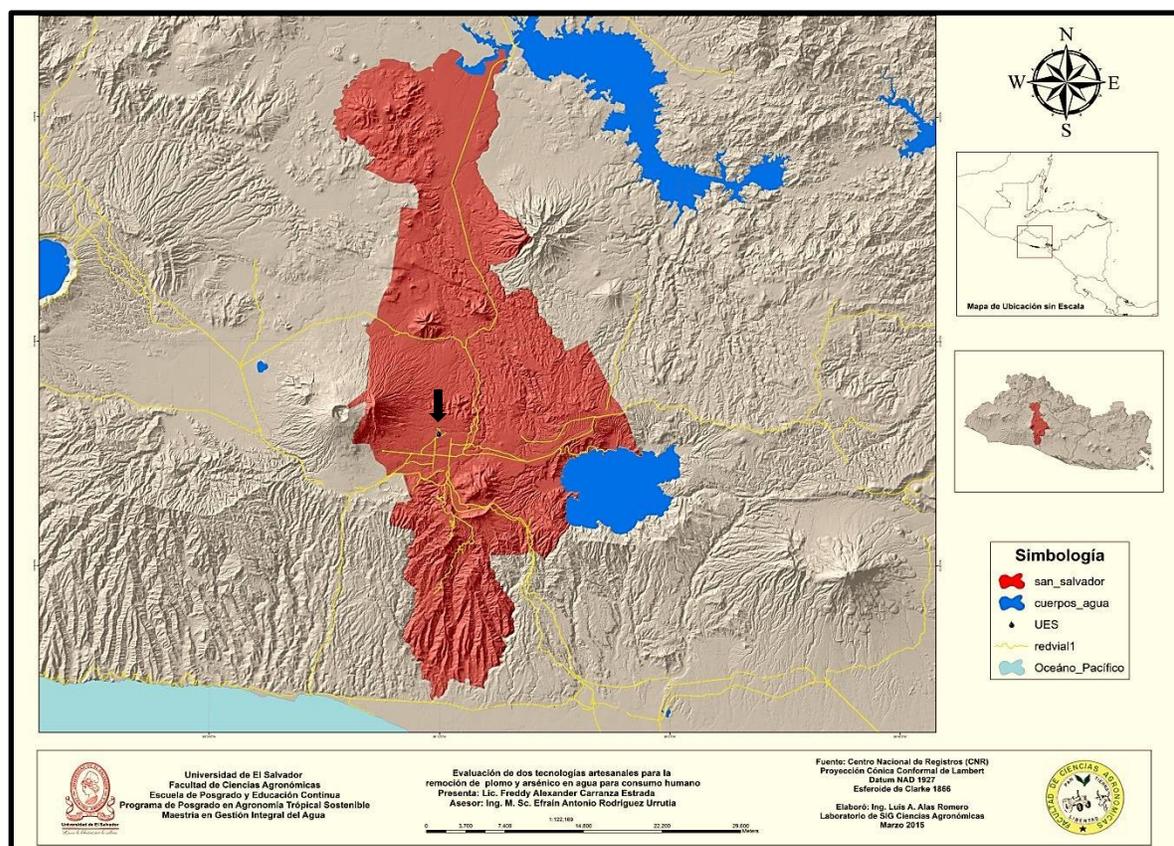
- a) Procesos de coagulación y precipitación
- b) Intercambio iónico
- c) Adsorción en lechos granulares de materiales que retienen plomo.
- d) Osmosis Inversa.

La remoción del plomo presente en el agua en los procesos convencionales de floculación o ablandamiento con cal se realiza formando hidróxidos y carbonatos de plomo insolubles. Mediante este método es posible llegar a una eficiencia de 98%. La coagulación con aluminio con un pH de 6.5 a 7 puede lograr una remoción de 60 a 80%. Con pH mayores de 9.5 la eficiencia de remoción sube a 90%. Cuando las aguas crudas de baja turbiedad contienen una alta concentración de plomo, el sulfato férrico puede ser más efectivo para su remoción.

El ablandamiento cal-soda con un pH entre 7 y 11 puede remover por encima del 90% de plomo en el agua (Barrenechea 2009).

VI. Metodología

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la Universidad de El Salvador, durante los meses de septiembre de 2013 a abril de 2014.



Fuente: Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Laboratorio de Sistema de Información Geográfica 2015.

Figura 8. Ubicación de la Universidad de El Salvador.

6.1 Elaboración de tecnologías

Las tecnologías elaboradas son las siguientes:

6.1.1 Unidad de tratamiento con dos cubetas

Materiales utilizados

- Cubetas plásticas (tereftalato de polietileno (PET) de 10 litros.
- Frascos plásticos (tereftalato de polietileno (PET) de 1 galón de capacidad.
- Chorros plásticos, tipo dispensador para oasis.

- Mangueras (diámetros de 5/16 y 1/4 de pulgada).
- Mallas metálicas (12 mm, 6 mm y 1 mm).
- Arena de río.
- Algodón.
- Clavos de hierro de una pulgada.
- Lejía.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Materiales utilizados para la elaboración del método con dos cubetas.

Construcción de la Unidad de tratamiento con dos cubetas

1. Se adquirieron dos cubetas plásticas de 10 litros de capacidad cada una.
2. En una de las cubetas se colocó un chorro a 5 cm por arriba de la base de la cubeta (anexo 1). En esta cubeta es donde se llevó a cabo el proceso de coagulación, floculación y sedimentación (Unidad de reacción).
3. De igual manera se procedió con la segunda cubeta, solo que el chorro se colocó lo más cercano a la base de la cubeta. Luego se utilizó esta cubeta para elaborar la unidad de filtración.

4. Para la preparación de la arena de río se procedió de la siguiente manera:

En primer lugar se tamizó a través de una malla de 12 mm de diámetro para eliminar las piedras de mayor tamaño, estas fueron descartadas. Luego se tamizó a través de una malla de 6 mm de diámetro, las piedras retenidas por esta malla se utilizaron para la formación de la capa de drenaje.

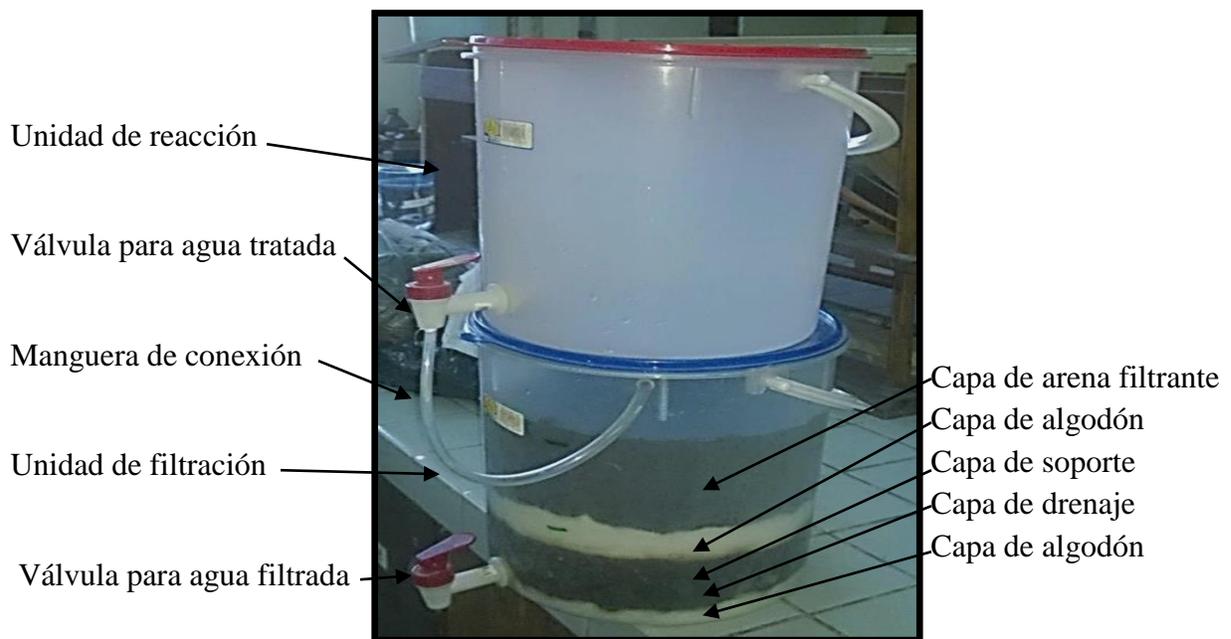
Por último se utilizó un tamiz de 1 mm de diámetro, las piedras retenidas se utilizan para formar la capa de soporte y la arena que pasa a través de la malla formara la capa filtrante (anexo 2).

Después de separar cada una de las capas es necesario lavarlas con suficiente agua para eliminar todo el lodo y otros contaminantes que estén presentes en la arena. Para esto se coloca la capa a lavar en un recipiente, se adiciona agua y se comienza a agitar con las manos. Luego se decanta el agua con el lodo. Repetir este proceso hasta que se observe que el agua sobrenadante este limpia.

Es importante no lavar en exceso la capa filtrante (la arena más fina), ya que esto puede disminuir la capacidad de retención de la misma. Una prueba sencilla para verificar que la capa ya está lista es adicionar en un frasco pequeño una porción de la capa filtrante que está siendo lavada, luego adicionar igual cantidad de agua, se agita fuertemente y se deja reposar un momento, si se puede observar sin dificultad el fondo de la arena, es señal de que la arena ya está limpia y puede ser utilizada (anexo 2)

5. Para construir la unidad de filtración se utilizó una manguera de 5/16" de diámetro, la cual se cortó de manera que la longitud de la misma correspondiera a la del fondo de la cubeta. Con un clavo de una pulgada se perforo la manguera varias veces formando una línea recta, de tal manera que cada agujero quedara a 1.0 cm de separación. Luego se colocó la manguera en el chorro por la parte interna de la cubeta y se cubrió completamente con dos capas de algodón (aproximadamente 2.5 cm de espesor).

6. Encima del algodón se colocaron las piedras extraídas de la malla de 6 mm para formar la capa de drenaje (aproximadamente 2.5 cm).
7. Sobre ésta se colocaron las piedras retenidas por la malla de 1 mm para formar la capa de soporte (aproximadamente 2.5 cm).
8. Sobre ésta capa se colocó una nueva capa de algodón de aproximadamente 3.0 cm de espesor, tratando de que quede distribuida de forma homogénea, para esto se adiciono agua al algodón y se hizo una leve presión. Es importante que quede bien distribuido ya que este es el componente principal para la retención de los flóculos formados.
9. Sobre ésta capa de algodón se agrega la arena que forma la capa filtrante (aproximadamente 9 cm)(Anexo 3).
10. Sobre la unidad de filtración se coloca la cubeta que es la unidad de reacción y estas se unen con una manguera de 1/4" de diámetro (figura 10).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Unidad de tratamiento con dos cubetas.

11. Una vez terminada la unidad de tratamiento se procedió a desinfectarla con una solución preparada con 100 ml de lejía en dos litros de agua de chorro, se adiciono sobre la unidad de filtración de manera que cubriera completamente todo el material filtrante. Se dejó reposar durante 10 minutos y luego se abrió la válvula para drenar toda el agua con lejía. Después se llenó la unidad de reacción con agua destilada para enjuagarla y esa misma agua se dreno a la unidad filtrante para enjuagarla y eliminar todo el remanente de agua con lejía. Este proceso se repitió hasta que no se perciba el olor a lejía. De esta manera la Unidad de tratamiento con dos cubetas está lista para ser utilizada.

6.1.2 Remoción asistida por luz solar (RAOS)

Materiales utilizados

- Frascos plásticos (tereftalato de polietileno (PET) transparentes de 2 litros de capacidad
- Frascos plásticos (tereftalato de polietileno (PET) de 1 galón de capacidad.
- Clavos de hierro de una pulgada.
- Limón indio (*Citrus lima*).
- Algodón.
- Grava o piedras de río.

