



Biosorción de As mediante biomasa seca y carbón activado de nopal (*Opuntia ficus indica*).

Tesis profesional que para obtener el título de:

Ingeniero Ambiental

Presenta:

Mauricio Antonio Torres Olguín.

Director de Tesis:

M. en E. IBQ Erick Rodolfo López Almanza.

Codirector de Tesis:

Ing. Sandro Leonel Maldonado Méndez.



Autorización de presentación de trabajo de titulación

Se autoriza al estudiante **Mauricio Antonio Torres Olguín** inscrito en la carrera de “Ingeniería Ambiental” del Instituto Tecnológico Superior de Abasolo, con número de control **AS18110561**, a defender su proyecto de trabajo de titulación “**Biosorción de As mediante biomasa seca y carbón activado de nopal (*Opuntia ficus indica*)**” ante el comité sinodal asignado.

La presente se expide en Abasolo Guanajuato a los 05 de agosto de 2022.

M. en E. IBQ Erick Rodolfo López Almanza.

Presidente del sínodo

Ing. Sandro Leonel Maldonado Méndez

Secretario del sínodo

Dr. Carlos Alberto González Razo.

Vocal del sínodo

Dedicatorias.

A Dios por siempre estar presente en mi vida, darme fuerzas para superar los obstáculos y dificultades.

Dedico de manera muy especial este trabajo de investigación a mis padres Teófilo Torres Reyes y Ma. Guadalupe Olguín Raya por su cariño, comprensión y apoyo incondicional y a mis hermanos y hermanas: María Esperanza, Juana Noemí, Eva Isabel, María Magdalena, Pablo Esaú y Nora Paulina.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la dicha de la vida y las fuerzas necesarias para cumplir esta meta y no darme por vencido.

A mis padres, hermanas y hermano por siempre apoyarme en todos los aspectos y no darme por vencido gracias a sus consejos, comprensión y apoyo.

Agradezco al M. en E. IBQ Erick Rodolfo López Almanza, por ser mi asesor y profesor de toda la carrera, por todos sus conocimientos, apoyo, consejos y recomendaciones para el cumplimiento del proyecto.

A la Maestra Fabiola Elías Cabrera por todo su apoyo y consejos.

A todos mis profesores de la carrera por todos los conocimientos, habilidades, valores y consejos.

A mis compañeros que estuvieron a lo largo de la carrera por todos los momentos pasados.

Resumen

El arsénico es un elemento químico altamente tóxico se encuentra presente en la mayor parte de la corteza terrestre, es utilizado ampliamente en productos químicos sin embargo se ha dejado de utilizar por los efectos perjudiciales a la salud humana y medio ambiente, en el estado de Guanajuato existe contaminación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneos por contaminación antropogénica y en algunos casos por el aporte natural del suelo, lo que representa una problemática de salud pública y búsqueda de nuevos métodos de eliminación de metales pesados a bajo costo para proveer agua de calidad para la población.

En esta investigación se evaluó la capacidad bioadsorbente de tres tratamientos a base de nopal para la remoción de arsénico en aguas potables contaminadas, el primero a base de biomasa seca de nopal molido (T1), carbón activado de nopal (T2) y una combinación de ambos (T3), los cladodios de nopal seco se recolectaron en el cerro de la comunidad Loma de la Esperanza, el primer tratamiento fue rociado con ácido clorhídrico 1%, secado al aire libre y molido, el tratamiento dos, fue activado químicamente usando ácido fosfórico y una temperatura de 500°C, fue lavado con NaOH 0.1 N para ajustar el pH y finalmente pulverizado, se realizó un muestreo en el municipio de Abasolo, las muestras seleccionadas fueron de 0.02 mg/L de la Comunidad Rancho Nuevo de la Cruz (M1), 0.025 de la Comunidad Loma de la Esperanza (M2) y 0.1 mg/L de la Colonia Los Pinos (M3), para la determinación de la concentración de las muestras se utilizó el kit portátil de arsénico MQuant® As Arsenic Test, las muestras se filtraron en cada uno de los tratamientos al finalizar se determinó la concentración final del arsénico y se realizó la medición de parámetros fisicoquímicos como turbidez, pH, conductividad eléctrica y el tiempo de filtrado, los resultados se compararon con la NOM-127-SSA1-1994 (2000), demostrando que el uso de biomasa seca molida y carbón activado de nopal son una alternativa viable y ecológica para la remoción de arsénico en aguas potables, el mejor tratamiento fue el T3 la combinación de la biomasa seca molida y carbón activado de nopal en todas las concentraciones de las muestras con porcentajes de

remoción del 93.3% para la muestra de 0.1 mg/L de As, un 60% para la muestra de 0.025 mg/L y un 50% para la muestra de 0.02 mg/L, la biomasa seca molida de nopal obtuvo una remoción del 80% para la muestra de 0.1 mg/L de As, un 26.7% para la muestra de 0.025 mg/L y un 25% para la muestra de 0.02 mg/L y el carbón activado obtuvo resultados del 50% para la muestra de 0.1 mg/L de As, un 20% para la muestra de 0.025 mg/L y un 33.3% para la muestra de 0.02 mg/L.

Los parámetros fisicoquímicos como la conductividad eléctrica en todos los tratamientos se mantuvieron dentro del límite máximo permisible (LMP), la turbidez en el T1 y T3 no fue medible mientras que el T2 obtuvo un valor aceptable y dos superiores al LMP, el T3 obtuvo un valor aceptable y los dos restantes cercanos al LMP, el T1 obtuvo un valor aceptable y los dos restantes superiores al LMP, el T2 obtuvo un valor aceptable mientras que los dos restantes son inferiores al LMP.

El mejor tratamiento fue la combinación de la biomasa de seca molida y el carbón activado, el segundo la biomasa seca de nopal molido y con resultados más bajos el carbón activado de nopal, lo que demuestra la capacidad de adsorción de As en aguas potables contaminadas con este metal.

Palabras Clave: Arsénico, nopal, carbón activado, bioadsorción

Abstract

Arsenic is a highly toxic chemical element is present in most of the earth's crust, it is widely used in chemical products however it has ceased to be used due to the harmful effects on human health and the environment, in the state of Guanajuato there is contamination of surface and underground water bodies by anthropogenic pollution and in some cases by the natural contribution of the soil, which represents a public health problem and search for new methods of removal of heavy metals at low cost to provide quality water for the population.

In this research, the bioadsorbent capacity of three nopal-based treatments for the removal of arsenic in contaminated drinking water was evaluated, the first based on dry biomass of ground nopal (T1), activated carbon of nopal (T2) and a combination of both (T3), the cladodes of dried nopal were collected in the hill of the Loma de la Esperanza community, the first treatment was sprayed with 1% hydrochloric acid, dried outdoors and ground, treatment two, was chemically activated using phosphoric acid and a temperature of 500°C, was washed with NaOH 0.1 N to adjust the pH and finally pulverized, a sampling was carried out in the municipality of Abasolo, the selected samples were 0.02 mg / L from the Rancho Nuevo de la Cruz Community (M1), 0.025 from the Loma de la Esperanza Community (M2) and 0.1 mg/L from the Los Pinos Colony (M3), for the determination of the concentration of the samples, the portable arsenic kit MQuant® As Arsenic Test was used, the samples were filtered in each of the treatments at the end the final concentration of arsenic was determined and the measurement of physicochemical parameters such as turbidity, pH, electrical conductivity and filtering time was carried out, the results were compared with NOM-127-SSA1-1994 (2000), demonstrating that the use of ground dry biomass and nopal activated carbon are a viable and ecological alternative for the removal of arsenic in drinking water, the best treatment was T3 the combination of ground dry biomass and nopal activated carbon in all sample concentrations with removal percentages of 93.3% for the 0.1 mg/L as sample, 60% for the 0.025 mg/L sample and 50% for the 0.02 mg/L sample, the ground dry

biomass of nopal obtained a removal of 80% for the sample of 0.1 mg/L of As, 26.7% for the sample of 0.025 mg/L and 25% for the sample of 0.02 mg/L and the activated carbon obtained results of 50% for the sample of 0.1 mg/L of As, 20% for the 0.025 mg/L sample and 33.3% for the 0.02 mg/L sample.

