

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA



Remoción de arsénico presente en el agua potable, mediante el proceso por oxidación solar.

Por:

EUSTAQUIO FERIA ESTRADA

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón, Coahuila, México

Abril 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA

Remoción de arsénico presente en el agua potable, mediante el proceso por oxidación solar.


Por:

EUSTAQUIO FERIA ESTRADA


MONOGRAFÍA


Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:


INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES


M.A.G.A. JOEL LIMONES AVITIA
Presidente

Aprobada por:


DRA. NATALIA BELEN ORTEGA MORALES
Vocal


DR. EDUARDO ARON FLORES HERNÁNDEZ
Vocal


DR. ISAÍAS LÓPEZ HERNÁNDEZ
Vocal Suplente


DR. J. ISABEL MARQUEZ MENDOZA
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

Universidad Autónoma Agraria
ANTONIO NARRO



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Torreón, Coahuila, México
ABRIL 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA

Remoción de arsénico presente en el agua potable, mediante el proceso por oxidación solar.

Por:

EUSTAQUIO FERIA ESTRADA

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobada por el Comité de Asesoría:



M.A.G.A. JOEL LIMONES AVITIA
Asesor Principal



DRA. NATALIA BELEN ORTEGA MORALES
Coasesor



DR. EDUARDO ARON FLORES HERNÁNDEZ
Coasesor



DR. ISAÍAS LÓPEZ HERNÁNDEZ
Coasesor



DR. J. ISABEL MARQUEZ MENDOZA
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

Universidad Autónoma Agraria
ANTONIO NARRO



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Torreón, Coahuila, México
ABRIL 2022

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, al de arriba, pero el de más arriba, por permitirme vivir, darme la oportunidad de realizarme de esta manera y estar siempre presente en cada momento de mi vida.

A los Padres: Isidro Fábregas Sala (SDB), P. Carlos Muro Hernández († SDB) y P. Francisco Abonza Contreras porque sin su apoyo espiritual y moral no hubiese sido posible concluir mis estudios universitarios.

A mi hijo Joshua Feria Gallegos por ser alguien fundamental en mi vida, mi sueño y la luz de mis ojos.

A mi esposa Mayté Gallegos López, por ser mi fiel e incondicional compañera y siempre motivarme en mis proyectos.

A mis papás (Cornelio y Alberta), mis hermanos, por ser parte importante en mi vida como persona y a su manera, por alertarme a ser siempre mejor.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – Unidad Laguna por ser mi casa de estudios y por contribuir en mi superación personal.

Al Ingeniero Joel Limones Avitia (Ing. Limones), por la amistad, confianza, apoyo, por su tiempo y paciencia conmigo, y por ser parte fundamental en mi formación.

A mis asesores, Dra. Natalia B. Ortega Morales, Dr. Eduardo Aron Flores Hernández y Dr. Isaias López Hernández, a todos mis amigos y personas que intervinieron de una manera u otra para la elaboración de este trabajo

DEDICATORIAS.

Dedico este informe a todos individuos que siempre creyeron en mí, en especial al P. Isidro Fábregas sala (SDB), P. Carlos Muro Hernández (†SDB) y P. Francisco Abonza Contreras (SDB) que sin su apoyo hubiera sido más difícil concluir mis estudios universitarios.

A mi esposa Mayté gallegos y mi hijo Joshua Feria que son el motor de mi vida. A mis padres Cornelio Feria y Alberta Estrada que me dieron la vida, apoyo moral, consejos y la educación a su manera.

A mis profesores y asesores: M.A.G.A. Joel Limones Avitia, Dra. Natalia B. Ortega Morales, Dr. Eduardo Aron Flores Hernándezy y Dr. Isaias López Hernández, por su apoyo y motivación, a todos mis seres queridos que ya no están conmigo, que donde quiera que estén espero se sientan muy orgullosos de mí.

RESUMEN

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades antropogénicas. Actualmente la contaminación por metales en el agua potable en la comarca lagunera se debe principalmente al arsénico (As), siendo esto una situación alarmante ya que dicha problemática se ha ido incrementando exponencialmente en la última década. En este trabajo de investigación se muestra el estudio de la aplicación de la oxidación solar para la eliminación de sales, principalmente arsénico, contenidas en el agua y que pueden ser nocivas para el ser humano. Es posible tratar el agua por medio de tecnologías solares.

Se dice que las energías renovables, provenientes de manera directa o indirecta del sol, se consideran una fuente inagotable de energía, al menos a escala terrestre. Aproximadamente del 1 al 2% de la energía solar total recibida por la tierra, se convierte en energía cinética en la atmósfera. (Zamora-Machado *et al.* 2010).

Se espera que este proyecto fomente el uso de las energías renovables, ya que éstas tienen la bondad de que constituyen energías limpias que no generan contaminación al medio ambiente y, su viabilidad proporciona herramientas para que pueda considerarse la alternativa de ser implementados en las regiones que presentan la problemática del arsénico en nuestro país.

Palabras clave: Arsénico, exponencial, energía renovable, oxidación, tecnología solar

INDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS	II
RESUMEN	III
I INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVO	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
III REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Antecedentes generales	4
3.1.1 Metales pesados	5
3.1.2 Arsénico	5
3.1.3 Arsénico en el ambiente	7
3.1.4 Exposición al arsénico	10
a). Consumo de agua y alimentos.....	12
b). Procesos industriales.....	13
c). Tabaco.....	13
3.1.5 El arsénico en el cuerpo	13
3.2 Fuentes naturales de arsénico	14
3.2.1 Fuentes antropogénicas del arsénico	15
3.2.2 La materia orgánica y el arsénico	16
3.3 El agua	17
3.3.1 Agua freática	17
3.4 Tratamientos del agua potable para eliminar arsénico	18
3.4.1 Tecnologías para remoción de arsénico	19
3.4.2 Procesos de coagulación-floculación	19
3.4.3 Parámetros a verificar en la remoción del arsénico	20
3.4.4 Prevención y control	22
3.5 Energía y la energía solar	24
3.5.1 El sol	24

3.5.2. La luz.....	26
3.5.3 Energía renovable.....	27
3.5.4 La energía solar.....	28
3.6. Marco legal.....	29
3.6.1. Normas Oficiales Mexicanas (NOM´s).....	30
3.6.2. Normas Técnicas Mexicanas (NMx).....	30
IV.- Propuesta de solución a la problemática.....	31
4.1. Alternativas de solución.....	32
4.2 Solución propuesta.....	33
4.3. Estudio de campo.....	35
V. Conclusiones y recomendaciones.....	37
5.1. Conclusiones.....	37
5.2. Recomendaciones.....	38
5.3.- Definiciones aplicadas.....	39
VI. Bibliografía.....	41

I INTRODUCCIÓN

La Comarca Lagunera es una zona geográfica que comprende el sureste del estado de Coahuila y el noroeste del estado de Durango y tiene entre sus actividades económicas a la industria, el comercio y la agricultura. Las principales fuentes de suministro de agua de dicha región proviene del agua del subsuelo y de los ríos Nazas y Aguanaval; sin embargo los mantos acuíferos se han ido abatiendo por lo que cada vez se extrae agua a mayores profundidades y ésta contiene una serie de metales nocivos para la salud humana, entre los que se menciona el Arsénico. (CITA)

Los Metales Pesados con efectos adversos para la salud en el metabolismo humano son; plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As), cobre (Cu), Níquel (Ni), Zinc (Zn), y cromo (Cr), los cuales presentan una preocupación obvia, debido a su persistencia en el medio ambiente y un peligro documentado para la salud (Zhong *et al.*, 2015).

El clima en la región lagunera, es árido con lluvias deficientes en todas las estaciones. La región se encuentra localizada dentro de la zona subtropical de alta presión. Esta posición de su latitud y altitudinal intervienen en el comportamiento climático de la zona. Su precipitación media anual es de alrededor de 220 milímetros, presentándose el periodo de lluvias durante el verano y el otoño. (CITA)

El incremento en el abastecimiento de agua potable para la población, a llevado a que el agua extraída por medio de pozos profundos, se realice cada vez a una mayor profundidad, lo que ha llevado a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, provocado que se extraiga agua potable fósil con alto contenido de arsénico, aunado a lo anterior, existe un desequilibrio entre la recarga del acuíferos por las escasas lluvias y la extracción del agua de los pozos profundos. (CITA)

En el presente proyecto, se proponer la aplicación de un sistema de elimiación de sales nocivas contenidas en el agua potable, haciendola apta para consumo humano, por lo que una alternativa, que pudiera aplicarse, sería la oxidación solar. Con este sistema de eliminación de sales, pudierá esperarse el fomentar el uso de la energía solar, ya que ésta tienen la bondad de no genera contaminación a los ecosistemas y, su viabilidad proporcionaría herramientas para que pudierá considerarse una alternativa de implementado en nuestra región. (CITA)

II. OBJETIVO.

2.1 Objetivo general.

Determinar si un sistema a base de energía solar, puede remover las sales que contiene arsénico, presente en el agua potable.

2.2 Objetivos específicos.

Determinación del equipo mas adecuado para la eliminación del arsénico presente en las aguas potables, mediante la aplicación de la energía solar, para llevar a cabo un proceso de oxidación y consecuentemente la remoción de las sales arsenicales.

III REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Antecedentes generales.

Los metales pesados que contaminan el agua son tóxicos y muy persistentes. El arsénico es un metaloide no biodegradable por lo que debe eliminarse del agua de una forma eficaz y rápida mediante el desarrollo de mecanismos de remoción que no sean tóxicos y de bajo costo (Carolin, 2017).

Desde tiempos remotos, son conocidos los compuestos arsenicales, tanto orgánicos como inorgánicos, que fueron usados como medicamento. El trióxido de arsénico fue utilizado por primera vez en el año 2000 A.C. con fines terapéuticos. En el siglo XVIII se dio a conocer la solución de Fowler cuya composición era arsenito de potasio al 1% utilizada para aliviar diversas enfermedades como: anemia, reumatismo, psoriasis, asma, cólera y la temida sífilis. Este medicamento se mantuvo vigente por más de 150 años. En el siglo XIX esta solución fue usada para tratar el acné y como agente quimioterapéutico para el tratamiento de la leucemia mieloide crónica junto con la irradiación, hasta 1953. Según Jolliffe (1993), en el año 1900 compuestos arsenicales eran usados para combatir la malaria y en el año 1912 el arsénico fue reconocido como el mejor agente existente en la farmacopea (Fenicola, 2003).

El arsénico “As”, se encuentra generalmente como componente natural de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos, los cuales pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas (Rooney, 2006).

La presencia del arsénico es una contaminación directa en el ambiente. La contaminación del ambiente se produce por la incorporación de cualquier tipo de energía, organismo o sustancia, que afecta las características de los ecosistemas, modificando negativamente sus propiedades y su capacidad para asimilarlas o degradarlas. Su entrada se realiza como consecuencia de las actividades antropogénicas, aunque también se puede producir de forma natural (López, 2011).

Los efectos tóxicos del arsénico, no se detecta fácilmente a corto plazo, aunque si puede haber una incidencia muy importante a mediano y largo plazo. El arsénico es difícil de eliminar del medioambiente, puesto que los propios organismos los incorporan a sus tejidos y de éstos a sus depredadores, en los que se acaba manifestando (M. Buenfil-Rojas, 2007).

3.1.1. Metales pesados.

Los metales pesados se pueden considerar como un miembro de un grupo de elementos no muy bien definido que exhibe propiedades metálicas. Se incluyen principalmente metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. Muchas definiciones diferentes han propuesto basarse en la densidad, otras en el número atómico o peso atómico y, algunas en sus propiedades químicas o de toxicidad (DUFFUS, 2002).

Los Metales Pesados con efectos adversos para la salud en el metabolismo humano son: plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As), cobre (Cu), Níquel (Ni), Zinc (Zn), y cromo (Cr), estos presentan una preocupación obvia debido a su persistencia en el medio ambiente (Xiuying, 2015).

3.1.2. Arsénico.

El arsénico es un elemento considerado entre los veinte más abundantes sobre la tierra. Está presente en cantidades trazas en rocas, suelo, agua y aire (Fenicola, 2003).

Es un elemento representado en la tabla periódica, su símbolo es As. Posee 33 protones en su núcleo (número atómico) además tiene una masa atómica de 79.72 g/mol. Pertenece al grupo 5A de la tabla periódica, además este elemento está clasificado como metaloide, es decir tiene propiedades intermedias entre metal y un no metal (Chang, 2007).

El arsénico combinado con estos elementos se conoce como arsénico inorgánico. El arsénico combinado con carbono e hidrógeno se conoce como arsénico orgánico. La mayoría de los compuestos inorgánicos y orgánicos de arsénico son polvos de color blanco que no se evaporan. No tienen olor y la mayoría no tiene ningún sabor especial. Por esta razón, generalmente no se puede saber si están presentes en los alimentos, el agua o el aire.

El arsénico inorgánico ocurre naturalmente en el suelo y en muchos tipos de rocas, especialmente en minerales que contienen cobre o plomo. Cuando estos minerales se calientan en hornos, la mayor parte del arsénico se elimina a través de la chimenea en forma de un polvo fino que entra a la atmósfera. Las fundiciones pueden recuperar este polvo y remover el arsénico en la forma de un compuesto llamado trióxido de arsénico (As_2O_3).

En el pasado, los compuestos inorgánicos de arsénico se usaron predominantemente como plaguicidas, principalmente en cosechas de algodón y huertos frutales. Actualmente, los compuestos inorgánicos de arsénico no se pueden usar en la agricultura. Sin embargo, los compuestos orgánicos de arsénico, específicamente el ácido cacodílico, el arsenato de metilo bisódico (DSMA) y el arsenato de metilo monosódico (MSMA), aun se usan como plaguicidas, principalmente en algodón. Algunos compuestos orgánicos de arsénico se usan como suplementos en alimentos para animales. Cantidades pequeñas de arsénico metálico se agregan a otros metales para formar mezclas de metales o aleaciones con mejores características físicas. El uso más extenso de las aleaciones de arsénico es en baterías para automóviles. Otro uso importante de los compuestos de arsénico es en semiconductores y en diodos que emiten luz (ATSDR, 2005).

3.1.3. Arsénico en el ambiente.

El arsénico ocurre naturalmente en el suelo y en minerales y por lo tanto puede entrar al aire, al agua y al suelo en polvo que levanta el viento. También puede entrar al agua en agua de escorrentía o en agua que se filtra a través del suelo. Las erupciones volcánicas constituyen otra fuente de arsénico. El arsénico está asociado con minerales que se minan para extraer metales, como por ejemplo cobre y plomo, y puede entrar al ambiente cuando se extraen o funden estos minerales. También se pueden liberar a la atmósfera cantidades pequeñas de arsénico desde plantas de carbón y desde incineradores porque a menudo el carbón y los productos de desecho contienen arsénico.

El arsénico no puede ser destruido en el ambiente, solamente puede cambiar de forma o puede adherirse o separarse de partículas. El arsénico puede cambiar de forma al reaccionar con oxígeno o con otras moléculas presentes en el aire, el agua o el suelo, o por la acción de bacterias que viven en el suelo o el sedimento. El arsénico que liberan plantas de energía y otros procesos de combustión generalmente está adherido a partículas muy pequeñas. El arsénico contenido en polvo que levanta el viento se encuentra generalmente en partículas más grandes. Estas partículas se depositan en el suelo o son removidas del aire por la lluvia. El arsénico que está adherido a partículas muy pequeñas puede permanecer en el aire varios días y puede movilizarse largas distancias. Muchos compuestos comunes de arsénico pueden disolverse en agua. Por lo tanto, el arsénico puede pasar a lagos, ríos o al agua subterránea disolviéndose en el agua de lluvia o la nieve o en desagües industriales. Cierta cantidad de arsénico se adherirá a partículas en el agua o a sedimento del fondo de lagos o ríos, mientras que otra porción será arrastrada por el agua. Al final, la mayor parte del arsénico termina en el suelo o en el sedimento. Aunque algunos peces y mariscos incorporan arsénico que puede acumularse en los tejidos, la mayor parte de este arsénico se encuentra en una forma orgánica llamada arsenobetaína (llamada comúnmente arsénico de pez) que es mucho menos peligrosa (ATSDR, 2005).

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en el ambiente. Suele ser detectable en casi todos sus compartimentos y generalmente aparece en la litosfera en concentraciones entre 1,5 y 2 ppm, ocupando el puesto 52 en abundancia (Adriano, 2001). Forma parte de más de 245 minerales en forma de arseniatos (60%), sulfuros y sulfosales (20%) y otras formas como arseniuros, arsenitos, óxidos y silicatos (20%). Los mayores depósitos de As de la corteza terrestre se encuentran en forma de pirita, galena, calcopirita, y esfalerita. Existen altas concentraciones en depósitos de azufre como por ejemplo As_2S_3 , AsS , FeAsS , FeAs_2 , razón por la que la arsenopirita ha sido utilizada para la obtención de arsénico a lo largo de la historia, al ser el mineral de As más abundante en la naturaleza (Kinniburgh, 2002).

El arsénico inorgánico está presente en suelo, agua, aire y alimentos, de forma que el ser humano se encuentra continuamente expuesto a este contaminante. Aunque existen técnicas que permiten una determinación semicuantitativa de As en muestras sólidas, el arsénico en muestras ambientales sólidas (como por ejemplo suelos y plantas) suele medirse en un extracto después de realizar una extracción fuerte, frecuentemente con un ácido y en condiciones oxidantes a altas presiones y temperaturas (Kinniburgh, 2002).

El intervalo de arsénico en el suelo varía de 0.2 a 40 g/kg y en el aire de las zonas urbanas la concentración es aproximadamente de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire. La exposición vía consumo de agua es la mayoritaria a escala global. En aguas continentales la concentración suele estar por debajo de $1 \mu\text{g}/\text{L}$, mientras en el agua marina la media de la concentración de As está en torno a $1.5 \mu\text{g}/\text{L}$ (Kinniburgh, 2002).