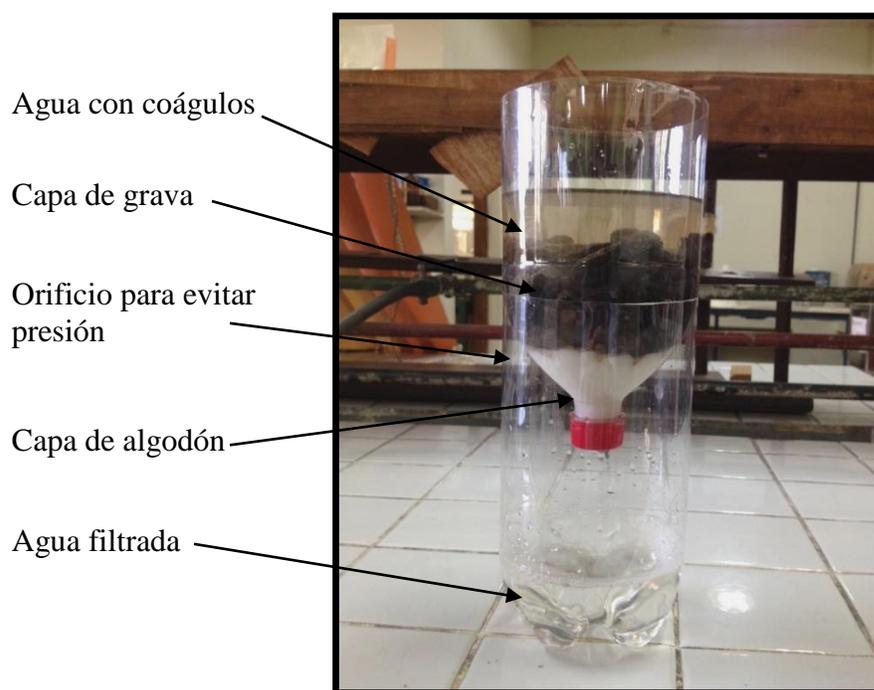


Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Materiales utilizados para la elaboración del método RAOS.

Construcción de la RAOS

1. Se utilizaron frascos plásticos de bebidas carbonatadas transparentes de 2 litros de capacidad, los cuales se lavaron con detergente y con agua del grifo hasta eliminar el detergente. Luego se enjuagaron con agua destilada.
2. Para la retención de flóculos se elaboró un filtro de algodón de la siguiente manera:
Se tomó uno de los frascos plásticos previamente lavados y se cortó a la mitad aproximadamente (se utilizara el lado que tiene la rosca). Con un clavo calentado se perforaron ocho agujeros al tapón. Se colocó el tapón al frasco cortado y se colocó una capa de algodón de 5 cm aproximadamente (adicionar pequeñas porciones de agua y presionar un poco el algodón para garantizar que quede bien ubicado).
3. Luego se adiciono una capa de 5 cm de grava lavada, que sirvió para que el algodón no se mueva. Esta será la Unidad que retendrá los flóculos formados (figura 12).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Filtro para el método de la RAOS.

Como soporte para el filtro se utilizó otro de los frascos plásticos y se cortó aproximadamente hasta el hombro del mismo. Luego se colocó el filtro encima. Aproximadamente 3 cm por debajo del corte realizado a la botella se perforó con la ayuda de un clavo calentado, para evitar que se genere presión al momento de filtrar (anexo 4).

6.2 Preparación de las muestras

Las muestras utilizadas para cada tratamiento se prepararon en el laboratorio, de manera que la concentración de plomo y arsénico presente en cada muestra fuera aproximadamente de 1 ppm. Como fuente de plomo se utilizó nitrato de plomo y como fuente de arsénico se utilizó arsenito de sodio.

a) Preparación de la fuente de arsénico y plomo

1. Se colocó el nitrato de plomo y el arsenito de sodio en una estufa a una temperatura de 105° C, durante dos horas para eliminar la humedad que contiene el reactivo.
2. Se dejó enfriar y se pesó la cantidad necesaria según el siguiente calculo:

b) Preparación de la solución de plomo 1 mg/l

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

$$\begin{aligned} \text{mg de plomo} &= \text{ppm} \times \text{litros de solución} \\ \text{mg de plomo} &= 1 \text{ mg/l} \times 1 \text{ l} = 1 \text{ mg} = 0.001 \text{ g} \end{aligned}$$

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

Peso molecular del nitrato de plomo: 331.2 g/mol

Peso atómico del plomo: 207.2 g/mol

Entonces:

$$\begin{array}{r} 331.2 \text{ g de } \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 \text{-----} 207.2 \text{ g de Pb} \\ \times \text{-----} 0.001 \text{ g} \\ \hline x = 0.0016 \text{ g de nitrato de plomo} \end{array}$$

Se pesó 0.0016 g de nitrato de plomo, se disolvió en agua destilada y luego se llevó a un volumen de un litro para tener una concentración aproximada de 1 ppm de plomo.

c) Preparación de la solución de arsénico 1 mg/l

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

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

$$\text{mg de arsénico} = 1 \text{ mg/l} \times 1 \text{ l} = 1 \text{ mg} = 0.001 \text{ g}$$

Como la fuente de arsénico es el arsenito de sodio (NaAsO_2):

Peso molecular del arsenito de sodio: 129.92 g/mol

Peso atómico del arsénico: 74.92 g/mol

Entonces:

$$\begin{array}{r} 129.92 \text{ g de NaAsO}_2 \text{-----} 74.92 \text{ g de As} \\ x \text{-----} 0.001 \text{ g de As} \\ x = 0.0017 \text{ g de arsenito de sodio} \end{array}$$

Se pesó 0.0017 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 ppm de arsénico.

d) Determinación de la concentración real de plomo y arsénico

Después de preparar cada solución se determinó la concentración real de plomo y de arsénico en las muestras preparadas, utilizando los métodos colorimétricos correspondientes para el análisis de plomo (anexo 5) y para el análisis de arsénico (anexo 6).

6.3 Evaluación de la fuente de hierro trivalente

El hierro metálico (clavos de hierro) reacciona con el oxígeno presente en el agua formando el óxido de hierro (III), que luego reacciona con el agua para producir el hidróxido de hierro

(III), el cual forma coloides que se van aglomerando y produce pequeños flóculos en los que se adsorben el plomo y arsénico, que posteriormente sedimentan.

Clavos de hierro.



Procedimiento:

1. Los clavos utilizados fueron lavados con agua de chorro para eliminar cualquier suciedad y posteriormente se enjuagaron con agua destilada.
2. Se colocaron 5 g de clavos (10 clavos) de hierro no galvanizado de 1 pulgada (conocidos comercialmente como clavos de hierro dulce) en 9 recipientes numerados del 1 al 8 sucesivamente y el noveno rotulado como 24 (esta numeración corresponde al número de horas de reacción), luego se adicionó 100 ml de agua destilada, y se agitaron fuertemente (mínimo 1 minuto) para incorporar oxígeno y producir la oxidación del hierro.

Se dejó reposar los recipientes y transcurrida una hora se agito fuertemente el recipiente rotulado con el número 1, se separó el líquido que contiene el hidróxido de hierro, y posteriormente se realizó el análisis de hierro para determinar su concentración por medio de Espectrofotometría de Absorción Atómica a una longitud de onda de 248.3 nm (anexo 7).

3. Pasada dos horas se agito fuertemente el recipiente rotulado con el número 2, se separó el líquido que contiene el hidróxido de hierro y posteriormente se realizó el análisis de hierro de igual manera que en el caso anterior.
4. Y así sucesivamente se fueron agitando cada recipiente hasta completar los nueve recipientes que correspondería a cada hora indicada (anexo 8).

5. En nueve recipientes numerados del uno al nueve se adiciono 100 ml de la solución de plomo preparada en el numeral 6.2, luego se adiciono 5 ml del líquido que contiene los coágulos de hidróxido de hierro el cual fue extraído de los clavos de hierro. De manera que 5 ml de hidróxido de hierro extraído a la hora se adiciono al recipiente rotulado con el número uno, el extraído de dos horas en el recipiente rotulado con el número dos y así sucesivamente hasta llegar al extraído de 24 horas.
6. Se agito fuertemente cada recipiente y se dejó reposar por tres horas.
7. Trascurrido el tiempo se filtró el líquido de cada recipiente utilizando papel filtro Watman 42 y se determinó la concentración de plomo en cada uno de los filtrados (anexo 5).
8. Según los resultados obtenidos se realizaron los ajustes necesarios en cuanto a cantidad de clavos y tiempo de extracción del hidróxido de hierro, para mejorar la remoción del plomo contenido en el agua preparada.

6.4 Evaluación de las tecnologías

6.4.1 Unidad de tratamiento con dos cubetas

Procedimiento:

1. Se verifico el pH del agua preparada (numeral 6.2.) para garantizar que se estaba trabajando en el pH adecuado para la reacción de floculación (pH = 6.5 a 8,5).
2. Se agitó fuertemente para incorporar oxígeno y poder oxidar el As^{+3} a As^{+5} y el Pb^{+2} a Pb^{+4} .
3. Se colocaron 5 litros de la muestra de agua a la unidad de reacción y se adiciono 5 gotas de lejía (anexo 9) para garantizar que todo el arsénico se oxide a As^{+5} o que todo el plomo se oxide a Pb^{+4} . Luego se adiciono la cantidad de coagulante determinada según las pruebas realizadas en el numeral 6.3.

4. Con la ayuda de una paleta de madera se agito la muestra para garantizar que se distribuya completamente el agente coagulante y entre en contacto con toda la muestra.
5. Se dejó reposar por un periodo de tres horas para que se lleve a cabo la floculación.
6. Transcurrido ese tiempo, se abrió la válvula del chorro de la unidad de reacción para que el agua tratada pasara a la unidad de filtración.
7. Se colecto el agua filtrada en otro recipiente limpio y se realizó el análisis de arsénico y de plomo para evaluar el porcentaje de remoción según la cantidad de coagulante utilizado.
8. Se agito el agua remanente en la unidad de reacción y se decantó el agua con los flóculos a otro recipiente (cubeta de 20 litros).
9. Dependiendo de los resultados obtenidos se aumentó la cantidad de coagulante utilizado.

6.4.2 Método de remoción asistida por luz solar (RAOS)

Procedimiento:

1. Se verifico el pH del agua preparada (numeral 6.2) para garantizar que se estaba trabajando en el pH adecuado para la reacción de floculación (pH = 6.5 a 8.5).
2. Se agitó fuertemente para incorporar oxígeno y poder oxidar el As^{+3} a As^{+5} y el Pb^{+2} a Pb^{+4} .
3. Se colocó un litro de agua en cada botella y se adiciono la cantidad de coagulante determinada según las pruebas realizadas en el numeral 6.3

4. Se adiciono una gota de limón a cada litro de agua a tratar y se agito fuertemente para garantizar que el coagulante y el jugo de limón se distribuya de forma homogénea en todo el recipiente.
5. Se colocó la botella sobre el techo del laboratorio de investigación del departamento de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas y se dejaron expuestas a los rayos solares (de forma horizontal para aprovechar al máximo la exposición a los rayos solares) por un tiempo mínimo de 6 horas.
6. Se bajaron las botellas del techo, se colocaron en posición vertical y se dejaron reposar toda la noche.
7. Cuidadosamente filtrar el agua tratada utilizando algodón y un embudo.
8. Se colecta el agua tratada en recipientes limpios.
9. Se agita el agua remanente en la botella y decantar el agua con los flóculos formados a otro recipiente (cubeta de 20 litros).
10. Dependiendo de los resultados obtenidos de porcentaje de remoción se aumentó la cantidad de coagulante utilizado.

6.4.3 Tratamiento de los residuos

Agua residual

El recipiente (cubeta de 20 litros) en el que fue recolectada el agua que contienen los flóculos resultantes de ambos métodos, se deja reposar toda la noche para que se dé nuevamente la sedimentación de los flóculos. Se decanta toda el agua sobrenadante como sea posible, de manera de que no se arrastren los flóculos de hidróxido de hierro. Esta agua posee una calidad aceptable para poder ser descargada a un río o al drenaje.