Physicochemical parameters such as electrical conductivity in all treatments were maintained within the maximum permissible limit (PML), turbidity in T1 and T3 was not measurable while T2 obtained an acceptable value and two higher than PML, T3 obtained an acceptable value and the remaining two close to PML, T1 obtained an acceptable value and the remaining two higher than PML, T2 obtained an acceptable value while the remaining two are lower than PML.

The best treatment was the combination of ground dry biomass and activated carbon, the second the dry biomass of ground nopal and with lower results the activated carbon of nopal, which demonstrates the adsorption capacity of As in drinking water contaminated with this metal.

Key Words: Arsenic, nopal, activated charcoal, bioadsorption

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1: MARCO TEÓRICO.....	3
1. 1 El agua.....	4
1.2 Normatividad en calidad del agua.....	5
1.3 Metales pesados.....	6
1.4 Arsénico.....	7
1.5 Impactos ambientales y efectos a la salud.	8
1.5.1 Impactos ambientales.	8
1.5.2 Efectos a la salud humana.	10
1.6 Métodos de remoción de metales pesados.	11
1.7 Bioadsorción	12
1.8 Biofiltración	14
1.9 Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	15
1.10 Carbón activado.....	18
1.10.1 Síntesis de carbón activado	18
1.10.1.1. Activación química.	19
1.10.1.2 Activación física.....	19
Capítulo 2: GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	21
2.1 Planteamiento del problema	22
2.2 Justificación	23
2.3 Hipótesis.....	24
2.4 Objetivos.....	24

2.4.1 Objetivo general	24
2.4.2 Objetivos específicos	24
Capítulo 3: METODOLOGÍA.....	25
3.1 Obtención de cladodios de nopal.....	26
3.1.1 Obtención de cladodios de nopal secos.....	26
3.2 Pretratamiento de materia prima con ácido clorhídrico al 1%.....	28
3.2.1 Molienda de biomasa seca de nopal.....	29
3.3 Elaboración de carbón activado.....	31
3.3.1 Calcinación de la biomasa.	31
3.3.2 Activación del carbón de nopal.	32
3.3.3 Lavado del carbón activado.	34
3.3.4 Pulverizado del carbón activado de nopal.....	36
3.3.4 Visualización del carbón activado.	37
3.4 Muestreo de aguas contaminadas.....	37
3.5 Determinación de As en muestras de agua potable.	40
3.6 Filtraciones.	43
3.7 Determinación de la concentración final.	45
3.8 Determinación de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad y turbidez).	45
3.8.1 Medición de turbidez.	45
3.8.2 Medición de pH y conductividad.....	46
3.9 Incineración de la biomasa.	47
Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1 Resultados visuales carbón activado de nopal.....	49

4.2 Resultados de filtraciones de arsénico, pH, conductividad eléctrica y turbidez.	50
CONCLUSIÓN	54
Bibliografía.....	58

Índice de tablas

Tabla 1.1 Taxonomía del Nopal.	16
Tabla 3.1. Ubicación de la zona del muestreo.....	37
Tabla 4.1 Concentración final y remoción de As.	51
Tabla 4.2 Resultados de parámetros fisicoquímicos.	52

Índice de figuras

Figura 3.1 Delimitación del área de recolección de cladodios secos y frescos de nopal (Google Earth, 2021)	26
Figura 3.2 Recolección biomasa seca de nopal (Tomada por: Torres, 2021)	27
Figura 3.3 Bioma seca de nopal recolectada (tomada por: Torres, 2021).....	27
Figura 3.4 Aplicación de ácido clorhídrico 1% a biomasa seca de nopal (Tomado por: Torres, 2021)	28
Figura 3.5 Secado de la biomasa de nopal (Tomado por: Torres, 2021)	28
Figura 3.6 Molienda de nopal (Tomado por: Torres, 2021)	29
Figura3. 7 Biomasa de nopal triturada (Tomado por: Torres, 2021).....	29
Figura 3.8 Tamizado de la biomasa de nopal triturada (Tomado por: Torres, 2021)	30
Figura 3.9 Biomasa de nopal tamizada (Tomado por: Torres, 2021)	30
Figura 3.10 Calcinación de la biomasa seca de nopal (Tomado por: Torres, 2022)	31
Figura 3.11 Reducción de oxígeno en la calcinación de la biomasa (Tomado por: Torres, 2022).....	31
Figura 3.12 Carbón de nopal obtenido de la calcinación (Tomado por: Torres, 2022)	32
Figura 3.13 Carbón de nopal (Tomado por: Torres, 2022).....	32
Figura 3.14 Adición del ácido fosfórico 20% y retiro de exceso (Tomado por: Torres, 2022).....	33

Figura 3.15 Eliminación de la humedad remanente en el carbón de nopal a 110°C (Tomado por: Torres, 2022)	33
Figura 3.16 Activación del carbón de nopal a 500°C (Tomado por: Torres, 2022)	34
Figura 3.17 Lavado del carbón activado de nopal con NaOH 1 N (Tomado por: Torres, 2022).....	35
Figura 3.18 Carbón activado de nopal seco (Tomado por: Torres, 2022)	35
Figura 3.19 Pulverizado del carbón activado de nopal (Tomado por: Torres, 2022)	36
Figura 3.20 Carbón activado de nopal en polvo (Tomado por: Torres, 2022)	36
Figura 3.21 Sitio de toma de muestras en Rancho Nuevo de la Cruz (Google Earth, 2022)	38
Figura 3.22 Sitio de toma de muestras en Loma de la Esperanza (Google Earth, 2022)	39
Figura 3.23 Sitio de toma de muestras en Colonia los Pinos, Abasolo (Google Earth, 2022)	39
Figura 3.24 Añadir 60 ml de muestra (Tomada por: Torres, 2021)	40
Figura 3.25 Añadir Reactivo As-1 y agitar ligeramente (Tomada por: Torres, 2021)	41
Figura 3.26 Añadir Reactivo As-2 y agitar ligeramente (Tomada por: Torres, 2021)	41
Figura 3.27 Añadir Reactivo As-3 y cerrar inmediatamente (Tomada por: Torres, 2021)	42

Figura 3.28 Dejar reposar la muestra 20 minutos y agitar dos o tres veces en dicho tiempo (Tomada por: Torres, 2021)	42
Figura 3.29 Lectura de resultado de acuerdo con la colorimetría (Tomada por: Torres, 2021).....	43
Figura 3.30 Filtración de agua con arsénico 0.025 mg/L y 0.01 mg/L, usando biomasa seca de nopal (Tomada por: Torres, 2021)	44
Figura 3.31 Filtración de agua con arsénico 0.025 mg/L y 0.01 mg/L, usando carbón activado de nopal (Tomada por: Torres, 2021)	44
Figura 3.32 Filtración de agua con arsénico 0.025 mg/L y 0.01 mg/L, tratamiento 3 (Tomada por: Torres, 2021)	45
Figura 3.33 Procedimiento de medición de la turbidez del agua (Tomada por: Torres, 2021).....	46
Figura 3.34 Medición de pH y conductividad usando el medidor de bolsillo HI98130 (Tomada por: Torres, 2021)	47

INTRODUCCIÓN.

Los metales pesados se caracterizan por tener un alto grado de toxicidad la cual afecta la salud humana y causan daños al medio ambiente, actualmente existen métodos químicos y físicos los cuales son costosos y causan daños al medio ambiente, así como métodos biológicos a base de desechos agroindustriales, algunas, plantas, bacterias, entre otros., los cuales son de bajo costo y tienen gran capacidad de remover metales pesados presentes en aguas potables o residuales. El arsénico es un elemento altamente toxico que su ingesta prolongada ocasiona enfermedades de aguas a crónicas al ser humano se puede ingerir por medio de aguas potables contaminadas, inhalación por gases tóxicos, pescados o mariscos, alimentos, frutas y vegetales regadas con aguas contaminadas con este metal.