La mayor exposición al arsénico es debida al agua superficial contaminada de origen antropogénico o geológico. Se estima que unos treinta millones de personas están expuestas a agua contaminada con arsénico, y un cuarto de estos presentan síntomas derivados de una exposición aguda en al menos cinco países del sureste asiático: Bangladesh, India, Nepal, Tailandia y Myanmar. La Organización Mundial de la Salud recomienda un nivel máximo de arsénico de $10 \mu\text{g}/\text{L}$ en agua y, sin

embargo, la concentración de arsénico en aguas superficiales excede de 2000 µg/L en determinadas áreas de Bangladesh y de la India. Tanto el suelo como el agua de un emplazamiento son una de las principales vías de exposición a arsénico para los seres vivos, ya sea por ingesta, inhalación o contacto dérmico (DEFRA, 2002). Otra vía determinante de exposición es el paso del arsénico a la cadena trófica: el arsénico se acumula en cultivos, vegetales y frutas que crecen en suelos contaminados (Meharg, 2008).

La ingestión continuada de arsénico durante largos periodos de tiempo, deriva en la manifestación de sus efectos tóxicos, produciéndose cambios fisiológicos y desórdenes estructurales. Las formas inorgánicas son más tóxicas, en general, que las orgánicas, aunque estas últimas se absorben mejor. Las personas que no suelen estar expuestas a compuestos de As pueden morir con la ingesta de 0.1-0.3 g/día. En cambio, personas que hayan sufrido una exposición crónica pueden resistir hasta 1 g/ día de H_3AsO_3 sin manifestar ningún tipo de efecto negativo sobre la salud. La exposición laboral al arsénico está presente en ciertos trabajos relacionados con la minería, la combustión de carbón rico en As, uso de conservantes para la madera, producción y uso de pesticidas (Frimmel, 2003).

Las fuentes de arsénico pueden ser clasificadas en función de su origen (naturales o antropogénicas) o de su distribución espacial (localizadas o difusas) (Meharg, 2008).

3.1.4. Exposición al arsénico.

Debido a que el arsénico se encuentra naturalmente en el ambiente, usted estará expuesto a cierta cantidad de arsénico a través de los alimentos, el agua potable o del aire que respira. Los niños también pueden estar expuestos al comer tierra. Los métodos de análisis que usan los científicos para determinar los niveles de arsénico en el ambiente generalmente no determinan la forma específica de arsénico presente. Por lo tanto, no siempre sabemos a que forma de arsénico puede estar expuesta una persona. Asimismo, a menudo tampoco sabemos que formas de arsénico están presentes en sitios de residuos peligrosos. Algunas formas de arsénico pueden estar adheridas tan fuertemente a partículas o incrustadas en minerales que no son incorporadas por plantas y animales.

La concentración de arsénico en el suelo varía ampliamente, en general entre aproximadamente 1 y 40 partes de arsénico por millón de partes de suelo (ppm) con un promedio de 3 a 4 ppm. Sin embargo, los suelos cerca de depósitos geológicos ricos en arsénico, cerca de algunas minas y fundiciones, o en áreas agrícolas donde se usaron plaguicidas con arsénico en el pasado, pueden tener niveles de arsénico mucho más altos. Generalmente, la concentración de arsénico en agua de superficie o subterránea es aproximadamente 1 parte de arsénico por billón de partes de agua (1 ppb), pero puede exceder 1,000 ppb en áreas de minería o donde los niveles de arsénico en el suelo son naturalmente elevados. Generalmente, el agua subterránea contiene niveles de arsénico más altos que el agua de superficie. Estudios del agua potable en Estados Unidos indican que cerca del 80% de los suministros de agua tienen menos de 2 ppb de arsénico, pero 2% de los suministros exceden 20 ppb. Los niveles de arsénico en los alimentos varían entre 20 y 140 ppb. Sin embargo, los niveles de arsénico inorgánico, la forma que genera mayor preocupación, son mucho más bajos. Los niveles de arsénico en el aire generalmente varían entre menos de 1 nanogramo (1 nanogramo es la billonésima parte de 1 gramo) hasta cerca de 2,000 nanogramos de arsénico por metro cúbico de aire (menos de 1 hasta 2,000 ng/m³), dependiendo de la localidad, las

condiciones climáticas y el nivel de actividad industrial en el área. Sin embargo, los niveles de arsénico en áreas urbanas generalmente varían entre 20 y 30 ng/m³.

Normalmente, cantidades pequeñas de arsénico entran al cuerpo por el aire que respiramos, el agua que bebemos y los alimentos que comemos. De estas fuentes, los alimentos son la fuente principal de arsénico. La fuente principal de arsénico en la dieta son los mariscos, seguidos por el arroz/cereales de arroz, hongos y aves de corral. Aunque los mariscos contienen la cantidad de arsénico más alta, el arsénico en peces y mariscos está principalmente en una forma orgánica llamada arsenobetaina, la cual es mucho menos peligrosa. Algunas algas marinas pueden contener formas inorgánicas de arsénico que pueden ser más peligrosas. Los niños generalmente ingieren pequeñas cantidades de polvo o tierra diariamente, lo que constituye otra manera de exposición al arsénico. La cantidad total de arsénico que entra al cuerpo a través de estas fuentes es aproximadamente 50 microgramos (1 microgramo es la millonésima parte de 1 gramo) al día. El nivel de arsénico inorgánico (la forma potencialmente más peligrosa) que entra al cuerpo desde estas fuentes es aproximadamente 3.5 microgramos al día. Los niños pueden estar expuestos a cantidades pequeñas de arsénico cuando se llevan las manos a la boca después de jugar en estructuras construidas con madera tratada con CCA. La cantidad de arsénico a la que se exponen los niños de esta manera generalmente es más baja que la que pueden recibir a través de los alimentos y el agua.

Además de los niveles normales de arsénico en el aire, el agua, el suelo y los alimentos, usted podría estar expuesto a niveles más altos de las siguientes maneras;

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

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

La exposición prolongada al arsénico inorgánico, principalmente a través del consumo de agua contaminada o comida preparada con esta y cultivos alimentarios regados con agua rica en arsénico puede causar intoxicación crónica.

a). Consumo de agua y alimentos.

El arsénico representa una amenaza importante para la salud pública cuando se encuentra en aguas subterráneas contaminadas. El arsénico inorgánico está naturalmente presente en altos niveles en las aguas subterráneas de diversos países, entre ellos la Argentina, Bangladesh, Chile, China, la India, México y los Estados Unidos de América. Las principales fuentes de exposición son: el agua destinada a consumo humano, los cultivos regados con agua contaminada y los alimentos preparados con agua contaminada.

Los pescados, mariscos, carnes, aves de corral, productos lácteos y cereales también pueden ser fuentes alimentarias de arsénico, aunque la exposición a través de estos alimentos suele ser muy inferior a la exposición a través de aguas subterráneas contaminadas. En el marisco, el arsénico está presente principalmente en su forma orgánica menos tóxica.

b). Procesos industriales.

El arsénico se utiliza industrialmente como agente de aleación, y también para el procesamiento de vidrio, pigmentos, textiles, papel, adhesivos metálicos, protectores de la madera y municiones. El arsénico se emplea asimismo en los procesos de curtido de pieles y, en grado más limitado, en la fabricación de plaguicidas, aditivos para piensos y productos farmacéuticos.

c). Tabaco.

Las personas que fuman tabaco también pueden estar expuestas al arsénico inorgánico que contiene el tabaco natural, ya que las plantas de tabaco absorben esencialmente el arsénico presente de forma natural en el suelo. Por otro lado, el riesgo de exposición al arsénico era mucho mayor hace unos años, cuando había costumbre de tratarlas con insecticidas a base de arseniato de plomo.

3.1.5. El arsénico en el cuerpo.

Si usted ingiere arsénico en agua, tierra o alimentos, la mayor parte del arsénico puede pasar rápidamente a la corriente sanguínea. La cantidad que pasa a la sangre dependerá de la cantidad y del tipo de arsénico que usted traga. Esta es la manera más probable de exposición cerca de un sitio de residuos. Si usted respira aire que contiene polvos de arsénico, muchas de las partículas de polvo se depositarán en el interior de los pulmones. La mayoría del arsénico en estas partículas pasa de los pulmones a la sangre. Este tipo de exposición puede ocurrir cerca de un sitio de desechos en donde se permite que los suelos contaminados con arsénico sean levantados al aire por el viento, o si trabaja con suelo o productos que contienen arsénico. Si su piel entra en contacto con suelo o agua contaminada con arsénico, solamente una pequeña cantidad entrará al cuerpo a través de la piel, por eso, este tipo de exposición no es muy importante.

Tanto la forma inorgánica como la forma orgánica de arsénico abandonan el cuerpo en la orina. La mayoría del arsénico abandona el cuerpo en unos días, pero una cantidad permanecerá en el cuerpo durante meses o más tiempo. Si usted se expone a arsénico orgánico, la mayor parte abandonará el cuerpo en unos días (ATSDR, 2005).

3.2. Fuentes naturales de arsénico.

Las fuentes de origen natural engloban aquellas que implican el aporte sin intervención humana significativa. Incluso antes de que las actividades humanas tuvieran efectos sobre los ciclos de los elementos, el arsénico estaba presente en la corteza terrestre, suelos, sedimentos, aguas, aire y organismos. Por regla general estas fuentes dependen íntimamente de la geoquímica de un emplazamiento (de su litología principalmente y de las vías de dispersión). El fondo geoquímico de una sustancia sería la concentración de la misma en un emplazamiento determinado atendiendo solamente a las fuentes naturales (Contreras Pérez, 2004).