Luego se expone al sol el recipiente que contiene los flóculos con el agua que no pudo ser decantada, para que por evaporación se elimine el agua remanente.

En este recipiente coleccionar todos los flóculos con el agua que no pudo ser decantada de cada tratamiento por el método de las dos cubetas y el método RAOS.

Algodón residual

El algodón utilizado en el proceso de filtración se expone al sol para secarlo completamente. Luego se coleccionara en una cubeta de 20 litros. Se repetirá este proceso para todo el algodón que ya se encuentre obstruido por la cantidad de flóculos retenidos.

Al llenarse ambas cubetas se deberán transportar los residuos a un relleno sanitario, para su deposición final.

6.4.4 Porcentaje de remoción

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

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

Donde la concentración inicial está dada por 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 tanto por el método de las dos cubetas como por el método RAOS (anexo 10)

6.5 Metodología de análisis de laboratorio

Las muestras fueron analizadas utilizando los siguientes métodos:

- Análisis de plomo

Para la determinación de plomo se utilizó un Fotómetro ApectroQuant Nova 60, utilizando Kit de reactivos para la determinación de plomo (anexo 5).

- **Análisis de arsénico**

Para la determinación de arsénico se utilizó un método colorimétrico, utilizando Kit de reactivos para la determinación de arsénico (anexo 6).

- **Análisis de Hierro**

Para la determinación de hierro en agua se utilizó el análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica de llama, Referencia: JIS K-102-1993 Estándar Industrial Japonés Métodos de pruebas para aguas de desecho industrial. Estándares Ambientales concernientes a la contaminación del agua (anexo 7).

6.6 Procesamiento de datos

Comparación de resultados entre métodos

Para evaluar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por ambos métodos para cada uno de los metales involucrados, se utilizó la prueba “t” de student para el análisis de diferencias de medias utilizando un nivel de confianza del 95%. Para la realización de los cálculos se utilizó la herramienta de análisis de datos del programa Microsoft Excel.

El programa de Excel se basa en el cálculo de la “t” de student según la siguiente formula:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n - 1}}}$$

Dónde:

t = prueba “t” de student para análisis de diferencias de medias.

\bar{X} = media de la población.

μ = diferencia hipotética de las medias.

S = desviación estándar.

n = tamaño de la muestra.

En base a lo anterior, la herramienta de análisis de datos del programa de Excel genera un cuadro resumen de resultados.

Para evaluar si existen diferencias significativas se plantean dos hipótesis:

Hipótesis Nula (Hipótesis de prueba) (H₀): establece que no hay diferencias significativas entre las medias del porcentaje de remoción obtenido por el método RAOS (μ_1) y las medias del porcentaje de remoción obtenido por el método de las dos cubetas (μ_2), es decir:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad \text{también} \quad H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Hipótesis Alternativa (H₁): esta es lo contrario de la hipótesis nula, establece que si hay diferencias significativas entre las medias del porcentaje de remoción obtenido por el método RAOS (μ_1) y las medias del porcentaje de remoción obtenido por el método de las dos cubetas (μ_2), es decir:

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad \text{también} \quad H_0: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

El criterio de aceptación o rechazo de la hipótesis nula dependerá de donde esté ubicado el valor de la “t” calculada respecto al valor de “t” la de tablas para el nivel de confianza y los grados de libertad establecidos.



Figura 13. Curva de distribución normal para dos colas.

Fiabilidad de los resultados de cada método comparados con la NSO 13.07.01:08

Para evaluar si los resultados cumplen con la normativa y poder garantizar que el método será confiable para obtener resultados que cumplan dicha norma, se utilizó la prueba “t” de student para el análisis de una sola media. En esta prueba se compara la media de la muestra con un

valor de referencia, que para este caso es el límite permitido por la NSO 13.07.01:08 para cada uno de los parámetros. El nivel de confianza utilizado fue del 95%. Para la realización de los cálculos se utilizó la herramienta de análisis de datos del programa Microsoft Excel. Este se basa en el cálculo de la “t” de student según la siguiente formula:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

t = “t” de student para el análisis de una sola media

\bar{X} = media de la muestra

μ = valor especificado de comparación

S = desviación estándar

n = tamaño de la muestra

Luego se genera un cuadro resumen de resultados en base a las variables antes mencionadas. Para evaluar si existen diferencias significativas se plantean dos hipótesis:

Hipótesis Nula (Hipótesis de prueba) (H₀): establece que no hay diferencias significativas entre la media y el valor de referencia (límite establecido según normativa: 0.01 ppm para arsénico y plomo), es decir:

$$\mathbf{H_0: \mu_1 = 0.01} \quad \mathbf{también} \quad \mathbf{H_0: \mu_1 - 0.01 = 0}$$

Hipótesis Alternativa (H₁): establece que la media de los resultados obtenidos es menor que el valor de referencia utilizado (límite establecido según normativa: 0.01 ppm para arsénico y plomo) es decir:

$$\mathbf{H_1: \mu_1 < 0.01} \quad \mathbf{también puede ser} \quad \mathbf{H_1: \mu_1 > 0.01}$$

El criterio de aceptación o rechazo de la hipótesis nula dependerá de donde esté ubicado el valor de la “t” calculada respecto al valor de la “t” de tablas para el nivel de confianza y los grados de libertad establecidos.



Figura 14. Curva de distribución normal para una cola.

La zona de rechazo puede estar ubicada del lado derecho o izquierdo del gráfico, dependiendo de la H_1 que se esté planteando.

VII. Análisis de Resultados

7.1 Evaluación de la fuente de hierro trivalente

Los clavos de hierro al entrar en contacto con el oxígeno disuelto en el agua se oxidaron y formaron el correspondiente óxido básico, al mismo tiempo por encontrarse en un medio acuoso reaccionan inmediatamente y forman su respectiva base, el hidróxido de hierro III. Esto se lleva a cabo de acuerdo a la siguiente reacción química:



El hidróxido de hierro es el que actúa como agente coagulante y que posteriormente forma los flóculos donde es adsorbido el plomo y el arsénico presente en las muestras de agua. Los resultados obtenidos de la cantidad de hidróxido férrico y la cantidad de plomo removido preliminarmente a nivel de laboratorio utilizando una relación de 5 g de clavos (10 clavos) y 100 ml de agua destilada se presentan en el cuadro siguiente:

Cuadro 4. Resultados obtenidos utilizando 5 g de clavos y 100 ml de agua destilada.
Formación de hidróxido de hierro a partir de clavos (5 g de clavos / 100 ml de agua)

Horas	Concentración 1 de Fe (ppm)	Concentración 2 de Fe (ppm)	Concentración 3 de Fe (ppm)	Promedio Concentración Fe (ppm)	Pb inicial (ppm)	Pb Final (ppm)	Porcentaje de remoción
1	2.15	2.17	2.10	2.14	0.80	0.21	74.03
2	5.02	4.08	4.53	4.54	0.80	0.10	88.08
3	6.07	5.70	5.75	5.84	0.80	0.09	88.46
4	7.78	7.54	7.60	7.64	0.80	0.08	89.96
5	8.63	6.40	7.50	7.51	0.80	0.07	91.72
6	10.94	10.12	10.38	10.48	0.80	0.05	93.73
7	11.10	12.14	11.15	11.46	0.80	0.04	94.98
8	13.48	14.65	13.90	14.01	0.80	0.05	93.73
24	23.65	22.35	23.10	23.03	0.80	0.04	94.86

Como se puede apreciar en el cuadro 4, a medida que el tiempo de contacto entre el agua y los clavos aumenta se da un incremento en la concentración de hierro presente en la mezcla, es decir, que a medida que transcurre el tiempo la cantidad de clavos de hierro oxidados que forman el hidróxido férrico es mayor.

Según los resultados obtenidos, la tendencia en el comportamiento de la oxidación de los clavos es similar, lo que se puede apreciar de mejor manera en la siguiente figura:

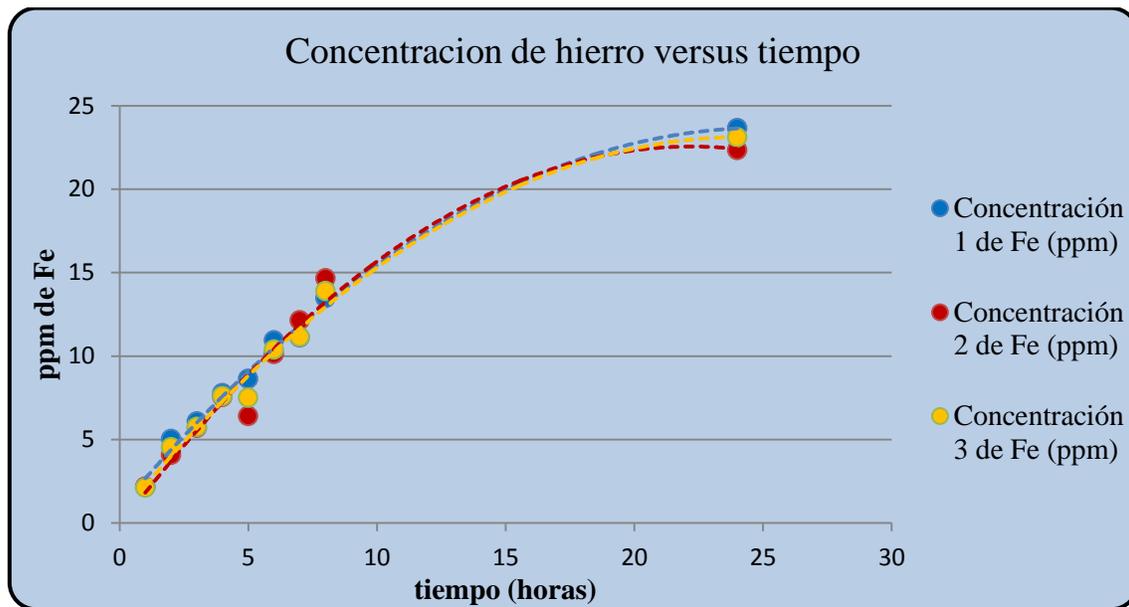


Figura 15. Formación de hidróxido de hierro III en el tiempo.

La concentración promedio más baja de hierro es de 2.14 ppm que corresponde al tiempo de una hora de contacto con el agua. La concentración promedio más alta de hierro es de 23.03 ppm que corresponde a 24 horas de interacción de los clavos con el agua.

En cuanto a la remoción de plomo se puede observar en el cuadro 4 que la menor concentración de plomo final en la muestras (plomo remanente) es de 0.04 ppm, que corresponde a un 94.86% de plomo removido, y la concentración mayor de plomo final en las muestras de agua es de 0.21 ppm (plomo remanente), que corresponde a un 74.03% de remoción.

Se puede generalizar que a medida que la concentración de hierro aumenta, la cantidad de plomo remanente en la muestra disminuye, lo que se aprecia mejor en la siguiente figura:

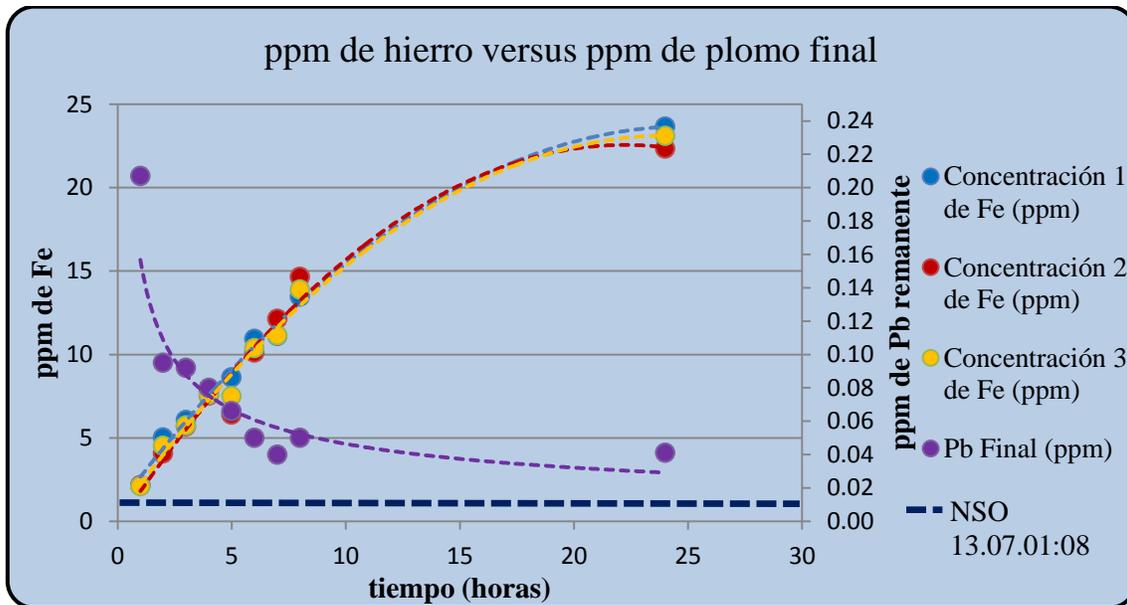


Figura 16. Relación entre la cantidad de Fe y la cantidad de plomo remanente.