En el capítulo I, aparecen las bases teóricas, donde se explican conceptos claves para entender el tema y desarrollo del proyecto, que son los metales pesados, el arsénico y sus efectos ambientales y salud humana además de la normatividad vigente del mismo, las tecnologías convencionales y no convencionales utilizadas para remover metales pesados, el uso de la biofiltración y materiales bioadsorbentes con capacidad de remoción de metales pesados, el nopal usos y aplicaciones industriales y el carbón activado beneficios, usos y forma de síntesis del mismo.

En el capítulo II se menciona la problemática existente del arsénico en el mundo, país y estado, importancia de la realización del estudio, objetivo general y específicos y se plantea una posible hipótesis sobre el trabajo de investigación.

En el capítulo III, se expone la metodología que se efectuó para el proceso experimental, la recolección de materia prima, molienda del nopal seco, elaboración del carbón activado, muestreo de aguas potables contaminadas con As, determinación del arsénico utilizando kit portátil, filtraciones de las muestras en los tratamientos y la medición de la concentración final del metal y los parámetros fisicoquímicos.

El en Capitulo IV se muestran los resultados de las filtraciones y parámetros fisicoquímicos, se analiza y discute la eficiencia de los porcentajes de remoción de arsénico de cada uno de los tratamientos y comparan los resultados con la normatividad ambiental nacional y organismos internacionales como la OMS y EPA, y finalmente se muestran las conclusiones a las que se llegó en este estudio.

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO.

1. 1 El agua.

El agua es la sustancia más importante e indispensable para la vida, se caracteriza por tener una estructura química sencilla constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O), los cuales están unidos mediante enlaces polares que le permiten establecer puentes de hidrógeno con otras moléculas, esta característica es la que le confiere propiedades físicas, químicas y biológicas únicas en su molécula (Velasco, 2018).

Es la fuente y el sustento de la vida, ayuda a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra. Es esencial para la vida debido a que presenta propiedades únicas. Es un material flexible: un solvente extraordinario, un reactivo ideal en muchos procesos metabólicos; posee una gran capacidad calorífica y tiene la propiedad de expandirse cuando se congela, se encuentra en tres estados sólido, líquido y gaseoso. Con su movimiento puede modelar el paisaje y afectar el clima (Fernandez, 2012).

Los océanos ocupan casi el 97.5 % del agua del planeta. De la cual solamente un 2,5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1%. Esta baja cantidad de agua de superficie fácilmente accesible se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%). De modo que, sólo alrededor de una centésima parte del total del agua del planeta está disponible para la vida terrestre (Fernandez, 2012).

Actualmente, el mundo se enfrenta a diversos problemas afines con la escasez del agua. Debido al acelerado crecimiento de la población mundial, el abuso de los sistemas hídricos y la descarga de una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos como metales pesados, trazas de pesticidas, fertilizantes, antibióticos y fármacos, sustancias radioactivas, nitratos y fosfatos, entre otros., el acceso a este recurso es cada vez más limitado. Asimismo, el cambio climático ha favorecido a modificar la demanda de agua en diversas regiones. Por lo tanto, se estima que alrededor de 780 millones de personas en el mundo carecen de un suministro

adecuado y millones de niños mueren cada año de enfermedades provocadas por la contaminación de este líquido (Contreras, 2017).

1.2 Normatividad en calidad del agua.

Organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera perjudicial para el ser humano el consumo de agua con una concentración de arsénico superior a 10 mg/L debido a su alto grado de toxicidad, al igual la Agencia de Protección Ambiental (EPA), dentro de su lista de productos contaminantes del agua cataloga al arsénico en el primer lugar, por lo cual en 2006 se redujo en Estados Unidos la concentración de arsénico en agua potable de 50 mg/L a 10 mg/L. (Rangel, Montañez, Luévanos, & Balagurusamy, 2015)

En México la Norma Oficial Mexicana 127 (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, indica un valor de 0.05 mg/L de arsénico, en el año 2000 fue modificada reduciendo cada año gradualmente 0.005 mg/L de arsénico hasta llegar en 2005 a la concentración de 0.025 mg/L (Secretaría de Salud , 2000).

Dicha norma cuenta con límites discutibles en algunos parámetros que no son lo suficientemente estrictos comparados con la normatividad internacional o de la Organización Mundial de la Salud, como la concentración segura de arsénico. El 2 de mayo del 2022 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la norma NOM-127-SSA1-2021, que sustituye a la NOM-127-SSA1-1994, modificación del año 2000, y que deberá entrar en vigor a los 360 días naturales contados a partir del día siguiente de su publicación (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2015).

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, establece un LMP de 0.01 mg/L, dicha concentración disminuirá de manera gradual de acuerdo con su población, mayor de 500,000 habitantes aplica un año, entre 50,000 y 499,999 habitantes tres

años, menor de 50,000 habitantes seis años, posterior a la entrada en vigor de la presente Norma (Secretaría de Salud, 2022).

La NORMA Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2015, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias, la cual establece las disposiciones y especificaciones sanitarias que deben cumplir el agua y hielo para consumo humano envasados y a granel, excepto la que es consumida directamente de los sistemas de abastecimiento con un valor límite de 0.01 mg/L de As (SSA, 2015)

1.3 Metales pesados.

Los metales pesados son un conjunto de elementos que muestran propiedades metálicas, en el que se incluyen metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. Generalmente su clasificación se basa en la densidad específica, de acuerdo con la cual se incluyen en este grupo elementos con una densidad mayor a 5 g/cm³. No obstante, algunos autores consideran esta definición como inapropiada, puesto que la densidad específica no es una referencia en cuanto a la reactividad o toxicidad de un metal. Actualmente, el término “metal pesado” es utilizado para referirse de una manera amplia a aquellos metales o metaloides con potencial de causar problemas de toxicidad a los seres vivos (Covarrubias & Peña, 2017)

Se introducen al medio ambiente a través de fuentes naturales o antropogénicas. Las fuentes naturales como meteorización, erosión de rocas o suelo y emisiones. Por otro lado, las principales fuentes antropogénicas son las aguas residuales no tratadas de industrias como la fabricación de baterías, plásticos, fertilizantes, papel, minería, combustibles y curtiduría (Contreras, 2017).

Los metales pesados como el plomo, mercurio, cadmio, arsénico, cromo, entre otros, son perjudiciales para la salud de los humanos y animales. Entre las afectaciones causadas a la salud por el consumo de trazas de estos elementos tóxicos se resaltan: daño al sistema reproductivo, inmune, cardiovascular, nervioso, digestivo e incluso daño celular. Los efectos de los metales pesados en el

funcionamiento del ecosistema varían considerablemente y son de importancia económica y salud pública (García A. , 2021)

En México, la contaminación por metales pesados ha aumentado, principalmente, debido al desarrollo y a actividades industriales como la metalúrgica y la minera, la agricultura y las emisiones vehiculares. Además, en algunos acuíferos también ha incrementado su presencia debido al aporte natural de minerales metálicos provenientes de la corteza del subsuelo (Covarrubias & Peña, 2017).

1.4 Arsénico.

El arsénico es un elemento con número atómico de 33 y 74.92 de masa atómica, se encuentra en el grupo 15 (VA) de la tabla periódica y en la corteza terrestre es el vigésimo elemento más abundante. Raramente se encuentra libre en el ambiente natural, su ruta principal de dispersión es el agua. En el agua subterránea el arsénico de origen natural está ligado a los procesos de oxidación-reducción que afectan al As y a la litología de materiales geológicos que conforman el acuífero (Avila & Alata, 2020).

El arsénico está formado en cuatro estados de oxidación, -3, 0, +3 y +5. La mayoría de estos compuestos arsenicales en organismos, y en alimentos están en un estado de oxidación pentavalente. Los compuestos arsenicales que se hallan en estado de oxidación trivalente y pentavalente son los de mayor interés en estudios ambientales y estos se pueden clasificar en tres grupos, compuestos arsenicales inorgánicos, orgánicos y la arsina (Capacoila, 2020).