Los depósitos de arsénico en algunos materiales de la corteza terrestre son importantes y fruto de ello encontramos litologías en las que la concentración de As es elevada, suponiendo una importante fuente para el ambiente colindante. Son especialmente altos los valores de arsénico en determinadas litologías ricas en arsenopirita, donde la concentración de As puede alcanzar más de 10000 ppm (1%). En estas zonas podría existir riesgo tanto para la salud y como para el ecosistema, por lo que habría que aplicar medidas de gestión del emplazamiento si fuesen necesarias. En algunos emplazamientos, la actividad volcánica también puede ser otra fuente importante de arsénico (Wenzel, 2002).

3.2.1. Fuentes antropogénicas del arsénico.

La producción mundial de arsénico se estima entre 75 y 100 · 10³ toneladas anuales. Las principales actividades humanas fuentes de As son la minería, la siderurgia, la agricultura, la silvicultura, las plantas de tratamiento de combustibles fósiles, los desechos urbanos y la ganadería (Wenzel, 2002). En los procesos de minería y siderurgia el arsénico se presenta frecuentemente como un subproducto con poco mercado, lo que ocasiona que se convierta en residuo. Se presentan concentraciones elevadas de As en las cercanías de los escombros mineros (hasta 3% As), que decrece rápidamente con la distancia a dichos escombros (Selim, 2015).

La forma predominante de arsénico en medio oxidante es arseniato, que puede retenerse fácilmente en las superficies cargadas positivamente. El As(V) es la forma predominante en suelos con un valor $pH+pe > 10$, mientras el As(III) predomina en aquellos suelos con valores de $pH+pe$ menores de 6 (Ravi Naidu, 2006). Bajo condiciones aeróbicas, los sulfuros se oxidan fácilmente y como consecuencia el arsénico se libera en el medio (Laurent Matini, 2011). En dichas condiciones y con un pH en el intervalo de 3 a 13 las especies mayoritarias serían $H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$. En medio reductor, el arsénico se encuentra como arsenito, cuya especie predominante suele ser el H_3AsO_3 . La pobre adsorción del As(III) es debida a su carácter neutro en suelos (Satinder, 2009). El arsenito es más móvil y tóxico que el arseniato, lo que va a reflejarse cuando el potencial del suelo es negativo (Wenzel, 2002). Por tanto, cambios en Introducción y Antecedentes 20 el manejo o en las condiciones de un suelo pueden causar cambios en la especiación del As (Henke, 2009). En condiciones altamente reductoras puede coprecipitar con sulfuros de hierro como arsenopirita o formando sulfuros de arsénico (AsS , As_2S_3). Durante la oxidación de la pirita el Fe se oxida de II a III, pero también el arsénico se oxida a arseniato. En cambio, bajo condiciones reductoras, los óxidos de Fe y Mn se disuelven, liberando arseniato que rápidamente se reduce a arsenito (Singh, 2010).

3.2.2. La materia orgánica y el arsénico.

El concepto materia orgánica engloba fundamentalmente una serie de compuestos orgánicos de naturaleza química heterogénea en referencia a su grado de polimerización y peso molecular. En esta fracción del suelo domina el carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y fósforo (por este orden) y los grupos funcionales que predominan generalmente son carboxilos, carbonilos, alcoholes y aminas. (Lawrence, 2003).

El grado de polimerización de los compuestos del humus y su peso molecular influyen sobre su solubilidad: los más pequeños y con mayor proporción de grupos funcionales serán más solubles (ácidos orgánicos, fúlvicos y húmicos), mientras que los más polimerizados y con poca proporción de grupos funcionales (huminas) serán más estables a lo largo del tiempo e insolubles en agua. Los efectos que va a tener la materia orgánica sobre los elementos traza de un suelo dependen por tanto de su composición cualitativa. Aquella fracción orgánica de alto peso molecular retendrá los elementos traza de forma efectiva, pero la más soluble y ligera puede solubilizar elementos ya sea por quelación (metales) o por desplazamiento (aniones); dependiendo de la que domine en el suelo serán observables unos efectos u otros sobre la fracción disponible del suelo. Por todo ello, el papel de la materia orgánica sobre el arsénico del suelo está todavía en discusión: en algunos estudios la aplicación de materia orgánica ha conseguido disminuir la movilidad del arsénico (Vishnu Priya *et al.*, 2006). La materia orgánica disuelta puede competir, por tanto, con arseniato y arsenito por los lugares de retención en los suelos (Bernal *et al.*, 2009). Por tanto la relación entre el arsénico del suelo y la materia orgánica va a ser compleja, dependiente entre otros factores de la proporción de carbono orgánico soluble, de las fracciones más estables e insolubles del humus y de la cantidad de Fe, Al y Mn de dicha materia orgánica (Singh, 2010).

3.3 El agua.

Se puede denominar como agua para uso y consumo humano toda aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud (SSA, 2002). Término estrechamente ligado al de agua potable la cual se define como la apta para el consumo humano, incolora e inodora, oxigenada, libre de bacterias patógenas y de compuestos de nitrógenos, y de un grado de dureza inferior a treinta (CONANP, 2019). Por otra parte la agua no potable se refiere a la insegura o desagradable para beber debido a su contenido en contaminantes, minerales o a los agentes infecciosos. (Lenntech, 2015).

3.3.1. Agua freática.

Es el agua subterránea que fluye o se acumula en la capa más cercana a la superficie. Lo suficientemente próxima a ésta para que sea posible hallarla con pozo ordinario (que supone una profundidad máxima de 30 metros y extracción manual del agua). Agua que por precipitación o infiltración de corrientes de agua, penetra la superficie terrestre. Agua presente debajo del suelo proveniente de lagunas y lagos (CONANP, 2019).

3.3.2. El acuífero.

Es la formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (CONAGUA, 2001). Cuando la extracción del agua subterránea supera al volumen de recarga media anual, de tal forma que la persistencia de esta condición por largos periodos de tiempo ocasiona alguno o varios de los siguientes impactos ambientales:

agotamiento o desaparición de manantiales, lagos, humedales; disminución o desaparición del flujo base en ríos; abatimiento indefinido del nivel del agua subterránea; formación de grietas; asentamientos diferenciales del terreno; intrusión marina en acuíferos costeros; migración de agua de mala calidad los cuales son indicadores claros de una sobreexplotación. Estos impactos pueden ocasionar pérdidas económicas a los usuarios y a la sociedad (SINA, 2008).

La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con las normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado, como por ejemplo, el consumo humano o el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos (ONU 2016). El deterioro de la calidad del agua ocurre por procesos tanto naturales como antrópicos (SEMARNAT).

El agua es un recurso vital e insustituible que permite y potencializa la vida en la tierra. Su contaminación es un grave problema que reduce y encarece el suministro de agua potable en la población. Este recurso natural es esencial para la vida humana y es la más delicada del ambiente (Das y Acharya 2003). El descontrolado crecimiento de la población, así como el vertiginoso ritmo de la industrialización a nivel mundial, han derivado en una mayor demanda de agua dulce en el mundo (Ramakrishnaiah *et al.* 2009).

3.4. Tratamientos del agua potable para eliminar arsénico.

En la actualidad existen diversos tratamientos para la eliminación del metaloide arsénico presente en el agua potable, algunos de estos tratamientos son muy costosos, lo que eleva el costo de los servicios de abastecimiento del agua potable. Algunos de estos tratamientos son los siguientes.

3.4.1. Tecnologías para remoción de arsénico.

Los procesos y tecnologías conocidos para la remoción de arsénico del agua son variados y comprenden desde tratamientos en plantas potabilizadoras convencionales y métodos domiciliarios, hasta tecnologías *in situ*. Los procesos de remediación que se conocen en la actualidad son: oxidación, precipitación, coagulación y ablandamiento con cal, ósmosis inversa, microfiltración, nanofiltración, adsorción, tratamientos biológicos y fitorremediación, electrodiálisis y electrocinética, entre otros. (Litter, 2010). Algunas de estas técnicas son más tradicionales y utilizadas que otras y, si bien continuamente se proponen nuevos métodos o mejoras, cada proceso presenta ventajas, desventajas y limitaciones según las condiciones locales, lo que no asegura un resultado técnico, económico y ambiental adecuado en todos los casos. Para las investigaciones realizadas en ese trabajo, resultan de particular interés las técnicas de remoción que utilizan mecanismos basados en los principios de coagulación-floculación.

3.4.2. Procesos de coagulación-floculación.

Los procesos de coagulación-floculación son metodologías propias y habituales en plantas potabilizadoras, principalmente para remoción de materia suspendida y clarificación del agua. En una primera etapa los compuestos químicos en solución se adsorben a la superficie de partículas sólidas en suspensión y posteriormente en la coagulación estos coloides se agrupan formando flóculos de mayor tamaño, los cuales son removidos mediante precipitación o filtración. La precipitación-coprecipitación consiste básicamente en la adición de productos químicos al agua, el mezclado, la formación de una matriz sólida y, a través de la precipitación, coprecipitación o una combinación de estos procesos, en la separación de la matriz sólida del agua. El tratamiento de precipitación-coprecipitación incluye la adición de oxidantes químicos, ajustes de pH y coagulantes o precipitantes químicos (EPA 2002). Entre los factores de importancia para la remediación con este método se han identificado el tipo y la dosis del coagulante, tiempo de mezcla, estado de

oxidación y concentración de arsénico inicial, temperatura, presencia de otros solutos inorgánicos y el pH (Romero Rojas, 2012).