A pesar de obtenerse altos porcentajes de remoción de plomo utilizando una relación de 5 g de clavos (10 clavos) y 100 ml de agua destilada, los resultados no cumplen con el límite establecido en la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua Potable NSO 13.07.01:08, que establece un máximo de plomo de 0.01 ppm para agua para consumo humano, por lo que se procedió a aumentar la cantidad utilizada de clavos de hierro.

La relación utilizada para realizar las nuevas pruebas y evaluar si se obtienen mejores resultados fue de 10 g de clavos (20 clavos) y 100 ml de agua destilada, los resultados obtenidos se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 5. Resultados obtenidos utilizando 10 g de clavos y 100 ml de agua destilada.

Formación de hidróxido de hierro a partir de clavos (10 g de clavos / 100 ml de agua)						
Horas	Concentración 1 de Fe (ppm)	Concentración 2 de Fe (ppm)	Promedio Concentración Fe (ppm)	Pb inicial (ppm)	Pb Final (ppm)	Porcentaje de remoción
1	5.98	6.24	6.11	1.01	0.014	98.61
2	9.00	9.78	9.39	1.01	0.012	98.81
3	9.30	10.70	10.00	1.01	0.010	99.01
4	13.80	14.75	14.28	1.01	0.010	99.01
5	9.50	8.63	9.07	1.01	0.011	98.91
6	18.80	18.50	18.65	1.01	0.009	99.11
7	19.40	20.90	20.15	1.01	0.010	99.01
8	23.40	26.20	24.80	1.01	0.008	99.21
24	45.30	48.90	47.10	1.01	0.005	99.50

Se puede observar en el cuadro 5 que al aumentar la relación de clavos en agua destilada se obtuvo un aumento en la concentración de hierro, que en la mayoría de los casos se duplica la concentración al compararla con la concentración de hierro obtenida en el cuadro 4, esto se puede apreciar mejor en la siguiente figura:

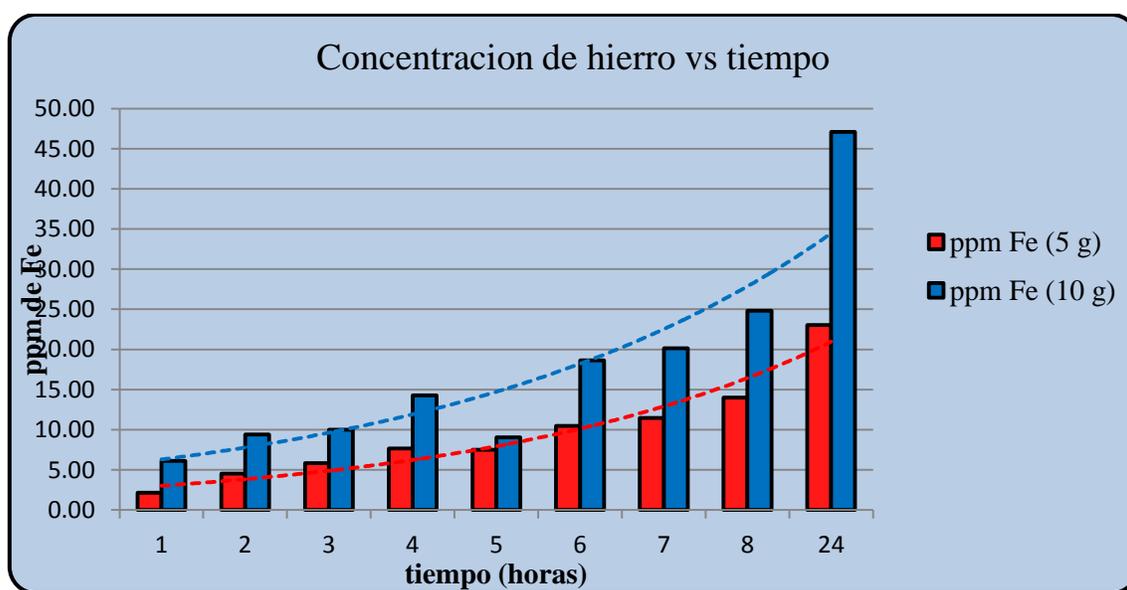


Figura 17. Comparación entre ppm de Fe y la relación cantidad de clavos en agua.

La concentración más baja de Fe obtenida con esta nueva relación de clavos de hierro y agua (10 g / 100 ml de agua) es de 6.11 ppm que corresponde a una hora de contacto de los clavos con el agua y la más alta es de 47.10 ppm que corresponde a 24 horas de contacto.

Según los resultados presentados en el cuadro 5, el porcentaje de remoción más bajo es de 98.61%, que corresponde a 0.014 ppm de plomo final (plomo remanente) en las muestras, y el porcentaje de remoción más alto fue de 99.5%, quedando una concentración de plomo final (plomo remanente) en la muestra de 0.005 ppm.

La relación entre la concentración de hierro y la retención de plomo se muestra en la siguiente figura:

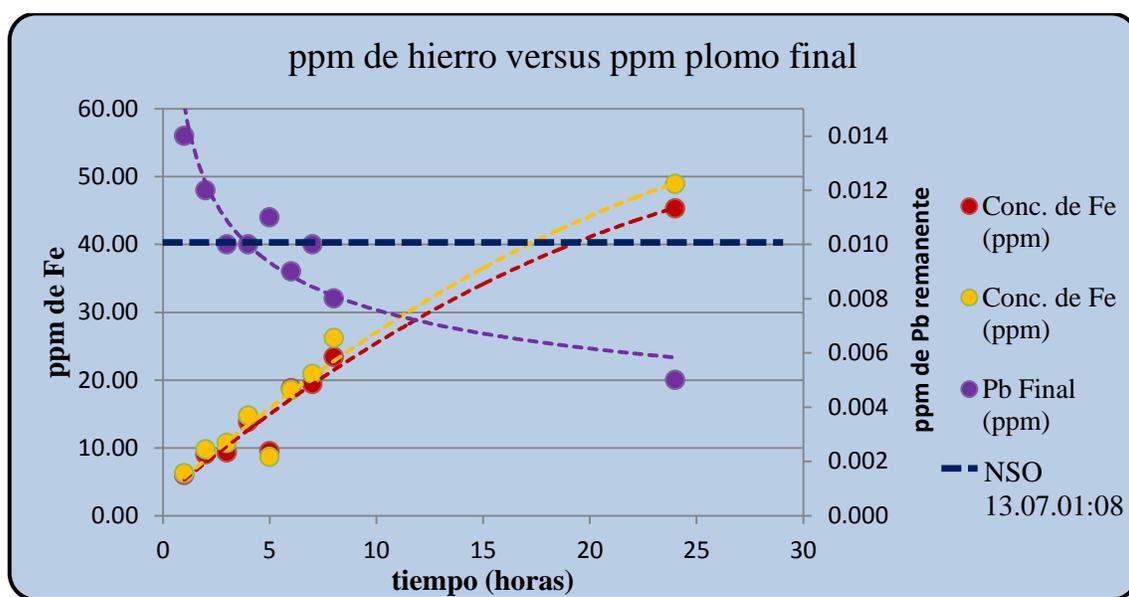


Figura 18. Relación entre cantidad de Fe y cantidad de plomo remanente.

Con la relación de 10 g de clavos (20 clavos) y 100 ml de agua destilada se logró aumentar el porcentaje de plomo removido, de tal manera que con la cantidad de hidróxido férrico formado en 24 horas es posible reducir la cantidad de plomo para cumplir con los límites establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria para Agua potable NSO 13.07.01:08.

En base a los resultados obtenidos, para evaluar las tecnologías se utilizó la relación de 10 g de clavos (20 clavos) y 100 ml de agua destilada para la producción del hidróxido férrico obtenido de la oxidación de clavos de hierro durante un tiempo de 24 horas, utilizando como mínimo una relación de 5 ml del coagulante formado por cada 100 ml de muestra a tratar.

Las cantidades de coagulante utilizados en la evaluación de cada una de las tecnologías fueron: 5 ml, 7.5 ml, 10 ml y 15 ml por cada 100 ml de muestra a tratar.

7.2 Evaluación de Tecnologías para la Remoción de plomo

7.2.1 Método de remoción asistida por luz solar (RAOS)

Los resultados obtenidos para las diferentes cantidades de coagulante utilizadas y los porcentajes de remoción obtenidos por el método RAOS se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 6. Determinación de la cantidad de coagulante para remover Pb por método RAOS.

Método RAOS					
Remoción de plomo					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de muestra	Concentración inicial de plomo (ppm)	Concentración final de plomo (ppm)	Cantidad de plomo removida	Porcentaje de Remoción
10	50	1.160	0.008	1.152	99.31
10	75	1.160	0.001	1.159	99.91
10	100	1.160	0.000	1.160	100.00
10	150	1.160	0.000	1.160	100.00

Se puede observar en el cuadro 6 que con 50 ml de coagulante adicionado por cada litro de muestra a tratar se cumple con la NSO 13.07.01:08, que establece un límite máximo de plomo de 0.01 ppm, sin embargo, el resultado obtenido se encuentra muy cercano a dicho límite, por lo que la cantidad mínima de coagulante que se consideró adecuada para ser utilizada con esta tecnología es la de 75 ml de coagulante por cada litro de muestra, obteniéndose con esta

relación una concentración de plomo final (plomo remanente) en la muestra de 0.001 ppm, que corresponde a un 99.91% de plomo removido, quedando con un valor 10 veces menor al establecido por la norma. Por lo que se considera este método eficiente en la remoción de plomo en agua.

Los resultados obtenidos en cuanto a la fiabilidad del método se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 7. Evaluación de la fiabilidad del método RAOS en la remoción de Pb.

Evaluación de la fiabilidad del Método RAOS					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de muestra	Concentración Inicial de plomo (ppm)	Concentración Final de plomo (ppm)	Cantidad de plomo removida	Porcentaje de Remoción
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.002	1.158	99.83
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
10	75	1.160	0.000	1.160	100.00
Promedios			0.0002	1.1598	99.98

El promedio obtenido en la remoción de plomo por el método RAOS utilizando una relación de clavos de 10 g por 100 ml y 75 ml de coagulante adicionado es del 99.98%.

7.2.2 Unidad de tratamiento con dos cubetas

Los resultados obtenidos para las diferentes cantidades de coagulante utilizadas y los porcentajes de remoción obtenidos por el método Unidad de tratamiento con dos cubetas se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 8. Determinación de la cantidad de coagulante para remover Pb por el método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas.