El arsénico (As) ocupa el lugar 20 en abundancia de los elementos en la corteza terrestre y se distribuye de manera irregular por todo el mundo, dependiendo del área geográfica, características geoquímicas del suelo y actividades industriales. Aproximadamente un tercio del arsénico presente en la atmósfera procede de fuentes naturales como reacciones ambientales, actividad biológica, emisiones volcánicas, y el resto desciende de un amplio rango de actividades antropogénicas (Rangel, Montañez, Luévanos, & Balagurusamy, 2015)

Actualmente las fuentes naturales de As han demostrado un impacto devastador en la calidad del agua. El arsénico se vuelve una problemática en el ámbito de la salud principalmente cuando se divide en la fase acuosa en lugar de la sólida. Las concentraciones disueltas y la movilidad resultante de As en suelos y sedimentos son el resultado combinado de procesos biogeoquímicos vinculados a factores hidrológicos. Los procesos que favorecen la partición de As en la fase acuosa, que pueden llevar a concentraciones peligrosas, varían extensamente, pero pueden agruparse en cuatro categorías: (1) desplazamiento de iones, (2) desorción (o sorción limitada) a valores de pH > 8,5, (3) reducción de arsenato a arsenito, y (4) disolución mineral, particularmente disolución reductiva de Fe y Mn hidróxidos (Mamani, 2019).

El arsénico es altamente tóxico y su presencia en aguas subterráneas es una problemática mundial. La toxicidad de este elemento está relacionada a su forma química y estados de oxidación. Biológicamente el As (III) es considerado 60 veces más tóxico que el As (V) y a su vez, los compuestos inorgánicos son 100 veces más tóxicos que los compuestos orgánicos. El arsénico es un veneno acumulativo que afecta a casi todos los órganos, tejidos y sistemas. La exposición a arsénico puede ser aguda, si la dosis de arsénico es elevada y en un corto tiempo, o crónica, si la dosis de arsénico es baja y en un largo tiempo (Fiestas & Millones, 2019).

1.5 Impactos ambientales y efectos a la salud.

1.5.1 Impactos ambientales.

Los efectos tóxicos de los metales pesados se manifiestan afectando la tasa de crecimiento, funciones fisiológicas, reproducción y mortalidad en peces. Los metales pueden ingresar a los peces mediante tres vías: branquias, tracto digestivo y superficie de la piel. Las agallas son la vía a través de la cual se produce la mayor tasa de ingreso de los metales desde el agua y la superficie de la piel representa el menor porcentaje. El arsénico afecta los parámetros hematológicos, bioquímicos e ionoregulatorios de los organismos. Exposiciones continuas de organismos acuáticos, incluyendo peces, a bajas concentraciones de este metal ha dado como

resultado la bioacumulación, estando focalizada en hígado y riñón en los peces (Tomaila & Iannacone, 2018).

Los síntomas agudos en animales como cerdos y aves después de la ingesta del arsénico o sus derivados aparecen en un lapso de tres a cinco días después de exposición a niveles elevados, algunos de los síntomas registrados están la falta de coordinación, ataxia, llegando posteriormente a causar la parálisis del cuerpo (Chalen, 2021).

Algunos efectos provocados que provoca el arsénico a las plantas se mencionan a continuación:

Dentro de los efectos de la toxicidad del arsénico en la morfología de las plantas, se encuentra la reducción del número de hojas, clorosis, necrosis de la hoja y defoliación. En la fisiológica afecta en la disminución del crecimiento de brotes y raíces, conductancia estomática restringida y absorción de nutrientes, degradación de la clorofila, producción limitada de biomasa y rendimiento. Con relación al daño bioquímico, se tiene la sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Bayona, 2020).

El As afecta la tasa fotosintética de las plantas, ya que, a concentraciones muy altas, el As altera la membrana de los cloroplastos y desestabiliza su funcionamiento fotosintético, al disminuirse la síntesis de pigmentos y las concentraciones de clorofila a y b y clorofila total. También afecta en la disminución de la capacidad de disipación de calor de una planta, lo que causa los cambios en las tasas de intercambio de gases y la emisión de fluorescencia; esto induce a una disminución del crecimiento de la hoja y de la raíz, acompañada de marchitamiento y una coloración violeta en las hojas (Bayona, 2020)

El As (V) en las plantas reemplaza al fosfato, lo que altera la fosforilación oxidativa y la fotofosforilación, lo que provoca una disminución de la capacidad de las células para producir ATP en la membrana plastídica de los tilacoides y de la membrana mitocondrial. Otros procesos sensibles a la toxicidad de As (V), son el metabolismo

del ARN y del ADN, el metabolismo de los fosfolípidos, la fosforilación oxidativa, la glucólisis y la fosforilación o desfosforilación de proteínas (Bayona, 2020).

El daño de membranas celulares por el As es producido por el desequilibrio en la absorción de nutrientes y agua en las células, lo que provoca una disminución en la conductancia estomática (Bayona, 2020).

1.5.2 Efectos a la salud humana.

Existen cuatro formas clínicas para la intoxicación con arsénico, las cuales son:

- 1) Intoxicación sobreaguda o comatosa; evoluciona en un lapso de horas.
- 2) Intoxicación aguda; puede ser gastrointestinal, cardíaca o polineurítica, y evoluciona en semanas.
- 3) Intoxicación subaguda; evoluciona en semanas.
- 4) Intoxicación crónica, polineurítica o cutánea; se desarrolla en meses o pueden ser años (De la Rosa, 2018).

Los dos tipos de intoxicación más frecuente son la aguda y crónica.

Intoxicación aguda: los síntomas comienzan a manifestarse en un lapso de entre 30 minutos y 24 horas, lo cual se debe a que el mecanismo de acción es reflejo, los principales síntomas son:

- Vómito abundante.
- Diarrea líquida, a veces sanguinolenta.
- Dolor abdominal severo.
- Sensación de quemadura en esófago.
- Olor aliáceo en aliento y saliva.
- Cefalea, debilidad y vértigo (De la Rosa, 2018).

La persona sobreviviente por intoxicación de As, puede presentar daño renal, hepático y cardíaco, de naturaleza degenerativa. En la exposición a gas de arsina, hay un periodo de latencia hasta de 24 horas, al que le siguen dolor abdominal,

hemólisis e insuficiencia renal. Pero, si la exposición es prologada a bajas dosis se presenta ronquera, perforación del tabique nasal, anemia y trastornos digestivos.

Intoxicación crónica: se debe a la ingestión prolongada de pequeñas cantidades del tóxico, se presentan enfermedades y síntomas como:

- Trastornos digestivos y nutricionales: consistente en adelgazamiento, fatiga, inapetencia, náuseas, vómito y diarrea bronquial.
- Trastornos catarrales: secreción nasal, cefalea y secreción bronquial.
- Trastornos de la piel: tonalidad bronceada con puntos blanquecinos (melanodermia en “gotas de lluvia”), luego aparece hiperqueratosis palmar y plantar, que puede evolucionar en carcinoma epidermoide. En las uñas aparecen líneas blancas (líneas de Mee).
- Trastornos neurológicos: presencia de los signos de mano en garra y pie caído (De la Rosa, 2018).

1.6 Métodos de remoción de metales pesados.

Los tratamientos de remoción de metales pesados en aguas potables o residuales se clasifican como físico, químicos y biológicos, sin embargo, también pueden clasificarse como convencionales (físicoquímicos) y no convencionales (biológicos).

Técnicas convencionales tales como:

- Filtración por membrana (Electrodialisis, ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración).
- Intercambio iónico.
- Adsorción convencional (carbón activado y nanotubos de carbono).
- Precipitación química.
- Electrocoagulación, coagulación-floculación, electrofloculación, flotación y fotocatalisis en la degradación de metales pesados (Caviedes, Muñoz, Gualtero, Rodríguez, & Sandoval, 2015).

Técnicas no convencionales tales como:

- Adsorbentes de bajo costo y nuevos (bacterias, algas, levaduras y hongos).
- Adsorción de metales pesados por materiales naturales, agrícolas e industriales
- Fitorremediación (plantas y microorganismos del suelo)
- Biopolímeros (hidroxilos y aminas)
- Hidrogeles.
- Ceniza Volante de carbón (Caviedes, Muñoz, Gualtero,, Rodríguez, & Sandoval, 2015).