3.4.3. Parámetros a verificar en la remoción del arsénico.

Existen numerosos parámetros que influyen en las fuerzas químicas y físicas que posibilitan que estos fenómenos ocurran; en ellas los aspectos de mayor relevancia son las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales presentes en el agua, la temperatura, el pH y la dosis del coagulante (Romero Rojas, 2012).

Hering *et al.* (1997) trabajaron en procesos de coagulación con cloruro férrico a escala de laboratorio con aguas naturales y artificiales contaminadas con As (III) y As (V). Song *et al.* (2006) han trabajado en agua de drenaje de mina con alto contenido de arsénico con un proceso de coagulación mejorado con iones férricos y calcita gruesa, logrando una eliminación de As de más del 99 % por medio de la coagulación mejorada seguida de filtración convencional con papel de filtro. Lee *et al.* (2003) estudiaron la estequiometría, cinética, y oxidación del arsenito con Fe (VI) y realizaron ensayos de eliminación de arsénico utilizando Fe (VI) como oxidante y coagulante.

Como antecedente de análisis estadístico, Baskan y Pala (2010) trabajaron con el diseño de experimentos estadísticos de Box-Behnken (BBD) y la metodología de superficie de respuesta (RSM) para investigar los efectos de las principales variables de funcionamiento del proceso de coagulación. La concentración inicial de arseniato, el pH y la dosis de sulfato de aluminio se seleccionaron como variables independientes y la remoción de As se consideró como la función de respuesta. Los autores lograron un muy buen ajuste entre valores medidos y calculados logrando determinar la importancia relativa de los parámetros que intervienen en la eliminación del arseniato.

Existen ventajas y desventajas en la utilización de cada uno de los coagulantes conocidos. En general, los coagulantes más utilizados son las sales de aluminio o de hierro (III), los cuales permiten remover sustancias inorgánicas disueltas tales como el arsénico. En muchos casos, estos elementos producen además un incremento de sulfatos o cloruros y el descenso del pH, lo cual resulta de fundamental importancia no sólo porque controlan la eficiencia de la coagulación sino también por la necesidad de disposición adecuada de los residuos o lodos como producto de la floculación. Karcher *et al.* (1999) han realizado ensayos en plantas potabilizadoras utilizando cloruro férrico como coagulante obteniendo resultados satisfactorios.

El estudio de estos procesos con, el objeto de la remediación de aguas arsenicales no busca como fin una solución unitaria sino que en general, forma parte de una serie de procesos para lograr que el agua sirva para consumo humano luego del tratamiento. Respecto de las aguas arsenicales, las técnicas de floculación se intentan aplicar tanto en plantas potabilizadoras como en experimentos piloto en el caso de pequeñas comunidades o agrupaciones de personas que no cuentan con servicio de provisión de agua potable por ser población rural dispersa.

3.4.4 Prevención y control.

La intervención más importante en las comunidades afectadas consiste en prevenir que se prolongue la exposición al arsénico implantando un sistema seguro de abastecimiento de agua potable destinada al consumo como agua para beber, a la preparación de alimentos y al riego de los cultivos alimentarios. Existen diversas opciones para reducir los niveles de arsénico en el agua potable.

- Sustituir las fuentes de abastecimiento con elevados niveles de arsénico, por ejemplo aguas subterráneas, por fuentes de abastecimiento con bajos niveles de arsénico y microbiológicamente seguras, por ejemplo agua de lluvia o aguas superficiales debidamente tratadas. Una opción es reservar el agua con bajos niveles de arsénico para beber, cocinar y regar y utilizar el agua con alta concentración para otros fines, por ejemplo para bañarse o lavar la ropa.
- Discriminar entre las fuentes de abastecimiento con altos niveles de arsénico y las fuentes con bajos niveles de arsénico. Por ejemplo, analizar los niveles de arsénico en el agua y pintar los pozos canalizados o las bombas de mano de diferentes colores. Esto puede ser una solución eficaz y económica para reducir rápidamente los niveles de exposición, siempre que vaya acompañada de la oportuna campaña educativa.
- Mezclar agua con bajos niveles de arsénico con agua de concentración más elevada a fin de conseguir más cantidad de agua con un nivel de concentración aceptable.
- Instalar sistemas de eliminación del arsénico – ya sea de manera centralizada o a nivel doméstico – y asegurar que el arsénico eliminado se someta a un tratamiento de residuos adecuado.

La educación y la participación de la comunidad son factores fundamentales para asegurar que las intervenciones den buen resultado. Es necesario que los miembros de cada comunidad comprendan los riesgos asociados a la exposición a altos niveles de arsénico y las fuentes conexas, como la ingesta de arsénico a través de cultivos alimentarios (por ejemplo, el arroz) regados con agua contaminada o a través de alimentos cocinados con agua contaminada.

También es primordial someter a las poblaciones de alto riesgo a un seguimiento continuo para detectar los signos tempranos de la intoxicación por arsénico, que suelen presentarse en forma de problemas dermatológicos.

El Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento, sigue los progresos realizados hacia la consecución de las metas mundiales relacionadas con el agua para beber. El indicador propuesto para la gestión segura de los servicios de suministro de agua de bebida en el contexto de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, propugna que se siga el acceso de la población a agua de bebida sin contaminación fecal ni contaminantes químicos prioritarios, entre ellos el arsénico.

3.5. Energía y la energía solar

3.5.1. El sol.

Variados y profundos son los problemas actuales que afronta la humanidad, el problema energético es uno de ellos, porque es vital para el futuro del planeta. La energía, es al mismo tiempo, una solución y un problema para el desarrollo sostenible. Nuestras economías utilizan combustibles que, además de no ser renovables, ocasionan daños al entorno en que habitamos. Las fuentes renovables de energía son aquellas que, administradas de modo adecuado, pueden explotarse ilimitadamente, es decir, la cantidad disponible no disminuye a medida que se aprovecha. De todas las fuentes renovables, la energía solar es la única que puede ser aprovechada en todo el planeta, independientemente del clima o la geografía, sin detrimento del ambiente y teóricamente, con la capacidad de satisfacer las necesidades energéticas de la población mundial (Hernández-García, 2007)

El sol es una fuente natural de radiaciones electromagnéticas que se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda y, suelen clasificarse atendiendo a estas dos propiedades en diferentes grupos. Al conjunto de todas ellas se le denomina espectro electromagnético y en él se distinguen desde ondas de radio, microondas, infrarrojos, luz visible, luz ultravioleta, rayos X, rayos gamma. De todo el espectro solar, solo la luz visible, los infrarrojos y una parte de la radiación ultravioleta alcanzan la superficie terrestre, en las siguientes proporciones 50, 40 y 10% respectivamente (Duro-Mota, 2003)

Nuestro planeta recibe del sol una cantidad de energía anual de aproximadamente 1.6 millones de kilowatts por hora (kWh), de los cuales solo un 40% es aprovechable, una cifra que representa varios cientos de veces la energía que se consume actualmente de forma mundial, es una fuente de energía descentralizada, limpia e inagotable. El aprovechamiento energético está entonces condicionado por la intensidad de radiación solar recibida por la tierra, los ciclos diarios y anuales a

los que está sometida y las condiciones climatológicas del lugar. Se define como energía solar, a aquella que mediante conversión a calor o electricidad, se aprovecha la radiación proveniente del sol, otra forma de aprovechamiento asociado considera la posibilidad de hacer uso de la iluminación natural y las condiciones climáticas de cada emplazamiento en la construcción de edificios mediante lo que se denomina arquitectura bioclimática (Yabroudi, 2008).

El sol se sitúa como el centro del cielo real y simbólico, representa una fuerza que lo hace girar todo a su alrededor, por ello simboliza, en el ser humano, al corazón (Ravindra, 2015).

El sol es una estrella mediana de color amarillo, su temperatura superficial es de $5,500^{\circ}\text{C}$ y su temperatura interna es de $15\,000,000^{\circ}\text{C}$, su núcleo está formado básicamente por átomos de hidrógeno que al reaccionar entre sí forma helio y desprenden mucha energía, es la denominada energía atómica o nuclear de fisión del hidrógeno. Su diámetro es de 109 veces el de la tierra, lo cual implica un volumen superior a un millón de veces el volumen de la tierra (Berardi, 2015).

El sol se formó hace unos 4,600 millones de años por condensación de hidrógeno, helio y polvo cósmico (actualmente presenta un 75% de hidrógeno, un 23% de helio y un 2% de polvo cósmico) y se cree que se apagará dentro de otros 4,500 millones de años, cuando se consuma todo el hidrógeno (Peñaloza-Murillo, 2015).