Método de las dos cubetas					
Remoción de plomo					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de muestra	Concentración Inicial de plomo (ppm)	Concentración final de plomo (ppm)	Cantidad de plomo removida	Porcentaje de Remoción
10	50	0.956	0.146	0.810	84.73
10	75	0.956	0.090	0.866	90.59
10	100	0.956	0.095	0.861	90.06
10	150	0.956	0.050	0.906	94.77
20	50	0.956	0.010	0.946	98.95
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	100	0.956	0.000	0.956	100.00
20	150	0.956	0.000	0.956	100.00

Se observa en el cuadro 8 que con ninguna de las cantidades de coagulante adicionadas utilizando una relación de 10 g de clavos en 100 ml de agua se logra cumplir con los límites máximos establecidos en la NSO 13.07.01:08; sin embargo, al duplicar la cantidad de clavos y mantener la misma relación de agua, se observa que con 75 ml de coagulante adicionado con esta nueva relación de clavos (20 g – 100 ml de agua) se cumple con la normativa que establece un límite máximo de plomo de 0.01 ppm.

Al utilizar 75 ml de coagulante por cada litro de muestra se obtuvo una concentración de plomo final (plomo remanente) en la muestra de 0.000 ppm (no detectado), que corresponde a

un 100% de plomo removido, por lo que se considera este método eficiente en la remoción de plomo en agua.

Los resultados obtenidos en cuanto a la fiabilidad del método se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 9. Evaluación de la fiabilidad del método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas en la remoción de Pb.

Evaluación de la fiabilidad del método de las dos cubetas					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de muestra	Concentración Inicial de plomo (ppm)	Concentración Final de plomo (ppm)	Cantidad de plomo removida	Porcentaje de Remoción
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	75	0.956	0.004	0.952	99.58
20	75	0.956	0.002	0.954	99.79
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	75	0.956	0.000	0.956	100.00
20	75	0.956	0.001	0.955	99.90
20	75	0.956	0.001	0.955	99.90
Promedios			0.0008	0.955	99.92

El promedio obtenido en la remoción de plomo por el método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas utilizando una relación de clavos de 20 g por 100 ml y 75 ml de coagulante adicionado es del 99.92%.

7.3 Evaluación de Tecnologías para la Remoción de Arsénico

7.3.1 Método de remoción asistida por luz solar (RAOS)

Los resultados obtenidos para las diferentes cantidades de coagulante utilizadas y los porcentajes de remoción obtenidos por el método RAOS se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 10. Determinación de la cantidad de coagulante para remover As por el método RAOS.

Método RAOS					
Remoción de arsénico					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de Muestra	Concentración inicial de arsénico (ppm)	Concentración final de arsénico (ppm)	Cantidad de arsénico removida	Porcentaje de Remoción
10	50	1.00	0.30	0.70	70.00
10	75	1.00	0.25	0.75	75.00
10	100	1.00	0.25	0.75	75.00
10	150	1.00	0.30	0.70	70.00
20	50	1.00	0.25	0.75	75.00
20	75	1.00	0.25	0.75	75.00
20	100	1.00	0.15	0.85	85.00
20	150	1.00	0.20	0.80	80.00
40	50	1.00	0.35	0.65	65.00
40	75	1.00	0.30	0.70	70.00
40	100	1.00	0.25	0.75	75.00
40	150	1.00	0.10	0.90	90.00

Se puede observar en el cuadro 10 que aunque se utilizó una relación de clavos – agua (40 g de clavo en 100 ml de agua) mayor que la utilizada para el caso de la remoción de plomo, la cantidad de arsénico final (arsénico remanente) es de 0.10 ppm, que corresponde a un

porcentaje de remoción del 90%, obtenido con la cantidad más alta de coagulante adicionado (150 ml), sin embargo, no se logra disminuir la concentración de arsénico para poder cumplir con el límite establecido para arsénico según la NSO 13.07.01:08, que establece un límite máximo de 0.01 ppm.

Los resultados obtenidos en cuanto a fiabilidad del método se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 11. Evaluación de la fiabilidad del método RAOS en la remoción de As.

Evaluación de la fiabilidad de la tecnología					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de Muestra	Concentración inicial de arsénico (ppm)	Concentración final de arsénico (ppm)	Cantidad de arsénico removida	Porcentaje de Remoción
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.200	0.800	80.00
40	150	1.000	0.200	0.800	80.00
40	150	1.000	0.200	0.800	80.00
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.300	0.700	70.00
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.200	0.800	80.00
Promedios			0.185	0.815	81.50

El promedio obtenido en la remoción de arsénico por el método RAOS utilizando una relación de clavos de 40 g por 100 ml y 150 ml de coagulante adicionado es del 81.5%.

7.3.2 Unidad de tratamiento con dos cubetas

Los resultados obtenidos para las diferentes cantidades de coagulante utilizadas y los porcentajes de remoción obtenidos por el método RAOS se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 12. Determinación de la cantidad de coagulante para remover As por el método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas.

Método de las dos cubetas					
remoción de arsénico					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de Muestra	Concentración inicial de arsénico (ppm)	Concentración final de arsénico (ppm)	Cantidad de arsénico removida	Porcentaje de remoción
10	50	1.00	0.30	0.70	70.00
10	75	1.00	0.27	0.73	73.00
10	100	1.00	0.30	0.70	70.00
10	150	1.00	0.30	0.70	70.00
20	50	1.00	0.25	0.75	75.00
20	75	1.00	0.25	0.75	75.00
20	100	1.00	0.30	0.70	70.00
20	150	1.00	0.20	0.80	80.00
40	50	1.00	0.30	0.70	70.00
40	75	1.00	0.20	0.80	80.00
40	100	1.00	0.15	0.85	85.00
40	150	1.00	0.10	0.90	90.00

Se puede observar en el cuadro 12 que al igual que el método RAOS se utilizó una relación de clavos – agua (40 g de clavo en 100 ml de agua) mayor que la utilizada para el caso de la remoción de plomo, la menor cantidad de arsénico final (arsénico remanente) es de 0.10 ppm, que corresponde a un porcentaje de remoción del 90%, obtenido con la cantidad más alta de coagulante adicionado, sin embargo, no se logra disminuir la concentración de arsénico necesaria para poder cumplir con el límite establecido para arsénico según la NSO 13.07.01:08, que establece un límite máximo de 0.01 ppm.

Los resultados obtenidos en cuanto a la fiabilidad del método se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 13. Evaluación de la fiabilidad del método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas en la remoción de As.

Evaluación de la fiabilidad de la tecnología					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de Muestra	Concentración inicial de arsénico (ppm)	Concentración final de arsénico (ppm)	Cantidad de arsénico removida	Porcentaje de remoción
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.100	0.900	90.00
40	150	1.000	0.100	0.900	90.00
40	150	1.000	0.200	0.800	80.00
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.150	0.850	85.00
40	150	1.000	0.250	0.750	75.00
40	150	1.000	0.200	0.800	80.00
40	150	1.000	0.250	0.750	75.00
40	150	1.000	0.100	0.900	90.00
Promedios			0.165	0.835	83.50

El promedio obtenido en la remoción de arsénico por el método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas utilizando una relación de clavos de 40 g por 100 ml y 150 ml de coagulante adicionado es del 83.5%.

7.4 Análisis estadístico

a) Prueba “t” de student para el análisis de diferencias de medias: porcentaje de remoción

Se puede apreciar en el cuadro 14 que el comportamiento de ambos métodos según el metal involucrado es similar, es decir, que los promedios de porcentajes de remoción están cercanos.

Cuadro 14. Comparación de resultados de porcentaje de remoción obtenidos por las metodologías RAOS y dos cubetas para plomo y arsénico.

Comparación del porcentaje de remoción obtenido por cada tecnología				
	Plomo		Arsénico	
Repetición	Porcentaje de remoción método RAOS	Porcentaje de remoción método dos cubetas	Porcentaje de remoción método RAOS	Porcentaje de remoción método dos cubetas
1	100.00	100.00	85.00	85.00
2	100.00	100.00	80.00	90.00
3	100.00	99.58	80.00	90.00
4	99.83	99.79	80.00	80.00
5	100.00	100.00	85.00	85.00
6	100.00	100.00	85.00	85.00
7	100.00	100.00	85.00	75.00
8	100.00	100.00	70.00	80.00
9	100.00	99.90	85.00	75.00
10	100.00	99.90	80.00	90.00

Según los resultados obtenidos (anexo 11) para el caso de los porcentajes de remoción de **plomo** por ambos métodos, la “t” calculada es **1.605** y el valor crítico de “t” (“t” de tablas para dos colas, ya que puede ser mayor o menor las diferencias entre las medias) es de **2.262**, entonces: “t” calculada se ubica en la región de aceptación de la hipótesis nula (figura 15), es decir, que no hay diferencias significativas entre los resultados obtenidos por el método RAOS y el método de la unidad de tratamiento con dos cubetas.

Para el caso del **arsénico**, los resultados obtenidos (anexo 11) son los siguientes: la “t” calculada es **-0.802** y el valor crítico de “t” (“t” de tablas para dos colas, ya que puede ser mayor o menor las diferencias entre las medias) es de **2.262**, entonces: “t” calculada se ubica en la región de aceptación de la hipótesis nula (figura 15), es decir, que no hay diferencias significativas entre los resultados obtenidos por el método RAOS y el método de la unidad de tratamiento con dos cubetas.

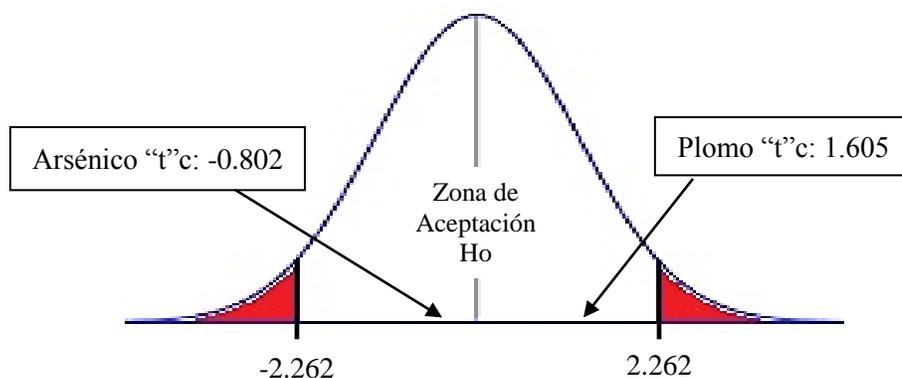


Figura 19. Ubicación de la “t” calculada en la curva de distribución normal.

b) Prueba “t” de student para el análisis de una sola media: concentración de plomo y arsénico remanente.

Los resultados que se presentan en el cuadro 15 fueron comparados con el límite máximo permitido por la NSO 13.07.01:08, que para plomo y arsénico es de 0.01 ppm.

Cuadro 15. Comparación de resultados de remanentes obtenidos por las metodologías RAOS y dos cubetas para plomo y arsénico.

ppm remanentes obtenidos por cada tecnología (ppm)				
Repetición	Plomo		Arsénico	
	Método RAOS ppm (en muestra)	Método dos cubetas (ppm en muestra)	Método RAOS ppm (en muestra)	Método dos cubetas (ppm en muestra)
1	0.000	0.000	0.150	0.150
2	0.000	0.000	0.200	0.100
3	0.000	0.004	0.200	0.100
4	0.002	0.002	0.200	0.200
5	0.000	0.000	0.150	0.150
6	0.000	0.000	0.150	0.150
7	0.000	0.000	0.150	0.250
8	0.000	0.000	0.300	0.200
9	0.000	0.001	0.150	0.250
10	0.000	0.001	0.200	0.100

- **Análisis estadísticos para plomo**

Los resultados obtenidos de la prueba “t” de student (anexo 11), para **plomo** remanente son los siguientes:

Método RAOS, “t”_c = **-49.0**

Método de las dos cubetas, “t”_c = **- 22.0**

El valor crítico de “t” (“t” de tablas para una cola, ya que se está probando si los valores son menores que el límite establecido en la normativa) es de **-1.833**, entonces, el valor de “t” calculado se ubica en la región de rechazo de la H₀, es decir que los valores obtenidos para plomo por ambos métodos se mantiene por debajo del valor de referencia establecido en la normativa que es de 0.01 ppm para ambos casos.