1.7 Bioadsorción

La bioadsorción o biosorción es una subcategoría de la adsorción que consiste en la captación o retención pasiva de diversas especies químicas (metales pesados), sobre la superficie de un material de origen biológico (vivo, inactivo o muerto) a través de mecanismos fisicoquímicos como el intercambio iónico, formación de complejos de coordinación, adsorción física, procesos de micro precipitación, reacciones redox (Gallegos, 2021).

Los factores que pueden intervenir en el proceso de bioadsorción son:

- Solución: influencia del pH, temperatura, tiempo de contacto, la fuerza iónica, la presencia de otros iones, la concentración inicial del metal y naturaleza del adsorbato.
- Biomaterial: tamaño de partícula. método de pretratamiento, sitios activos en los biadsorbentes y naturaleza o tipo de adsorbente. (Gallegos, 2021)

Las paredes celulares de los materiales bioadsorbentes contienen polisacáridos, proteínas y lípidos y numerosos grupos funcionales con la capacidad de enlazar metales pesados en la superficie de estos (Torres, y otros, 2020).

El proceso de la bioadsorción implica una fase sólida (bioadsorbente) y una fase líquida que contiene las especies disueltas (adsorbato) las cuales son retenidas por el sólido gracias a la afinidad entre el bioadsorbente y bioadsorbato mediante la unión rápida y reversible de ambos. Dicha afinidad se debe a la existencia de grupos químicos que contribuyen en este proceso, los cuales pueden ser: hidroxilo, carbonilo, carboxilo, sulfhidrilo, tioéter, sulfonato, amina, amino, imidazol, fosfonato y fosfodiéster, conocidos por su potencial nucleófilo los cuales difieren en su afinidad y especificidad respecto a la susceptibilidad para unirse a diferentes iones metálicos (Gallegos, 2021).

Se utilizan diferentes materiales de origen biológico como: algas, hongos, bacterias, restos de mariscos, residuos agrícolas, desechos forestales, etc., los cuales se encuentran en gran abundancia y son fácilmente transformables a bioadsorbentes. Una de las ventajas del uso de biomateriales como adsorbentes es que son abundantes en la naturaleza y están disponibles a un muy bajo costo (Moreno, 2013).

La bioadsorción es un proceso estudiado por muchos investigadores, demostrando ser una técnica alternativa a los métodos convencionales para el tratamiento de diferentes efluentes industriales contaminados con metales pesados y colorantes. Algunos bioadsorbentes son de amplio espectro, es decir, que no son selectivos para un tipo de contaminante en particular, mientras que otros pueden ser específicos para ciertos tipos de contaminantes (Moreno, 2013).

Algunas ventajas que presenta la bioadsorción comparada con otros tipos de tratamiento son:

- Bajo costo.
- Menor generación de lodos biológicos y químicos
- Alta eficiencia para bajas concentraciones de metales.
- Eficiencia para una amplia gama de condiciones de pH y temperatura.
- Recuperación fácil de material adsorbido.

- Producción fácil y barata de biomasa.
- Trabaja con biomasa no viva, reduciendo la posibilidad de contaminación, efectos tóxicos y actividades metabólicas (Garzón, 2020).

1.8 Biofiltración

La filtración es utilizada principalmente como un o tratamiento de potabilización de agua y de aguas residuales. En el tratamiento de aguas, se utiliza para depurar el agua superficial para uso potable y en el tratamiento de aguas residuales, el principal objetivo es producir efluentes de alta calidad para que el agua pueda ser reutilizable para diversos fines (Becerra, 2022).

La biofiltración es una técnica de remediación biológica, que utiliza procesos biológicos con organismos vivos para descontaminar agua o suelos. La biofiltración es un proceso biológico de soporte sólido, la cual mediante el uso de material filtrante se crea una fina película, capaz de depurar aguas residuales. Los más conocidos en los sistemas de tratamiento convencionales son el filtro percolador, el filtro de roca horizontal en una corriente contaminada, el carbón activado granular o el filtro de arena en la planta de tratamiento de aguas residuales (Becerra, 2022).

La biofiltración es una tecnología poco conocida en el tratamiento del agua potable a gran escala, se conocen algunas aplicaciones en sistemas de tratamiento a nivel domiciliar, habitualmente es más utilizada en aguas residuales domésticas. En este tipo de tratamiento los microorganismos son los que efectúan el proceso, éstos utilizan los compuestos contaminantes presentes en el agua como una fuente de carbono, metabolismo y crecimiento. Es un método generalmente más utilizado en el tratamiento de aguas residuales, pero actualmente ya se está utilizando en el tratamiento de agua para consumo humano (Pineda, 2021).

Un biofiltro es un ambiente en el cual los microorganismos son los encargados de la degradación biológica de los contaminantes presentes en el agua, los cuales se utilizan como sustrato o alimento para la supervivencia. Es un reactor que contiene un material de soporte filtrante en el cual se desarrolla una biomasa, frecuentemente

se inyecta aire para mantener las condiciones aerobias en todo el conjunto de soporte (Pineda, 2021).

Los biofiltros pueden estar contruidos por gran variedad de materiales orgánicos como astillas de madera, cáscaras de semillas, bagazos de fruta entre otros o bien, inorgánicos como la grava, el carbón activado, arcillas, cerámicas entre otros, pueden usarse estos materiales combinados o de forma individual para obtener una buena remoción de contaminantes. Al estar compuestos en su mayoría de materia orgánica se les conoce también como “filtros biológicos” los cuales son capaces de retener e incluso eliminar una amplia gama de compuestos contaminantes mediante un proceso biológico (Balbuena, Garzón, & Moeller, 2011).

1.9 Nopal (*Opuntia ficus indica*).

El nopal es una planta arbustiva perteneciente a la familia de las cactáceas arbóreas, pueden alcanzar una altura de 3 a 5 metros. Los nopales se forman por una serie de paletas carnosas llamados cladodios de 30 a 60 cm de largo por 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor, los cladodios están erizados de espinas, hasta de 5 mm de largo (Zavala, 2012). La taxonomía es muy compleja puesto que sus fenotipos varían de acuerdo con las condiciones ambientales.

En México, las regiones con mayor riqueza y variedad de especies de *Opuntia* son el Noroeste, el Eje Neovolcánico, el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, el Altiplano y el Bajío; solamente estas dos últimas cubren cerca de un millón y medio de hectáreas cultivadas (Alcantara & Colin, 2019).

El nopal se encuentra naturalmente en zonas áridas y semiáridas de muchos países incluyendo México y Estados Unidos. Es una planta que puede sobrevivir en temperaturas extremas y sequía, además de tener una gran capacidad para almacenar el agua gracias al contenido de mucílago en sus tejidos. El nopal es endémico de América, con 258 especies reconocidas y 100 de ellas se encuentran en México, pertenece al género *Opuntia*, tiene un gran contenido de agua (entre 90 y 92.5%), contiene minerales como calcio, potasio, sílice, sodio y en menor cantidad

hierro, aluminio magnesio, y zinc, otros compuestos como glúcidos y compuestos nitrogenados, además de aminoácidos y ácidos orgánicos (Ovando, 2012).

En la tabla 1.1 se muestra la clasificación taxonómica del nopal.

Tabla 1.1 Taxonomía del Nopal.

Clasificación científica.	
Reino	Vegetal
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Genero	Opuntia
Especie	Ficus
Variedad	Indica
Nombre científico	Opuntia ficus indica (L)

Fuente: (Pérez, 2016)

El nopal contiene una sustancia pegajosa llamada mucílago, el cual puede ser extraído por presión de los cladodios (pencas), el cual es usado de manera casera como adhesivo para aumentar la dureza del concreto (hasta un 56%), de igual modo como impermeabilizante y pintura, también es usado en la industria alimenticia y farmacéutica (Ovando, 2012).