El sol emite energía como radiación electromagnética que viaja desde la base del sol y se distribuye de manera uniforme y isotrópicamente por todo el universo. Parte de esta energía alcanza las capas superiores de la atmósfera de la tierra. Su valor se conoce como la constante solar (C) (Villacana-Ortiz e. a., 2015).

3.5.2. La luz.

Se llama luz a la parte de la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano. En física, el término luz se usa en un sentido amplio e incluye todo el campo de la radiación conocido como espectro electromagnético, mientras que la expresión luz visible señala específicamente la radiación en el espectro visible (2015).

La radiación emitida por el sol, junto con sus condiciones geométricas respecto de la tierra, dan por resultado que, sobre la atmósfera terrestre, incida una cantidad de radiación solar casi constante. Esto ha dado lugar a la definición de la llamada constante solar. La constante solar G es el flujo de energía proveniente del sol, que incide sobre la superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la tierra al sol, fuera de toda atmósfera (Mendoza, 1995).

Así mismo, la cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra, sea en suelo firme o en los océanos, ha sido cuantificada a través de mediciones realizadas por instrumentos ajustados para detectar, exclusivamente, la radiación solar incidente a ras del suelo. El valor de 1338 watts (W), es la cantidad de potencia solar recibida por cada metro cuadrado de la superficie formada por la esfera orbital de la tierra, es decir, 1368 W/m². Dicha esfera se denomina esfera exterior y tiene un radio igual a la distancia entre el sol y la tierra (Nahle, 2011).

3.5.3 Energía renovable.

Energía nueva y renovable, es una de las principales energías alternativas que puede responder a la disminución en el consumo de los combustibles fósiles, el movimiento mundial del cambio climático y la reciente alza de los precios del petróleo, el uso de esta energía, es, as sostenible y respetuosa con el medio ambiente, que los combustibles fósiles (Azamat, 2015).

El mercado de las energías se enfrenta a retos mucho más importantes, tales como la limitación de las reservas de combustibles fósiles, el aumento de la población, la falta de seguridad de la energía, el crecimiento económico, la urbanización y la escasez de agua especialmente para las regiones áridas (Jan, 2015).

Para superar esta futura brecha entre la oferta y la demanda de energía, así como teniendo en cuenta los riesgos del cambio climático global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes por el excesivo consumo de combustibles fósiles, la atención se orientó a las fuentes de energías renovables y de la eficiencia energética (EE) medidas. Es por ello que desarrollar las energías renovables (RE) es un proyecto que se considera como una gran oportunidad, no solo desde el punto de vista estratégico, y financiero, sino también tecnológico y ambiental (Peter, 2015).

El desarrollo de las energías renovables, como alternativa a las fuentes de energías tradicionales ha sido alentado por las preocupaciones sobre el medio ambiente y el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles. Desde la producción de energía renovable y su uso, está intrínsecamente vinculada al desarrollo sostenible, la seguridad energética y la protección ambiental y la reducción de las emisiones (Reboredo, 2015).

3.5.4 La energía solar.

La energía solar y más específicamente la Concentración de Energía Solar (CSP), es considerada como una de las opciones más prometedoras para el futuro en el desarrollo de las energías renovables, ya que tiene un costo reducido y un bajo impacto medioambiental, lo que la hace apta para contribuir a la demanda mundial de energía con múltiples aplicaciones en la industria (Gutierrez-Trashorras, 2015).

Con el fin de cubrir las necesidades de energía del país, estas alternativas se deben desarrollar más racional y sistemática, en el corto y mediano plazo. Estudios indican que México cuenta con una interesante variedad de recursos renovables, capaz de ser transformados en energía final (Peng, 2015).

La radiación solar es de especial importancia, debido a su disponibilidad en casi todo el territorio nacional. Se estima que la tasa promedio de radiación solar es de 5 Kw/m² (kilowatts por metro cuadrado) al día, en más del un 75% del territorio. La topografía del Golfo de México, favorece el desarrollo de generación de energía eléctrica así como de instalaciones de energía solar térmica, además de concentrar las principales fuentes de petróleo (Somanchi, 2015).

La mayor ventaja de la energía solar, en comparación con otras formas de energía, es que es más limpia y puede ser suministrada sin emitir contaminantes al medio ambiente. Durante el siglo pasado, los combustibles han proporcionado la mayor parte de nuestra energía, pero estos son mucho más baratos y más convenientes que la energía generada a partir de fuentes de energía alternativa y hasta hace poco, la contaminación ambiental ha sido de poco interés (Chavez, 2010).

3.6. Marco legal.

Para el presente documento, se considera la aplicación del siguiente marco legal, para lo cual se deberán de aplicar tanto las Normas Oficiales Mexicana (NOM) como las Norma Técnicas Mexicanas (NMx), referentes a los niveles de contaminación del agua.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

(Última reforma DOF 29 de enero de 2016).

Artículo 4º.

Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.

3.6.1. Normas Oficiales Mexicanas (NOM's).

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

NORMA Oficial Mexicana NOM 012-SSA1-1993, Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados.

Norma Oficial Mexicana NOM 014-SSA1-1993. "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados".

Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1 -1998, Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público.

3.6.2. Normas Técnicas Mexicanas (NMx).

Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua.- Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-014-1980 Cuerpos receptores.- Muestreo.

Norma Mexicana NMX-AA-112-1995-SCFI Análisis de agua y sedimentos–Evaluación de toxicidad aguda con *Photobacterium Phosphoreum*–Método de prueba.

IV.- Propuesta de solución a la problemática.

La comarca lagunera es una región que comprende el suroeste del estado de Coahuila y el noroeste del estado de Durango y tiene entre sus actividades económicas a: la Industrias, el comercio y la agricultura.

La contaminación por arsénico de las aguas subterráneas es un problema muy extendido; varias regiones del planeta presentan niveles importantes de consumo de agua contaminada.

La OMS (Organización Mundial de la Salud) advierte que la máxima concentración segura de contaminación por arsénico es 10 ppb (parte por billón). Aunque el arsénico puede encontrarse en las aguas superficiales, las aguas subterráneas son la principal fuente de arsénico en agua. Consecuentemente, concentraciones por encima de 10 ppb pueden ser encontradas en aguas subterráneas de forma natural. En aguas subterráneas el arsénico existe como inones As(V) inorgánico insoluble en agua o moléculas de As(III).

El arsénico puede ser encontrado en ciertos suelos de forma natural. Cuando el arsénico entra en contacto con el agua subterránea este puede terminar en el agua de nuestro grifo. El arsénico es un metaloide, lo cual básicamente significa que tiene propiedades de metal y no metal. El arsénico puede terminar en el ambiente a través de la producción industrial de Cobre, Plomo y Zinc.

El tomar grandes cantidades, por largo tiempo, de agua potable contaminada con arsénico, puede causar problemas medio ambientales. Por lo tanto, la purificación del agua, mediante la aplicación de tratamientos de bajo costo y alta eficiencia, son importantes cuando el arsénico está presente.

Una tecnología de remediación sostenible no solo debe ser robusta, compuesta de los recursos locales, y fácil de usar y mantener, sino que también debe adjuntar especial atención a los aspectos sociales, económicos, culturales, tradicionales y

ambientales de la comunidad para la que fue diseñada. Es fundamental que las intervenciones para la remediación de arsénico sean tales diseños que eliminan la toxicidad del arsénico sin introducir futuros retos de la sostenibilidad, aparte de otros atributos como (Szafran, 2011).

- Eficaz y fácil de usar.
- Rentable tanto en términos de inversiones de capital y de operación costos.
- Fabricado con materiales disponibles localmente, partes y adsorbentes regenerables.
- Debe ser entendido, controlado y mantenido por los pobladores sin un alto nivel de formación específica.
- Flexible y adaptable a diferentes lugares y circunstancias cambiantes.
- No plantea futuros retos de sostenibilidad debido a la lixiviación de arsénico de los residuos de tratamiento.

4.1. Alternativas de solución.

Los contenidos de arsénico (As) en aguas subterráneas superiores al valor establecido por la Organización Mundial de la Salud –OMS- (10 µg/L) conducen a serios problemas ambientales.

El arsénico puede ser eliminado del agua de varias maneras. Por ejemplo; por técnicas de purificación de agua que consisten en la coagulación con hierro y aluminio, adsorción por alúmina activa, intercambio iónico y filtración por membranas. El As(V) se elimina más fácil que el As(III). El As(III) puede eliminarse tras ser pre-oxidado a As(V).

Entre las tecnologías que permiten eliminar el arsénico destacan; la oxidación, la coagulación-precipitación, la absorción, el intercambio de iones y diversas técnicas de membranas. Hay un número creciente de opciones eficaces y baratas para

eliminar el arsénico de los suministros pequeños y domésticos, aunque las pruebas sobre el uso eficaz de esos sistemas a largo plazo todavía son escasas (Mohan, 2007).

En general, en cada uno de estos procesos se requiere una fase previa de oxidación, ya que la remoción de arsénico en la forma pentavalente es más efectiva que en la trivalente. Los oxidantes más utilizados son el hipoclorito de sodio y el permanganato de potasio (OPS, 2005). Una vez realizada la oxidación, en presencia de hierro en el agua, se produce la precipitación de hidróxidos de hierro (III) en cuya superficie es retenido el arsénico pentavalente.