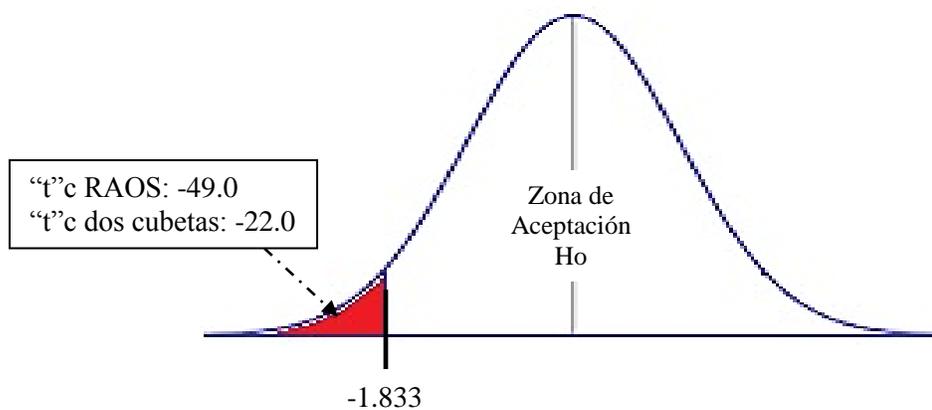


Figura 20. Ubicación de “t” calculada para resultados de plomo.

- **Análisis estadísticos para arsénico**

Para el caso del **arsénico** los resultados obtenidos de la prueba “t” de student (anexo 11) son los siguientes:

Método RAOS, “t”_c = **11.67**

Método de las dos cubetas, “t”_c = **8.45**

El valor crítico de “t” (“t” de tablas para una cola, ya que se está probando si los valores son mayores que el límite establecido en la normativa) es de **1.833**, entonces, el valor de “t” calculado se ubica en la región de rechazo de la H₀, es decir, que los valores obtenidos para

arsénico por ambos métodos se mantiene por encima del valor de referencia establecido en la normativa.

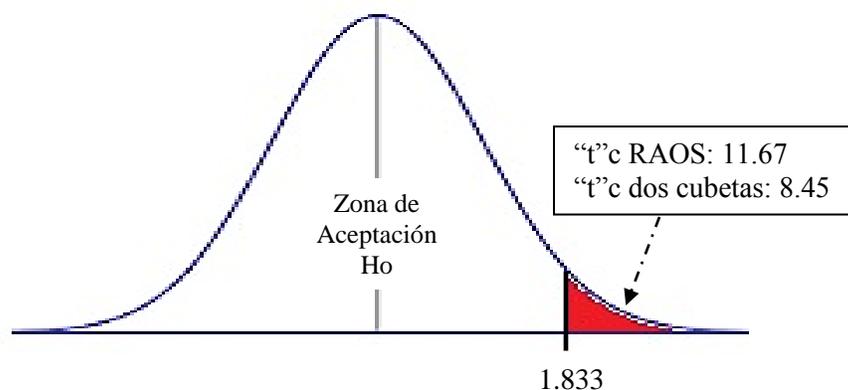


Figura 21. Ubicación de “t” calculada para resultados de arsénico.

7.5 Determinación de los costos de fabricación y de operación.

Para determinar los costos de fabricación de cada una de las tecnologías, se detallan los materiales utilizados y el precio de cada uno de ellos en el cuadro siguiente:

Cuadro 16. Materiales utilizados para el método RAOS.

Costos de fabricación método RAOS		
Material	Cantidad	Costo (dólares)
Frascos plásticos (PET) de 2 litros	2 unidad	1.20
Frasco plástico (PET) de un galón	1 unidad	1.00
Embudo plástico	1 unidad	0.65
Cubeta plástica de 20 litros	1 unidad	4.00
Total		6.85

El costo aproximado para implementar el método RAOS es de seis 85/100 dólares (6.85 dólares), cabe mencionar que estos materiales pueden adquirirse de otras fuentes como por ejemplo el reciclaje de envases de refrescos que sean transparentes, estos funcionan muy bien y disminuyen los costos de fabricación.

Para la operación de este método se necesitan los siguientes materiales:

Cuadro 17. Materiales utilizados en la operación del método RAOS.

Costos de operación		
Material	Cantidad	Costo (dólares)
Clavos de 1 pulgada	1 libra	1.35
Algodón	6 libras	23.46
Limón	24 unidades	2.40
Total		27.21

El costo de operación determinado es anual, tomando en cuenta que la libra de algodón sirve para la operación de dos meses aproximadamente y que se comprarían dos limones al mes. Una libra de clavos es suficiente para producir el hidróxido de hierro (agente coagulante) necesario para todo el año, por lo que el costo de operación es aproximadamente de veintisiete 21/100 dólares (27.21 dólares).

Para el caso del método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas se detallan los costos de fabricación en el cuadro siguiente:

Cuadro 18. Materiales utilizados para el método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas.

Costos de fabricación unidad de tratamiento con dos cubetas		
Material	cantidad	Costo (dólares)
Cubeta plástica (PET) de 10 litros	2 unidades	6.60
Cubeta plástica de 20 litros	1 unidad	4.00
Frasco plástico de un galón	1 unidad	1.00
Malla metálica de 12 mm	1 yarda	2.35
Malla metálica de 6 mm	1yarda	2.85
Malla metálica de 1 mm	1 yarda	2.25
Manguera plástica 5/16 pulgadas	1 yarda	0.45
Manguera plástica 1/4 pulgadas	1 yarda	0.29
Grifo plástico para oasis	2 unidades	3.20
Algodón	1libra	3.91
Arena de río	1 saco	1.00
Total		27.90

El costo aproximado para la elaboración de la unidad de tratamiento con dos cubetas es de veintisiete 90/100 dólares (27.90 dólares), estos materiales pueden ser adquiridos en cualquier ferretería.

Para la operación de este método se necesitan los siguientes materiales:

Cuadro 19. Materiales utilizados en la operación del método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas.

Costos de operación		
Material	Cantidad	Costo (dólares)
Clavos de 1 pulgada	1 libra	1.35
Algodón	6 libra	23.46
Lejía	12 bolsas (250 ml)	2.76
Total		27.57

El costo de operación calculado es anual, tomando en cuenta que la libra de algodón sirve para la operación de dos meses, y que se compraría una bolsa de lejía al mes. Una libra de clavos es suficiente para producir el hidróxido de hierro (agente coagulante) necesario para todo el año, por lo que el costo de operación es aproximadamente de veintisiete 57/100 dólares (27.57 dólares).

VIII. Conclusiones

- El porcentaje promedio de remoción de plomo obtenido por el método RAOS fue del 99.98% (0.0002 ppm de plomo remanente) y por la Unidad de tratamiento con dos cubetas fue del 99.92% (0.0008 ppm de plomo remanente), en ambos casos la cantidad de plomo remanente en las muestras cumple con la NSO 13.07.01:08, que establece un límite máximo para plomo de 0.01 ppm en agua para consumo humano.
- El porcentaje promedio de remoción de arsénico obtenido por el método RAOS fue del 81.5% (0.185 ppm de arsénico remanente) y por la Unidad de tratamiento con dos cubetas fue de 83.5% (0.165 ppm de arsénico remanente), en ambos casos la cantidad de arsénico remanente en las muestras no cumple con la NSO 13.07.01:08, que establece un límite máximo para arsénico de 0.01 ppm en agua para consumo humano.
- Según el análisis estadístico para comparación de diferencia de medias, con un nivel de confianza del 95% y nueve grados de libertad, no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por el método RAOS y los obtenidos por el método de la Unidad de tratamiento con dos cubetas.
- La capacidad de ambos métodos para remover plomo es mayor que para remover arsénico, esto se debe a dos causas posibles:
 - a) La electronegatividad que posee el plomo (1.8) es menor que la del arsénico (2.0), por lo tanto el plomo es más electro-positivo que el arsénico, por lo que es adsorbido con mayor facilidad.
 - b) El peso atómico del plomo (217.19 g/mol) es aproximadamente tres veces mayor que el peso del arsénico (74.92 g/mol), lo que hace al plomo más fácil de sedimentar.

- Los métodos evaluados solo contribuyen al mejoramiento de la calidad del agua desde el punto de vista químico y no microbiológico, de manera que se debe tener presente que es necesaria la utilización de un proceso de desinfección del agua en aquellos casos que se vaya a utilizar para el consumo humano.

IX. Recomendaciones

- Es importante realizar una caracterización físico-química del agua que se va a tratar, para verificar qué metales están presentes y en qué concentraciones, de manera que no se sobrepase la capacidad de adsorción de la cantidad del coagulante utilizado, y de ser necesario realizar los ajustes pertinentes en la cantidad de coagulante adicionado.
- El filtro de arena debe utilizarse diariamente, de lo contrario se puede originar crecimiento de microorganismos en grandes cantidades, que provocaran la aparición de malos olores en el agua tratada. Si el filtro deja de usarse es necesario que se desinfecte antes de utilizarlo nuevamente.
- Si durante el proceso de filtración en ambos métodos se observan pequeñas partículas de color amarillo, no consumir el agua, ya que esto indica que no se están reteniendo los flóculos formados, es decir, que el filtro no se elaboró correctamente y lo mejor es repetir el proceso de elaboración de la unidad filtrante.
- Utilizar plástico PET (tereftalato de polietileno) para la fabricación de ambas metodologías ya que estos son resistentes a la exposición a los rayos solares y al calor.
- Realizar estudios microbiológicos en el agua tratada de manera que se puedan complementar con proceso de desinfección y así mejorar la calidad de la misma.
- Durante el proceso de elaboración de la unidad filtrante evitar lavar la arena en exceso, ya que esto disminuye la capacidad de retención de los coágulos de hidróxido de hierro.
- Desarrollar investigaciones adicionales que ayuden a mejorar el porcentaje de remoción del arsénico en agua para consumo humano, con la finalidad que se cumpla con el límite máximo establecido en la NSO 13.07.01:08.

X. Bibliografía

- ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, SV). 2015. Calidad del agua (en línea). Consultado 23 de febrero de 2015. Disponible en <http://www.anda.gob.sv/>
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American waters works Association), WPCF (Water Pollution Control Federation). 1992. Métodos Normalizados Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Determinación de hierro en agua. 17 Ed. Madrid, España. Ediciones Díaz de Santos S.A. p. 3-114; 3-21 a 3-27.
- Barrenechea, A. 2009. Aspectos físico químicos de la calidad del Agua (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoI/uno.pdf>
- Benitez, M; Osicka, R.; Gimenez, M.; Garro, O. 2000. arsénico total en aguas subterráneas en el centro-oeste de la provincia de Chaco. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. sp.
- Caussy, D; Gochfeld, M; Gurzau, E; Neagu, C; Ruedel, H. 2003. "Lessons from case studies of metals: investigating exposure, bioavailability, and risk". Ecotoxicology and Environmental Safety. p. 45-51.
- Chávez, ML; Toledo, M. 2011. Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. Revista de Sociedad de Químicos. Perú (en línea). vol.77, n.4. 307-314 p. Disponible en http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2011000400008&script=sci_arttext

- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, PE), OPS (Organización Panamericana de la Salud, PE). 2006. Presencia de arsénico en agua de bebida en América Latina y su Efecto a la Salud Pública (en línea). Consultado 1 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/arsenico-agua.pdf>

- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, UK); OPS (Organización Panamericana de la Salud, UK). 1999. Curso de auto instrucción en evaluación de riesgos (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/tutorial/casos/caso3/plom.html>

- Coagulantes del cinco. 2012. Tratamiento de aguas (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en http://www.coagulantesdelcinco.com/productos.php?sub_menu=1&subsub_menu=1

- Cobble, JW. 1964. Treatise on analytical chemistry Part II (en línea). Consultado 20 de Junio de 2013. Disponible en <http://al-quimicos.blogspot.com/2008/12/plomo.html>

- CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, SV). 2009. Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07. 01:08 Agua, Agua Potable (en línea). Consultado 2 junio de 2013. Disponible en http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/normas/NORMA_AGUA_POTABLE_2_a.pdf