El nopal cuenta con la facilidad rápida de propagación, la cual puede ser por multiplicación vegetativa, esto quiere decir que una penca al caer al suelo, sus areolas producen raíces y originan una planta nueva; otra forma de propagación es por semilla, sin embargo, ésta es menos frecuente, pese a este obstáculo esta forma da paso al desarrollo de plantas más vigorosas y genéticamente distintas originando su variabilidad genética y por ende de especies (Alcantara & Colin, 2019).

Esta especie también es utilizada en programas de reforestación, por su capacidad de crecimiento en suelos inapropiados para otros cultivos puesto que se desarrolla en medios con temperaturas extremas y presencia de lluvias erráticas y se adapta a las variaciones en los niveles de CO₂ atmosférico (Alcantara & Colin, 2019).

Algunos sectores industriales donde se utiliza el nopal debido a sus beneficio y propiedades son:

- Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano: producción de gran variedad de alimentos, bebidas alcohólicas y no alcohólicas de tuna y nopalitos.
- Agroindustria de alimentos para animales: suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y las semillas.
- Industria farmacéutica: protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de nopal en polvo.
- Industria cosmética: cremas, champús, lociones de cladodios.
- Industria de suplementos alimenticios: fibra y harinas de cladodios.
- Industria productora de aditivos naturales: gomas de cladodios, colorantes de la fruta, espesantes, emulsificantes, gelificantes.
- Sector de la construcción: compuestos ligantes de los cladodios.
- Sector energético: producción de biogás a partir de las pencas.
- Sector productor de insumos para la agricultura: productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos.
- Sector turismo: artesanías en base a cladodios lignificados.
- Industria textil: uso de colorantes naturales como el carmín de cochinilla (Zavala, 2012).

1.10 Carbón activado.

El carbón activo son materiales porosos, amorfos y preparados químicamente con la finalidad de elevar su grado de porosidad y alta superficie específica interna. Estas características, junto con la naturaleza química de los átomos de carbono que lo componen, le dan la propiedad de atraer y atrapar ciertas moléculas del fluido que rodea al carbón (García & Granillo, 2017)

Las principales propiedades que debe tener un carbón activado son:

- Alta capacidad de adsorción.
- Distribución adecuada de poros.
- Alta concentración de sitios activos (grupos químicos que contienen oxígeno u otro tipo de heteroátomos).
- Bajo contenido de material inorgánico o cenizas (Fiestas & Millones, 2019).

El carbón Activado. ha demostrado ser un adsorbente eficaz para la eliminación de una extensa variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el medio ambiente acuático. Debido a sus áreas superficiales porosas que van desde 500 hasta 1.500 m²/g, asimismo la presencia de un amplio espectro de superficie funcional que la hace accesible a diferentes reactivos (Caviedes, Muñoz, Gualtero,, Rodríguez, & Sandoval, 2015)

Algunos de los principales usos de los carbones activados destacan la refinación, la potabilización de aguas, tratamiento de aguas residuales, además de inmovilizar emisiones gaseosas que deterioran la atmósfera. El carbón activado es ya calificado como un ecomaterial por el gran beneficio del que deriva su utilización (Fiestas & Millones, 2019).

1.10.1 Síntesis de carbón activado

Los carbones activados pueden ser sintetizados a partir de cualquier material rico en carbono y sus propiedades físicas y químicas son influenciadas por el grado de activación, por la naturaleza del agente activante y por el tiempo y temperatura de

activación, los carbones activados obtenidos industrialmente pueden provenir de madera y residuos forestales u otro tipo de biomasa, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas (Mojica, y otros, 2012).

1.10.1.1. Activación química.

La activación química consiste en adicionar un agente activante de origen químico al precursor antes de realizar la carbonización, con el fin de reducir la formación de materia volátil y alquitranes y, por lo tanto, evitar la obstrucción de los poros consiguiendo también un aumento en el rendimiento en carbono sólido. En primer lugar, se mezcla el precursor con el agente activante durante varias horas generalmente con agitación (Martinez, 2012).

Los agentes químicos utilizados para el proceso de activación química ($ZnCl_2$, H_3PO_4 , $AlCl_3$, $MgCl_2$, KOH , $NaOH$, etcétera), de los más empleados son $ZnCl_2$, H_3PO_4 y KOH . Estos agentes deshidratantes producen un hinchamiento de las partículas durante el proceso de impregnación, ya que la degradación de la celulosa y la lignina esta catalizada por ácidos (Martínez, 2012).

El ácido fosfórico (H_3PO_4) se emplea comúnmente para activar químicamente residuos orgánicos. Durante el proceso de impregnación se produce un aumento de la elasticidad de las partículas debido a que el ácido separa las fibras celulósicas, produciendo una despolimerización parcial de la hemicelulosa y la lignina, que conduce a un hinchamiento de la partícula y a una disminución de la resistencia mecánica del precursor (Martínez, 2012).

La activación química ofrece varias ventajas en comparación con la activación física, puesto que se lleva a cabo en una sola etapa, la combinación de carbonización y activación, la cual es realizada a temperaturas bajas ($<800^\circ C$) y, por ende, resulta en el desarrollo de una mejor estructura porosa (Sepulveda, 2014).

1.10.1.2 Activación física.

La activación física se lleva a cabo en dos etapas: a) la carbonización y b) la gasificación controlada del material carbonizado:

- a) En la etapa de carbonización se lleva a cabo la transformación de la materia prima a carbón en la cual se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno, para dar lugar a un esqueleto carbonoso. Este proceso se realiza en ausencia de oxígeno a temperaturas inferiores a 700°C.
- b) En la activación, el material sólido se expone a una atmósfera oxidante (oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono, o una mezcla de éstos) a temperaturas entre 800°C y 1000°C, eliminando productos volátiles, y aumentando el volumen de los poros y la superficie específica al oxidar parte de las moléculas de carbono. La activación es el proceso de oxidación lenta del carbón resultante por medio del cual se forman millones de poros microscópicos en la superficie del carbón (Cubillos, 2019)

Capítulo 2: GENERALIDADES DEL PROYECTO

2.1 Planteamiento del problema

México, al igual que muchos otros países en el mundo, enfrenta un reto en el suministro de agua potable, debido a la contaminación de sus mantos acuíferos con arsénico (As), cuya eliminación es importante, ya que la exposición prolongada de seres vivos al arsénico a través del consumo de agua y alimentos contaminados puede provocar cáncer y lesiones cutáneas; aún más, la presencia de arsénico se ha asociado a problemas de desarrollo en infantes, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad, diabetes e infertilidad (Quansah, et al., 2015).

La contaminación de mantos acuíferos por este elemento tóxico está, principalmente, concentrada en zonas áridas y semiáridas del país, por lo que afecta a 16 estados de la república mexicana (Coahuila, Nuevo León, Durango, Chihuahua, Sonora, Nuevo León, Baja California Sur, Sinaloa, San Luis Potosí, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, Morelos, Guerrero e Hidalgo) (López, Navarro, Valdés, Barroso, & Sierra, 2019).

En el estado de Guanajuato, el arsénico es uno de los principales contaminantes en la región junto con el cromo y el flúor (Arzola & Li, 2016). El origen del As tiende a ser desconocido, el cual se encuentra presente de manera natural en varios depósitos acuíferos, representando un riesgo a la salud en la población expuesta, como cáncer de hígado y la muerte (Litter, Armienta, & Farías, 2009).

En el acuífero Pénjamo – Abasolo, el agua subterránea pertenece a la familia sódica bicarbonatada, las aguas subterráneas de este acuífero se encuentran principalmente en rocas volcánicas de tipo basáltico y riolítico, por lo que las aguas son utilizadas para uso agrícola, potable e industrial (Amézaga, 2016), debido a sus condiciones naturales es común encontrar arsénico en varios pozos del municipio de Abasolo.