4.2 Solución propuesta.

En algunos países, a pesar de que se han hecho esfuerzos por abastecer de agua segura a las comunidades afectadas por la presencia de arsénico en el líquido, una parte de la población aún se encuentra expuesta. Es por ello que en esta investigación se presentan dos soluciones a nivel domiciliario para eliminar el arsénico: una por oxidación solar y otra por un proceso de coagulación- floculación. En ambos casos, el arsénico es removido por adsorción o coprecipitación sobre los óxidos hidróxidos de hierro (III) formados.

Uno de los sistemas que puede ser aplicado, se denomina Remoción de Arsénico por Oxidación Solar (RAOS), en este sistema, se encontró que para reducir la concentración de arsénico de 200µg/L a menos de la norma (10µg/L), se necesitan entre 2h y 4h de exposición a la radiación solar, en un día soleado o nublado, respectivamente.

El sistema RAOS, es bastante simple y seguro para la remoción de arsénico por oxidación solar. Consiste en colocar el agua contaminada en botellas plásticas transparentes con la adición de jugo de limón y hierro (Litter et al., 2010). Posteriormente, las botellas se exponen a radiación solar para oxidar el arsénico

trivalente y formar compuestos de coordinación entre el hierro y citrato mediante un proceso foto-fenton (Litter, 2010). El arsénico pentavalente coprecipita con los hidróxidos de hierro formados (Litter, 2010).

El siguiente sistema se basa en las operaciones de coagulación-floculación, en este sistema, las condiciones óptimas para obtener niveles de arsénico por debajo de la norma fueron las siguientes: con floculante sintético, el pH fue 6 con 1 mg/L de polímero de cloruro de polidialil-dimetilamonio, con dosis de Cloruro ferrico (FeCl_3) 12 mg/L; con floculante natural, el pH fue 6 con 250 mg/L de mozote (*Triumfetta semitriloba*), con dosis de Cloruro ferrico (FeCl_3) de 14 mg/L.

Un prototipo consistente en un recipiente de coagulación-fluculación y otro de filtración en arena que fue capaz de tratar 15 L de agua sintética con $200\mu\text{g/L}$ As y agua natural con 10 y $50\mu\text{g/L}$. A pesar de estos resultados, es necesario evaluar ambas técnicas en las comunidades, incluyendo aspectos de capacitación y aceptación.

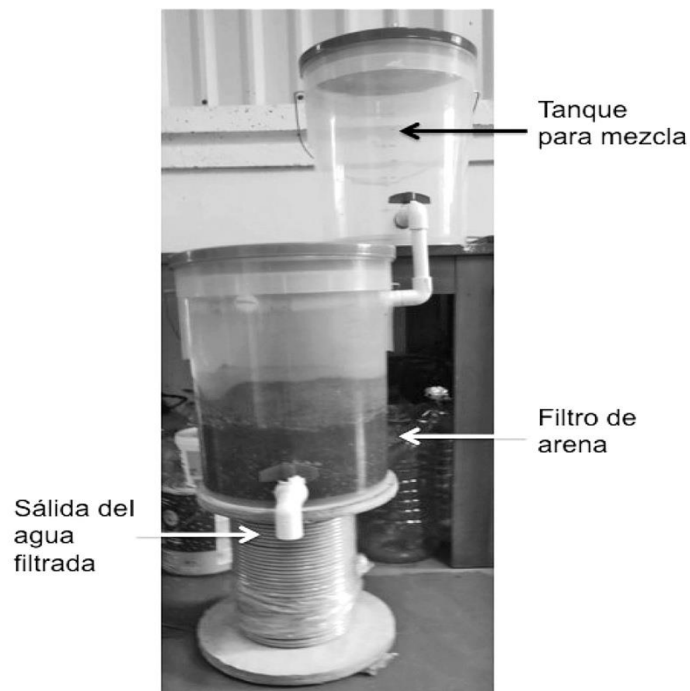


Figura 1 Prototipo de un sistema de oxidación solar, desarrollado para la remoción domiciliar de arsénico en agua potable

4.3. Estudio de campo.

Ensayos con el sistema de Remoción de Arsénico por Oxidación Solar.

En los ensayos realizados, se deberá seguir el procedimiento descrito por Litter y colaboradores (2010). En estos casos utilizando botellas de PET de 600 o 1500 mL conteniendo agua sintética tipo reto, formulada por la American Science Foundation (NSF) y descrita por Amy y colaboradores (2005). En dichas botellas se agregó As (V) hasta obtener una concentración de 200 $\mu\text{g/L}$. Posteriormente, se dosificaron 0,6 g/L de hierro cero-valente obtenido de hilos de hierro del utilizado para el lavado de utensilios de cocina. Dichas botellas se expusieron a la radiación solar al colocarlas inclinadas a ras del suelo. Posteriormente, se deberán tomar muestras de agua de una botella diferente cada hora durante las siguientes seis horas. Las muestras de agua se deberán filtrar utilizando papel filtro $< 2 \mu\text{m}$ y se acidificarán con ácido nítrico, para su posterior análisis, al menos en duplicado, de arsénico y hierro. Inmediatamente después de la filtración, se determina la turbidez y el color del filtrado en algunas muestras. Además, de las botellas mencionadas, se analiza el comportamiento de dos blancos: uno con hierro que no fue expuesto a la radiación solar y otro sin hierro que sí se colocara a la luz solar. En total se realizarán tres experimentos: el primero en un día nublado (A) y el segundo y tercero en días soleados (B y C). La intensidad de la radiación solar será detectada durante el periodo de los experimentos con la estación meteorológica localizada en el área de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. (Romero Rojas, 2012)

La determinación del contenido de arsénico en agua se realizó mediante el método 3114b del Standard Methods (APHA, AWWA y WPCF, 2005) por espectrofotometría de absorción atómica (AA) por generación de hidruros (Clesceri, Greenberg y Eaton, 1999). Se utilizó un espectrofotómetro marca Perkin Elmer Analyst 800. El método consistió en la generación de hidruros y la formación de AsH_3 (arsina) mediante la

reacción con el borohidruro de sodio y una mezcla reductora (mezcla 1:1 de disoluciones acuosas de yoduro de potasio al 5% y ácido ascórbico al 5%). Posteriormente, el arsénico trivalente total se analizó en el espectrómetro de absorción atómica, en el cual se convirtieron en átomos en su fase gaseosa (Armienta, Castro de Esparza, López, Piñeiro y Sassone, 2009). El límite de detección es de 0.03 µg/L y el de cuantificación de 0.1 µg/L. Estos se determinaron según lo que indican Miller y Miller (2002). Por otro lado, la incertidumbre de 1 µg/L se calculó según el procedimiento descrito por Rivas y Fernández (2006).

Según Litter, Morgada y Bundschuh (2010), la oxidación de hierro cero-valente en la presencia de agua y oxígeno produce hierro (II) y posteriormente diferentes óxidos o hidróxidos de hierro (II) y (III). En dichos materiales el arsénico puede adsorberse o coprecipitar. La figura siguiente se muestra que la remoción esperada del arsénico hasta niveles por debajo de 10 µg/L ocurrió después de dos horas de exposición en el caso de días soleados (líneas B y C) y cuatro horas cuando el día estuvo nublado (línea A). El tiempo de exposición necesario para la remoción por debajo del límite establecido en los experimentos realizados en días soleados resultó igual al reportado por Litter y colaboradores (2012) utilizando la misma dosificación de hierro y agua sintética pero con luz ultravioleta artificial (366 nm; 0,800 W/m²).

Como ilustra la figura 3A, en las condiciones en que se realizó el presente estudio para el caso del experimento A, al estar el día nublado, no se tuvo suficiente radiación durante todo el tiempo de exposición, siendo menor a 0.400 W/m² después de la primera hora y media. En el caso del segundo experimento, como se muestra en la figura 3b, se consideró como un día bastante soleado (la radiación siempre estuvo por encima de 1,200 W/m² durante las primeras dos horas de exposición). Finalmente, en la figura 3c se indica que la radiación estuvo por encima de 0,600 W/m² logrando una remoción eficiente de arsénico después de dos horas.

Así, los datos sugieren que probablemente la radiación mínima durante dos horas está cerca de 0.600 W/m^2 . No obstante, en el caso de un día nublado se debe extender el tiempo de exposición. Se requieren investigaciones adicionales para determinar estos límites de exposición y características del día.

Por último, el agua obtenida después del proceso de filtración presentó en algunos casos concentraciones de hierro levemente superiores a la norma (0.3 mg/L), lo que sugiere que se deben realizar más experimentos para definir esta variable. Esta variable, al igual que la influencia del pH del agua que va a ser tratada y el trabajo con aguas reales, son aspectos que se están investigando.

V. Conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones.

El uso del procedimiento o sistema denominado RAOS, durante días soleados con suficiente radiación natural (posiblemente por encima de 0.600 W/m^2) permite la remoción de arsénico desde $200 \text{ } \mu\text{g/L}$ hasta valores por debajo de la norma en al menos 2 horas de exposición. En días nublados se debe extender ese tiempo hasta las 4 horas. No obstante, se requiere más investigación para definir estos tiempos adecuadamente. Aunado a ello, el agua producida por el método RAOS puede presentar residuales de hierro por encima de la norma (0.3 mg/L), por tanto, se debe determinar la cantidad mínima de viruta de hierro que permita una remoción apropiada de arsénico y un residual de hierro seguro.