- Development Alternatives. 2011. SODIS, Solar solution for clean drinking water (en línea). Consultado 20 de Agosto 2013. Disponible en <http://www.devalt.org/sODIS.aspx>

- Educación Sin Fronteras. 2013. Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) (en línea). Consultado 28 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.objetivosdelmilenio.com/ObjetivosDelMilenio.asp#ODM7>

- ECO (Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, US); OPS (Organización Panamericana de la Salud, US); OMS (Organización Mundial de la Salud, US), USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US). 1994. Epidemiología Ambiental un Proyecto para América Latina y El Caribe (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsea/e/fulltext/epidemio/epidemio.pdf>

- ECO (Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, MX); OPS (Organización Panamericana de la Salud, MX); OMS (Organización Mundial de la Salud, MX). 1997. Evaluación de Riesgos para la Salud en la Población Expuesta a Metales en Bolivia (en línea). Consultado 20 de Junio de 2013. Disponible en <http://al-quimicos.blogspot.com/2008/12/plomo.html>

- EPA (Agencia de Protección Ambiental, US). 2012. Reglamento Nacional Primario de Agua Potable (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en <http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/currentregulations.cfm>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura IT). 2013. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?. Informe técnico sobre recursos hídricos (en línea). Consultado 23 de febrero de 2015. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf>

- Farajzadeh, MA; Monji, AB. 2004. "Adsorption characteristics of wheat bran towards heavy metal cations". Separation and Purification Technology. p. 197-207

- Fontanería Gil. 2010. Sustitución de tuberías antiguas fabricadas a base de plomo (en línea). Consultado 8 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.fontaneriagil.es/tuberias-de-plomo/>

- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, MX). 2011. Construcción de filtros biológicos de arena como sistemas de desinfección unifamiliares en comunidades rurales (en línea). Consultado 20 de Junio 2013. Disponible en <http://www.imta.mx/gaceta/anteriores/g56-12-2011/filtros-biologicos-arena.html>

- Kobya, M; Demirbas, E; Senturk, E; Ince, M. 2005. "Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone". *Bioresource Technology* **96**: 1518–1521 p.

- Lenntech. 2012. Plomo (Pb) y Agua (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.lenntech.es/plomo-y-agua.htm#ixzz2UxR4Plcv>

- Lenntech. s.f. Enfermedades transmitidas por el agua: Arsenicosis (en línea). Consultado 18 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.lenntech.es/biblioteca/enfermedades/ascariasis/arsenicosis.htm>

- Manual de Procedimientos de equipo fotométrico NOVA 60. s.f. Determinación de plomo en agua. Método: 09717 (Test con reactivos). sp.

- Milarium. 2008. Procedencia Natural del arsénico (en línea). Consultado 8 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Arsenico/ArsenicoNatural.asp>

- OMS (Organización Mundial de la Salud, US). 2013a. Centro de prensa, Contaminación por arsénico (en línea). Consultado 20 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/index.html>

- OMS (Organización Mundial de la Salud, US). 2013b. Objetivos del Milenio (en línea). Consultado 28 de Junio de 2013. Disponible en http://www.who.int/topics/millennium_development_goals/es/

- OMS (Organización Mundial para la Salud, CH). 2006. Guías para la calidad del agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (en línea). Consultado 1 de Junio de 2013. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/22228198/Guias-Para-La-Calidad-Del-Agua-Potable-OMS>

- OMS (Organización Mundial para la Salud, CH) 2004. Guías para la Calidad de Agua Potable. Volumen 1, Recomendaciones (en línea). Consultado 23 de febrero de 2015. Disponible en http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3sp.pdf

- 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 1 de Junio de 2013. Disponible en http://www.bvsde.opsoms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d25/067%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20mejoramiento%20de%20la%20calidad%20del%20agua%20a%20nivel%20casero/guia-mejor_agua_metodocasero.pdf

- Purepro. 2008. La osmosis Inversa (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en <http://purepro.com.ve/osmosis.html>

- Raymond Chang. 2002. Química. Trad. MC Ramírez. 7 ed. México, DF, McGRAW-HILL. p. 769.

- Sancha, AM; O`Ryan, R; Marchetti; Ferreccio, C. 1998. Análisis de Riesgo en la Regulación Ambiental de Tóxicos: Caso del arsénico en Chile. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima – Perú. s.p.

- SEDEPAL (Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico, PE) 2000. Tratamiento de Agua: Coagulación-floculación (en línea). Consultado 23 de febrero de 2015. Disponible en

<http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>

- 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 1 de Junio de 2012. Disponible en <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00246/doc00246-contenido.pdf>

- Troposfera. 2005. Portal temático de contaminación Atmosférica. Plomo (en línea). Consultado 16 de Junio de 2013. Disponible en <http://www.troposfera.org/conceptos/contaminantes-quimicos-de-la-atmosfera/plomo-pb/>

- Universidad de Arizona. 2011. El plomo y la Salud (en línea). Consultado 3 de Julio de 2013. Disponible en <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/content/el-plomo-y-la-salud>

- Universidad de las Américas Puebla. 2008. Blog de cursos y estudiantes de Químicas del Departamento de Ciencias Químico-Biológicas. Plomo (en línea). Consultado 1 de Junio de 2013. Disponible en <http://al-quimicos.blogspot.com/2008/12/plomo.html>

- Wordpress. 2009. Arsénico en el agua (en línea). Consultado 1 de Junio de 2013. Disponible en <http://carianinahuel154107.files.wordpress.com/2009/05/mapa1.gif?w=510>

XI. Anexos

Anexo 1. Elaboración de la Unidad de tratamiento con dos cubetas



a. Ubicación de marca para chorro.



b. Perforación del orificio para ubicar el chorro.



c. Prueba del tamaño del orificio con el chorro.



d. Colocación del chorro.

Anexo 2. Preparación de la arena de río



a. Rocas retenidas por malla de 6 mm.



b. Rocas retenidas por malla de 1 mm.



c. Rocas que atraviesan la malla de 1 mm.



d. Lavado de las diferentes rocas.



e. Rocas listas para ser utilizadas.

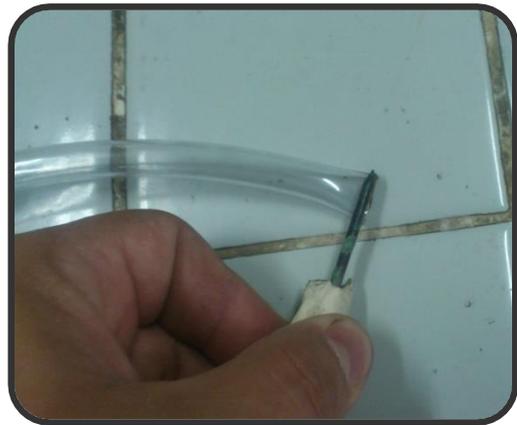


f. Prueba de lavado de rocas.

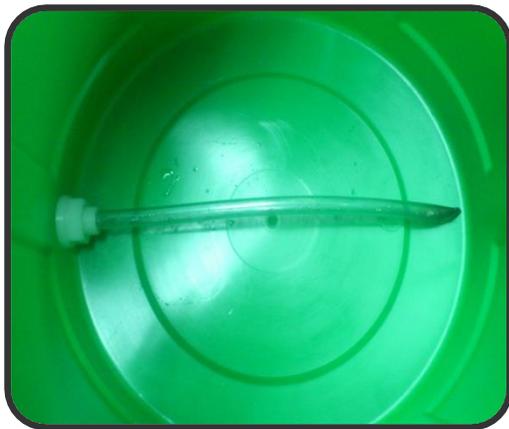
Anexo 3. Elaboración de la unidad de filtración



a. Perforación de la manguera de 5/16".



b. Sellado de la manguera de 5/16".



c. Ubicación de la manguera.



d. Ubicación de la capa de algodón.



e. Colocación de la capa de drenaje.



f. Colocación de la capa de soporte.

Anexo 4. Elaboración del embudo para filtración.



a. Perforación del tapón.



b. Recorte de la botella.



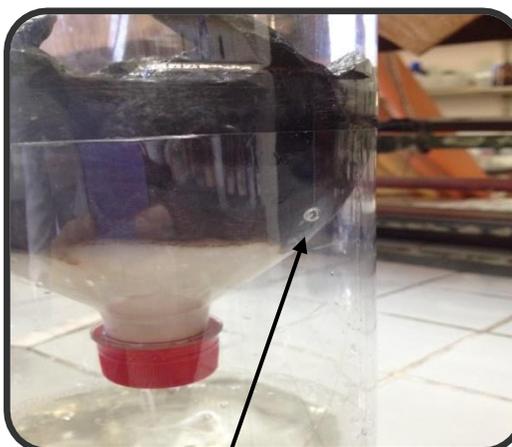
c. Ubicación de la capa de algodón.



d. Adición de agua.



e. Colocación de la capa de grava.



f. Orificio para evitar presión.

Anexo 5. Determinación de plomo en agua. Método: 09717. Test con reactivos ref. Merck

1.09717.0001

a. Fundamento del Método

En solución alcalina los iones plomo (II) forman con 4-(2-piridilazo)-resorcina (PAR) un complejo rojo que se determina fotométricamente.

b. Tratamiento de la Muestra

Analizar las muestras inmediatamente después de la toma de muestras. En otro caso conservar con ácido nítrico al 65 % (1 ml de ácido nítrico para 1 l de solución de la muestra). Las muestras con más de 5,00 mg/l de Pb deben diluirse con agua destilada antes de la disgregación y el valor del pH debe encontrarse en el intervalo 3 - 6. Si es necesario, ajustar con solución diluida de amoníaco o con ácido nítrico. Filtrar las muestras que estén turbias utilizando Watman 42.

c. Reactivos:

- Frasco de reactivo Pb-1.
- Frasco de reactivo Pb-2.
- Ácido nítrico 65%.
- Amoníaco en solución 25%.
- Ácido nítrico Titrisol
- plomo - solución patrón

d. Equipo

- Tubos de ensayo con tapa roscada
- Termorreactor.
- pH-metro
- Pipetas para volúmenes de 0.50 y de 8.0 ml
- Cubetas rectangulares 10, 20 y 50 mm.
- Auto-Selector.

e. Procedimiento:

1. Asegurarse que la muestra tratada se encuentre en un rango de temperatura de 10 a 40° C.
2. Pipetear 0.5 ml del reactivo Pb-1 en un tubo de ensayo con tapón con rosca.
3. Pipetear 0.5 ml del reactivo Pb-2 en el mismo tubo y agitar.
4. Adicionar 8.0 ml de la muestra al tubo que contiene la mezcla de reactivos, tapar el tubo y agitar.
5. La muestra está lista para realizar la medición.

f. Medición

1. Encender el equipo fotométrico Nova 60 e introducir el Auto-Selector que corresponde al método para la determinación de plomo en agua.
2. Transferir la muestra previamente preparada a una cubeta rectangular, dependiendo del rango de concentración en el que se encuentre de la siguiente manera:
Cubeta de 50 mm: si el intervalo de concentración es de 0.01 – 1.00 ppm de Pb.
Cubeta de 20 mm: si el intervalo de concentración es de 0.05 – 2.5 ppm de Pb.
Cubeta de 10 mm: si el intervalo de concentración es de 0.10 – 5.0 ppm de Pb.
3. Limpiar la cubeta con papel toalla e introducirla en el fotómetro.
4. Anotar el valor de concentración directamente; si se realizó alguna dilución de la muestra multiplicar por el factor de dilución para obtener el resultado.
5. El resultado esta expresado en mg/l de plomo.