2.2 Justificación

El agua subterránea constituye la mayor reserva de agua potable en el mundo por ello, es primordial conservarla y mantenerla libre de contaminación antropogénica, sin embargo, la composición geomorfológica en diferentes regiones del planeta determina la presencia en el agua subterránea de varios elementos y compuestos inorgánicos potencialmente nocivos para el humano como es el caso del arsénico (Cruz, Lara, & Li, 2016)

Los métodos utilizados para eliminar el arsénico del agua son, principalmente: adsorción (incorporación del arsénico a sólidos adsorbentes, generalmente compuestos de hierro), filtración y ósmosis inversa; aunque existen numerosos métodos probados y en etapa de evaluación, que ya han sido propuestos como alternativa. El mayor problema para poder emplear estos métodos en México, además del costo, es la dureza elevada de las aguas (concentración de compuestos minerales principalmente, carbonatos de magnesio y calcio presentes en el agua), lo que impide, dificulta o encarece demasiado la aplicación de cualquier método propuesto (Nava, 2019), por lo cual la biofiltración resulta una técnica viable.

Entre las ventajas que presenta la biosorción, en comparación con las técnicas convencionales se tiene: bajo costo, alta eficiencia, minimización de productos químicos y lodos biológicos, no se requieren nutrientes adicionales, regeneración de los biosorbentes, y posibilidad de recuperación de metales (Tejada, Villabona, & Garcés, 2015). Finalmente, no requiere de una alta inversión dado que sus costos de operación son bastante económicos (Gadd, 2009).

Aunque la biofiltración es una técnica muy antigua y empleada, lo que la hace atractiva, en la actualidad, es la utilización de nuevos materiales que reemplazan a los usados en los medios granulares tradicionales, mejorando así su competencia frente a otras alternativas de tratamiento (Arango, 2004).

El uso de biofiltros es una alternativa para el saneamiento de agua potable en los países en vías de desarrollo por su bajo costo e implementación en zonas rurales, puesto que son las principales áreas afectadas.

2.3 Hipótesis

La biomasa seca y el carbón activado de nopal tendrán la capacidad de bioadsorber As en aguas contaminadas con este metal en un proceso de filtración.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Comprobar si la biomasa seca y el carbón activado de nopal (*Opuntia ficus indica*), funcionan como un material absorbente que reduce la concentración de As en aguas contaminadas por medio de un biofiltro.

2.4.2 Objetivos específicos

- Recolección de las pencas de nopal.
- Elaboración del carbón activado de nopal.
- Recolección de muestras de agua.
- Filtración del agua con As a través de los diferentes tratamientos de nopal.
- Determinación de los parámetros fisicoquímicos (concentración de As, pH, conductividad eléctrica y turbidez).

Capítulo 3: METODOLOGÍA

3.1 Obtención de cladodios de nopal.

La recolección de la materia prima se realizó en el cerro de la comunidad de Loma de la Esperanza, Abasolo, Gto. En la figura 3.1 se muestra el área de la cual fueron recolectados los cladodios secos, las coordenadas son $20^{\circ}40'7.00''\text{N}$ y $101^{\circ}32'54.30''\text{O}$, con una altitud de 1754 metros sobre el nivel del mar.

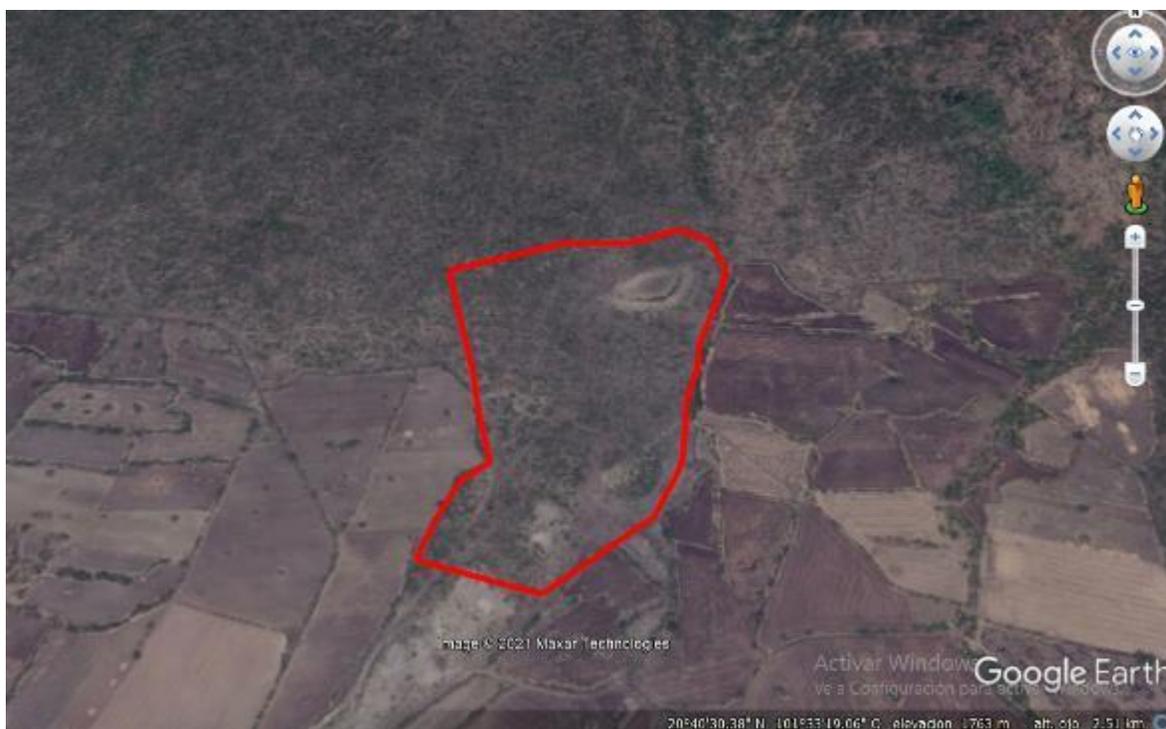


Figura 3.1 Delimitación del área de recolección de cladodios secos y frescos de nopal (Google Earth, 2021)

3.1.1 Obtención de cladodios de nopal secos.

Se recolectaron cladodios secos de diferentes plantas de nopal, las cuales estaban secas de forma natural.

En la figura 3.2 se muestran algunos especímenes de los cuales fueron recolectadas la biomasa seca de nopal y en la figura 3.3 se observa la biomasa seca recolectada.



Figura 3.2 Recolección biomasa seca de nopal (Tomada por: Torres, 2021)



Figura 3.3 Bioma seca de nopal recolectada (tomada por: Torres, 2021)

3.2 Pretratamiento de materia prima con ácido clorhídrico al 1%.

Los cladodios de nopal secos se sometieron a un pretratamiento con ácido clorhídrico al 1%, para realizarlo, se diluyeron 10 ml de ácido clorhídrico y se aforó a un litro con agua destilada, posteriormente aplicados a la materia prima deshidratada, como se muestra en la figura 3.4, dicho tratamiento se realizó con el fin de aumentar la porosidad de la biomasa y con ello incrementar la capacidad de biosorción.



Figura 3.4 Aplicación de ácido clorhídrico 1% a biomasa seca de nopal (Tomado por: Torres, 2021)

La biomasa fue secada al aire libre durante 3 horas, figura 3.5.



Figura 3.5 Secado de la biomasa de nopal (Tomado por: Torres, 2021)

3.2.1 Molienda de biomasa seca de nopal.

Una vez seca la biomasa de nopal se trituró en una licuadora industrial INTERNATIONAL® modelo LI-5A, por aproximadamente 10 minutos, figura 3.6.



Figura 3.6 Molienda de nopal (Tomado por: Torres, 2021)

La biomasa obtenida se tamizó para obtener partículas más pequeñas, en la figura 3.7 se muestra la biomasa molida la cual contiene trozos de nopal de diferentes tamaños por lo cual se tamizó como se muestra en la figura 3.8.



Figura3. 7 Biomasa de nopal triturada (Tomado por: Torres, 2021)



Figura 3.8 Tamizado de la biomasa de nopal triturada (Tomado por: Torres, 2021)

En la figura 3.9 se muestra la biomasa obtenida después del proceso de tamizado.



Figura 3.9 Biomasa de nopal tamizada (Tomado por: Torres, 2021)

Posteriormente, se almaceno en frascos de plásticos y se agregaron bolsas desecantes de gel de sílice para absorber la posible humedad existente. Se etiquetó y almacenó a temperatura ambiente en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del ITESA hasta su uso.