Entre las principales ventajas que presenta el prototipo está el hecho de que es desmontable, lo que facilita su mantenimiento; además, su confección es muy sencilla. Otra ventaja es su bajo costo, no solo en los materiales necesarios sino también en los reactivos utilizados en el tratamiento, como el cloruro de hierro (III).

El prototipo presentó una menor eficiencia con las aguas naturales; esto se debe probablemente a que puede existir arsénico trivalente o la presencia de otras interferencias en el agua, como el sílice. Sin embargo, con el tratamiento se obtuvo una concentración de arsénico menor a 10 µg/L, lo cual es de esperarse puesto que al emplear el agua con la intención de probar el sistema, se vaticina que sea eficaz en la remoción de arsénico. Además, es efectivo en la remoción del hidróxido de hierro (III) del agua, lo que se refleja en la calidad del agua en los valores de hierro total, turbiedad y color.

Por lo anteriormente descrito se puede concluir lo siguiente: Es posible tratar aguas potables por medio de tecnologías solares. Los sistemas de potabilización de agua con energía solar permiten obtener agua limpia con un consumo energético bajo. Para la obtención del agua aplicando energía solar es de buena calidad, la gran ventaja de la aplicación de la energía solar es que la evaporación en el recipiente, se desarrolla en forma tranquila y no contaminan los vapores generados. Los equipos empleados en la oxidación solar permite que el pH natural produzca un sabor excelente. El agua tratada con oxidación solar tiene un sabor agradable. Así se puede concluir que la oxidación solar es un éxito ya que baja los niveles de las sales nocivas para el organismo humano contenidas en el agua. Este proceso de la oxidación solar se pudo comprobar con las tres pruebas que se realizaron.

5.2. Recomendaciones.

Finalmente, aunque en el agua testigo empleada para el desarrollo del presente proyecto, se incluyen especies interferentes, se debe evaluar su efecto con más detalle. Dado que cada tipo de agua presenta características únicas, antes de aplicar la tecnología en un agua específica se recomienda efectuar los ensayos pertinentes que garanticen una remoción de arsénico apropiada.

De igual manera, se recomienda continuar con ensayo en laboratorio, tomando en cuenta, diversas concentraciones de arsénico en el agua, ya que dicha

concentración, varía de un punto a otro, aun en la misma región. También se deberá de tomar en cuenta la variable correspondiente a la intensidad solar, así como el tiempo de exposición del agua a tratar.

5.3.- Definiciones aplicadas.

Arsénico: Elemento semimetálico sólido, de color gris metálico, que forma compuestos venenosos; se usa principalmente en la fabricación de vidrio para eliminar el color verde causado por las impurezas y en la fabricación de gases venenosos. Símbolo As

Absorción: Operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido con el cual forma solución

Biodegradable: Proceso natural en el que un material por acción biológica, cambia y en general pierde sus propiedades originales y a nivel químico las moléculas que lo conforma se convierten en formas más simples y estables.

Contaminación: Introducción de sustancias u otros elementos físicos en un medio que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso.

Coagulación: Proceso por el cual la sangre pierde su liquidez convirtiéndose en un gel, para formar un coágulo

Floculación: Proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

Fondo geoquímico: Concentración de un elemento en un determinado medio en ausencia de cualquier aporte externo específico derivado de la actividad humana.

Intercambio iónico: Es un intercambio de iones entre dos electrolitos o entre una disolución de electrolitos y un complejo.

Intoxicación: Se produce por exposición, ingestión, inyección o inhalación de una sustancia tóxica siempre y cuando sea de composición química.

Metales: Junto con los metales y los no metales, los semimetales (también conocidos como metaloides) comprenden una de las tres categorías de elementos químicos.

Oxidación: Es un indicador del grado de oxidación de un átomo que forma parte de un compuesto u otra especie química.

Tóxico: Que es venenoso o que puede causar trastornos o la muerte a consecuencia de las lesiones debidas a un efecto químico.

VI. Bibliografía.

Chang. (2007). *Química general*. McGraw-Hill Interamericana.

Carolin, e. a. (2017). Efficient Techniques for the Removal of Toxic Heavy Metals from Aquatic Environment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

Lawrence, E. R. (2003). *Diccionario Akal de Términos biológicos*. Ediciones Akal.

Lenntech. (2015). *Purificación del agua y tratamiento del aire*.

Litter, M. M. (2010). Experiencias de remoción de arsénico por tecnologías fotoquímicas y solares en Argentina. *Iberoarsen Tecnologías económicas para el abatimiento del arsénico en aguas*, 191-208.

CONAGUA. (2001). *Análisis de agua- Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas*". México.

CONANP. (10 de junio de 2019). <http://www.conanp.gob.mx>.

Contreras Pérez, J. B. (2004). Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del Río Haina. *Ciencia y Sociedad XXIX*.

López, A. E. (2011). Fitoremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (28 de junio de 2019). [www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2htm\(consulta 28 de junio del 2019\)](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2htm(consulta%2028%20de%20junio%20del%202019)).

DUFFUS, J. H. (2002). *Heavy metals - a meaningless term*.

Fenicola, A. G. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmaceuticas*.

Frimmel, M. B. (2003). Arsenic - a Review. Part I: Occurrence, Toxicity, Speciation, Mobility. *CLEAN*.

Kinniburgh, P. L. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*.

- M. Buenfil-Rojas, N. F. (2007). *Determinación de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) presentes en el río Hondo*. Quintana Roo.
- Meharg, M. H. (2008). Arsenate, arsenite and dimethyl arsenic acid (DMA) uptake and tolerance in maize. *Plant and Soil*.
- Mohan, D. P.-J. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using absorbents-A critical review. *Journal of Hazardous Materials* 142,, 1-53.
- Romero Rojas, J. (2012). Potabilización del agua. *Alfaomega*, 327.
- Rooney, C. F. (2006). soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in wide range of European soils. *Environmental Toxicology and Chemistry*.
- Selim, H. M. (2015). *Transport & Fate of Chemicals in Soils: Principles & Applications*. CRC Press.
- SINA. (2008). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). *Estadísticas del agua en México 2008*.
- Singh, B. y. (2010). *Synchrotron-based Techniques in Soils and Sediments*.
- Szafran, R. G.-K. (2011). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low-cost biosorbent. *Desalination* 265, 126-134.
- Wenzel, W. W. (2002). Arsenic in fieldcollected soil solutions and extracts of contaminated soils and its implication to soil standards. *Plant Nutrition and Soil Science*.
- Xiuying, Z. Z. (2015). Impact of Soil Heavy Metal Pollution on Food in China. *Plos one*.
- Hernández-García, L. M. 2007. Energía, energía fotovoltaica y celdas solares de alta eficiencia. Digital Universitaria.
- Duro-Mota, E. S. Campillo-Paez y S. Causín-Serrano. 2003. El sol y los filtros solares. MEDIFAM.
- YABROUNDI, S. C. 2008. Energías renovables. Tecnología de la información.
- Ravindra, B. 2015. Hemispheric asymmetry of sunspot area in solar cycle and rising phase of solar cycle. Comparison of three data sets. *New Astronomy*.

- Berardi, M. 2015. On the fragility of sunspot equilibria under learning and evolutionary dynamics. *Economic Behavior & Organization*.
- Peñaloza-Murrillo, M. A. 2015. Air-cooling mathematical analysis as inferred from the air-temperature observation during the 1st total occultation of the Sun of the 21st century at Lusaka, Zambia. *Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- Villacana-Ortiz, E., A. J. Gutierrez-Trashorras, J. Paedes-Sanchez y J. Xiberta-Bernat. 2015. Solar energy potential in the coastal zone of the Gulf of Mexico. *Renewable Energy*.
- Qingwu, M. 2015. Low-intensity blue light in night-interruption lighting does not influence flowering of herbaceous ornamentals. *Scientia Horticulture*.
- Mendoza, M. 1995. *Energía solar. Procesos Tecnológicos e Industriales*.
- Nahle, N. 2011. Radiación solar en la capa exterior de la atmósfera terrestre y sobre la superficie terrestre (suelo y océano). *Ciencias Físico-Matemáticas*.
- Azamat, S. 2015. Measuring the efficiency of the investment for renewable energy in Korea using data envelopment analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Jan, S. 2015. Willingly or grudgingly? A meta-analysis on the willingness-to-pay for renewable energy use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Peter, L., G. Jusso, M. Jani y S. Jyri. 2015. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Gutierrez-Trashorras, A. 2015. Solar energy potential in the coastal zone of the Gulf of Mexico. *Renewable Energy*.
- Peng, C., L. Huang, J. Liu y Y. Huang. 2015. En México existen alternativas que garanticen una asequible y ecológicamente aceptable suministro de energía en el futuro. *Renewable Energy*.
- Somanchi, R. 2015. Evaluation of a single basin solar still using different energy absorbing materials. *Science Direct*.
- Chavez, P. 2010. Aspectos: Ambiental, Institucional y Economía en la valoración del agua potable en Huanacayo. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.