Anexo 6. Determinación de arsénico por el método colorimétrico Merck ref. 1.17927.0001

a. Fundamento del Método

Por adición de cinc en polvo, de un ácido sólido y -para eliminación de iones sulfuro interferentes- de un oxidante a los compuestos de arsénico (III) y arsénico (V) se libera hidruro de arsénico, que con bromuro de mercurio (II) contenido en la zona de reacción de la tira de ensayo forma halogenuros pardo amarillos mixtos de arsénico y mercurio. La concentración de arsénico (III) y arsénico (V) se determina semicuantitativamente por comparación visual de la zona de reacción de la tira de ensayo con las zonas de una escala colorimétrica.

b. Tratamiento de la Muestra

Las muestras con más de 0,50 mg/l de As deben diluirse con agua destilada.

c. Reactivos:

- Tiras de ensayo
- Reactivo As-1
- Reactivo As-2
- Reactivo As-3

d. Equipo

- Frascos de reacción con tapa roscada y fijador de tiras de ensayo.

e. Procedimiento:

1. Transferir la muestra preparada al frasco de reacción y llevar el volumen hasta la marca indicada en el frasco (60 ml).
2. Adicionar dos gotas del reactivo As-1 y agitar suavemente.
3. Adicionar 1 cucharada del reactivo As-2 y agitar ligeramente hasta que todo el reactivo se haya disuelto completamente.
4. Adicionar 1 cucharada del reactivo As-3 y tapar inmediatamente el frasco de reacción.

5. Desplegar hacia arriba el fijador de tiras integrado en la tapa roscada de manera que el punto blanco señale hacia el usuario. Introducir inmediatamente en la abertura la tira de ensayo con la zona de reacción delante hasta la marca y plegar de nuevo el fijador de tiras totalmente hacia abajo.
6. Dejar en reposo 20 minutos, agitando ligeramente dos o tres veces en forma circular, evitando el contacto entre la tira de ensayo y la solución.

f. Medición

1. Transcurrido los 20 minutos sacar la tira, sumergirla brevemente en agua destilada, sacudirla para eliminar el exceso de líquido.
2. Comparar el color de la zona de reacción de la tira de la mejor manera posible de acuerdo con la escala de colores y anotar el correspondiente valor de medición en mg/l de As.
3. Si se realizó alguna dilución de la muestra multiplicar por el factor de dilución para obtener el resultado.
4. Si la coloración obtenida es superior al rango de medición (de 0.005 a 0.5 mg/l de As), repetir el procedimiento con nuevas diluciones.

Anexo 7. Determinación de hierro en agua por espectrofotometría de absorción atómica

Referencia.

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

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 Fe que proporciona una longitud de onda de 248.3 nm. La cantidad de energía absorbida por la muestra está relacionada directamente con la concentración de hierro en la misma.

b. **Tratamiento de la Muestra**

El tratamiento es necesario en el caso de que la muestra contenga una sustancia orgánica o que la muestra contenga el elemento a valorar como un coloide o complejo metálico aún si luce clara. Se lleva a cabo ya sea por la adición de varios ácidos para la descomposición de la muestra por calentamiento o calcinación por calentamiento.

c. **Digestión con ácido clorhídrico o ácido nítrico**

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

d. **Reactivos**

- Solución estándar de Fe (20 µg de Fe/ml)
- Ácido clorhídrico concentrado.
- Agua destilada.

e. **Equipo**

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica de llama.

- Hot plate.
- Cristalería de laboratorio en general.

f. 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 destilada 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 0.3, 2.0 y 6.0 ppm de Fe partiendo de la solución estándar de Fe (20 μg de Fe/ml), utilizando frascos volumétricos de 100 ml, luego adicionar ácido clorhídrico de manera de obtener similares condiciones como en la muestra. Llevar a volumen con agua.

g. Medición

1. Encender el equipo e introducir los parámetros necesarios para la determinación de hierro:
 - Longitud de onda: 248,3 nm
 - Estándares a utilizar: 0.3, 2.0 y 6.0 ppm de Fe
 - 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 utilizara 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 hierro.

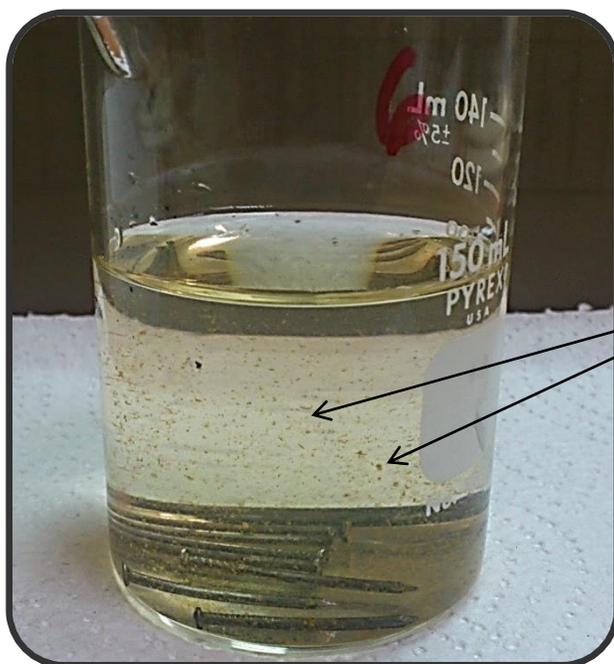
Anexo 8. Formación del hidróxido de hierro III



a. Colocación de clavos.



b. Adición de agua destilada.



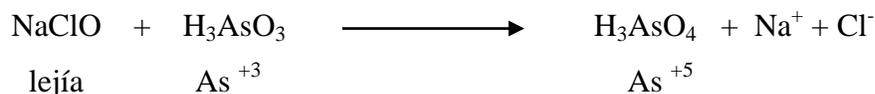
Coágulos de hidróxido férrico formados a partir de clavos de hierro

c. Formación de coágulos.

Anexo 9. Cantidad de lejía y gotas de limón (Agentes oxidantes)

a) Cálculo de lejía

La reacción de oxidación del arsénico +3 a arsénico +5 por la acción del hipoclorito de sodio (lejía comercial), sigue de forma general la siguiente ecuación química:



Siguiendo la estequiometría de la ecuación química, se necesita de un mol de hipoclorito de sodio para provocar la oxidación de un mol de arsénico.

Peso molecular NaClO: 74.46 g/mol

Peso atómico del arsénico: 74.92 g/mol

Si la concentración de arsénico a trabajar será de 1 ppm (mg/l), y 1mg = 0.001 g, entonces:

$$0.001 \text{ g de As} \times \frac{74.46 \text{ g de NaClO}}{74.92 \text{ g As}} = 0.001 \text{ g de NaClO}$$

La lejía comercial utilizada comúnmente en los hogares posee un porcentaje de hipoclorito de sodio del 4 al 6% p/v, es decir:

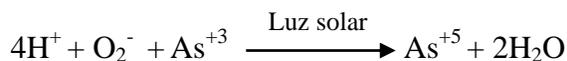
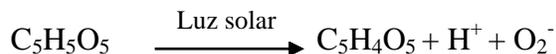
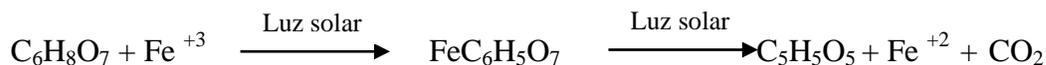
$$\begin{array}{l} 5 \text{ g de NaClO} \text{ ----- } 100 \text{ ml de lejía} \\ 0.001 \text{ g NaClO} \text{ ----- } x \\ x = 0.02 \text{ ml de lejía.} \end{array}$$

Si 20 gotas equivalen a un mililitro, entonces 0.02 mililitro equivalen a 0.4 gotas, se utilizaría una gota.

En conclusión, para oxidar al arsénico +3 a arsénico +5 se adicionaría una gota de lejía por cada litro de solución de 1 parte por millón (ppm) de arsénico a tratar.

b) Cálculo de jugo de limón

La reacción de oxidación del arsénico +3 a arsénico +5 por la acción del súper-óxido formado a partir del citrato de hierro en presencia de radiación solar, sigue la siguiente ecuación química:



Siguiendo la estequiometría de la ecuación química, se necesita de un mol de ácido cítrico para provocar la oxidación de 2 moles de arsénico.

Peso molecular $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$: 192 g/mol

Peso atómico del arsénico: 74.92 g/mol

Si la concentración de arsénico a trabajar será de 1 ppm (mg/l), y 1mg = 0.001 g, entonces:

$$0.001 \text{ g de As} \times \frac{192 \text{ g de } \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7}{74.92 \text{ g As}} = 0.0026 \text{ g de } \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$$

El porcentaje de ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) promedio en el jugo de limón es del 5 al 6% p/v, es decir:

5 g de $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	-----	100 ml de jugo
0.0026 g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	-----	X
		X= 0.051 ml de jugo de limón.

Si 20 gotas equivalen a un mililitro, entonces 0.051 mililitro, equivalen a 1.02 gotas, se utilizará una gota.

En conclusión, para oxidar al arsénico +3 a arsénico +5 se adicionaría una gota de jugo de limón por cada litro de solución de 1 parte por millón (ppm) de arsénico

Anexo 10. Ejemplo del cálculo del porcentaje de remoción

La fórmula a utilizar para el cálculo del porcentaje de remoción es:

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

Si tomamos como ejemplo los datos obtenidos en el cuadro 6 del numeral 7.2.1 de la fila que se encuentra marcada en amarillo, veremos que la concentración inicial para el caso del plomo es de 1.160 ppm y que la concentración final es de 0.001 ppm entonces:

$$\% \text{ de remoción: } \frac{(1.160 - 0.001) \times 100}{1.160} = 99.91$$

De esta manera se calculó para cada uno de los resultados obtenidos por cada método.

Cuadro 6. Determinación de la cantidad de coagulante para remover Pb por método RAOS

Método RAOS					
Remoción de plomo					
Gramos de clavos por 100 ml	Mililitros de coagulante por litro de muestra	Concentración inicial de plomo (ppm)	Concentración final de plomo (ppm)	Cantidad de plomo removida	Porcentaje de Remoción
10	50	1.160	0.008	1.152	99.31
10	75	1.160	0.001	1.159	99.91
10	100	1.160	0.000	1.160	100.00
10	150	1.160	0.000	1.160	100.00

Anexo 11. Cuadro de resultados según herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel

Cuadro resumen generado para la prueba t de student para análisis de diferencia de medias, método RAOS y dos cubetas para remoción de **plomo**.

	Variable 1	Variable 2
Media	99.98275862	99.91631799
Varianza	0.002972652	0.018965588
Observaciones	10	10
Coeficiente de correlación de Pearson	0.320256308	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	1.605345955	
P(T<=t) una cola	0.071440229	
Valor crítico de t (una cola)	1.833112933	
P(T<=t) dos colas	0.142880458	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

Cuadro resumen generado para prueba t de student para análisis de diferencia de medias, método RAOS y dos cubetas para remoción de **arsénico**

	Variable 1	Variable 2
Media	81.5	83.5
Varianza	22.5	33.61111111
Observaciones	10	10
Coeficiente de correlación de Pearson	-0.11111111	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	-0.80178373	
P(T<=t) una cola	0.221665925	
Valor crítico de t (una cola)	1.833112933	
P(T<=t) dos colas	0.44333185	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

Cuadro resumen generado para la prueba t de student para análisis de una media, método RAOS y dos cubetas para remoción de **plomo**

Método RAOS para Remoción de plomo		Método dos cubetas para Remoción de plomo	
Límite máximo	0.01 ppm	Límite máximo	0.01 ppm
Media	0.0002	Media	0.0008
Desviación estándar	0.000632456	Desviación estándar	0.001316561
Grados de Libertad	9	Grados de Libertad	9
Estadístico t	-49.00	Estadístico t	-22.10
Valor critico de t (una cola)	1.833113	Valor critico de t (una cola)	1.833113

Cuadro resumen generado para la prueba t de student para análisis de una media, método RAOS y dos cubetas para remoción de **arsénico**

Método RAOS para Remoción de arsénico		Método dos cubetas para Remoción de arsénico	
Límite máximo	0.01 ppm	Límite máximo	0.01 ppm
Media	0.1850	Media	0.1650
Desviación estándar	0.047434165	Desviación estándar	0.05797509
Grados de Libertad	9	Grados de Libertad	9
Estadístico t	11.67	Estadístico t	8.45
Valor critico de t (una cola)	1.833113	Valor critico de t (una cola)	1.833113