3.3 Elaboración de carbón activado.

Para la elaboración del carbón activado se utilizaron trozos más gruesos de la biomasa de nopal seco, la activación se realizó por medio de la activación química, a continuación, se muestra el procedimiento.

3.3.1 Calcinación de la biomasa.

La biomasa seca de nopal fue sometida a un proceso de calcinación, se colocaron los trozos de nopal seco en una tina de metal y se incendió, figura 3.10.



Figura 3.10 Calcinación de la biomasa seca de nopal (Tomado por: Torres, 2022)

Una vez quemada la mayor parte de esta se tapó con una lámina para evitar la entrada de oxígeno y que esta se carbonizará uniformemente, en un tiempo de 3 a 4 horas, figura 3.11.



Figura 3.11 Reducción de oxígeno en la calcinación de la biomasa (Tomado por: Torres, 2022)

Calcinada la biomasa de nopal el producto final es carbón y cenizas por lo que se tamizó con un colador de metal de uso doméstico, en la figura 3.12 se muestra el carbón obtenido. Se almacenó en bolsas de plástico hasta su traslado al laboratorio de Ingeniería Ambiental del ITESA.



Figura 3.12 Carbón de nopal obtenido de la calcinación (Tomado por: Torres, 2022)

3.3.2 Activación del carbón de nopal.

El carbón de nopal fue sometido a una activación química con ácido fosfórico al 20%, para lo cual se diluyeron 50 ml de ácido fosfórico y se aforo a 250 ml de agua destilada, para 200 gramos de carbón. El carbón se colocó en capsulas de porcelana como se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.13 Carbón de nopal (Tomado por: Torres, 2022)

Se agregó el ácido fosfórico 20% al carbón y se retiró el exceso como se muestra en la figura 3.14, este proceso se realiza en la campana de extracción para evitar inhalar los posibles gases tóxicos generados en la reacción.

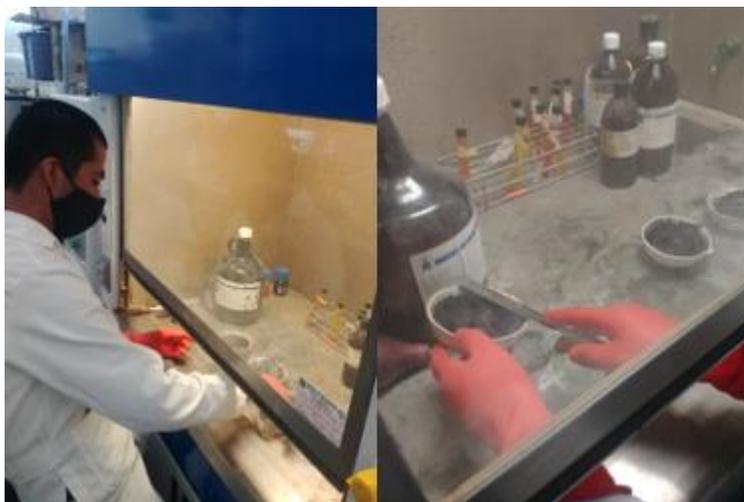


Figura 3.14 Adición del ácido fosfórico 20% y retiro de exceso (Tomado por: Torres, 2022)

Posteriormente las capsulas de porcelana se colocaron en el horno de secado TERLAB® modelo TE-H61D, a una temperatura de 110°C para retirar la humedad, esto se realizó por 1 hora, figura 3.15.



Figura 3.15 Eliminación de la humedad remanente en el carbón de nopal a 110°C (Tomado por: Torres, 2022)

Eliminada la mayor parte humedad, se colocaron las capsulas de porcelana en la mufla eléctrica ARSA® modelo AR-3040, a una temperatura de 500°C por 1 hora para la activación del carbón de nopal, figura 3.16.



Figura 3.16 Activación del carbón de nopal a 500°C (Tomado por: Torres, 2022)

Transcurrido este tiempo, se colocaron las capsulas de porcelana en el horno de secado TERLAB® modelo TE-H61D, a una temperatura de 110°C por 30 min, para evitar un choque térmico en las capsulas de porcelana, después es retirado del horno y se deja enfriar el carbón activado a temperatura ambiente y es almacenado en bolsas de plástico hasta el lavado.

3.3.3 Lavado del carbón activado.

El carbón activado de nopal tiene un valor de pH entre 2.7 a 3, para neutralizarlo se lavó con una solución de NaOH 1 N, se lavó 3 veces hasta ajustar el pH en un rango de 6.5 a 8.5, figura 3.17, posteriormente se enjuago con agua destilada para retirar el exceso de la base.



Figura 3.17 Lavado del carbón activado de nopal con NaOH 1 N (Tomado por: Torres, 2022)

Para secar el carbón activado de nopal se utilizó el horno de secado TERLAB® modelo TE-H61D a 110 °C por 2 horas, en la figura 3.18 se muestra el carbón activado de nopal seco después del proceso de lavado.



Figura 3.18 Carbón activado de nopal seco (Tomado por: Torres, 2022)

3.3.4 Pulverizado del carbón activado de nopal.

Una vez seco el carbón activado de nopal se pulverizo con la ayuda de un mortero, figura 3.19.



Figura 3.19 Pulverizado del carbón activado de nopal (Tomado por: Torres, 2022)

Hasta obtener un polvo fino, como se muestra en la figura 3.20.



Figura 3.20 Carbón activado de nopal en polvo (Tomado por: Torres, 2022)

El carbón obtenido, fue guardado en frascos de plástico y se agregaron bolsas desecantes de gel de sílice, fue etiquetado y resguardado a temperatura ambiente en el laboratorio Ingeniería Ambiental del ITESA hasta su uso.

3.3.4 Visualización del carbón activado.

El carbón activado de nopal se visualizó en un estereoscopio MOTIC® modelo SMZ-171-TLED, se compararon la biomasa de nopal calcinada el carbón activado sin lavar y el carbón activado de nopal, con una lente de ampliación de 0.75X.

3.4 Muestreo de aguas contaminadas.

El muestreo de agua se realizó en diferentes puntos del municipio de Abasolo, las muestras seleccionadas pertenecen a la comunidad Rancho Nuevo de la Cruz, Loma de la Esperanza, y Colonia Los Pinos. Las muestras se seleccionaron tomando como referencia el límite máximo permisible (LMP) de 0.025 mg/L de As, establecido en la normatividad ambiental nacional, de tal forma que se tienen valores debajo, cercanos y sobre el LMP.

En la tabla 3.1 se muestran las ubicaciones de la toma de muestras en agua, así como las concentraciones que se determinaron en cada una de ellas.

Tabla 3.1. Ubicación de la zona del muestreo.

Muestra	Coordenadas		Concentración (mg/L)
	Latitud	Longitud	
1. Rancho Nuevo de la Cruz, Abasolo.	20°39'7.78"N	101°30'44.33"O	0.02
2. Loma de la Esperanza, Abasolo.	20°40'25.63"N	101°33'59.79"O	0.025
3. Colonia Los Pinos, Abasolo.	20°27'50.1"N	101°30'42.5"O	0.1

Fuente: Autoría propia.

Las muestras de agua se recolectaron con base en la NOM-230-SSA1-2002, esta norma menciona el procedimiento de muestreo de aguas para consumo humano, establece los materiales, reactivos y equipos de muestreo.

Para la toma de muestras se utilizó una botella de plástico de 1 litro previamente lavada y desinfectada, posteriormente fueron etiquetadas y transportadas al laboratorio de Ingeniería Ambiental en el ITESA para su almacenamiento en refrigeración hasta su uso.

En la figura 3.21 se muestra la ubicación de la muestra de 0.02 mg/L en la comunidad Rancho Nuevo de la Cruz.



Figura 3.21 Sitio de toma de muestras en Rancho Nuevo de la Cruz (Google Earth, 2022)

En la figura 3.22 se muestra la ubicación de la muestra 0.025 mg/L en la comunidad Loma de la Esperanza y en la figura 3.23 la ubicación de la muestra de 0.1 mg/L perteneciente a la Colonia los Pinos.

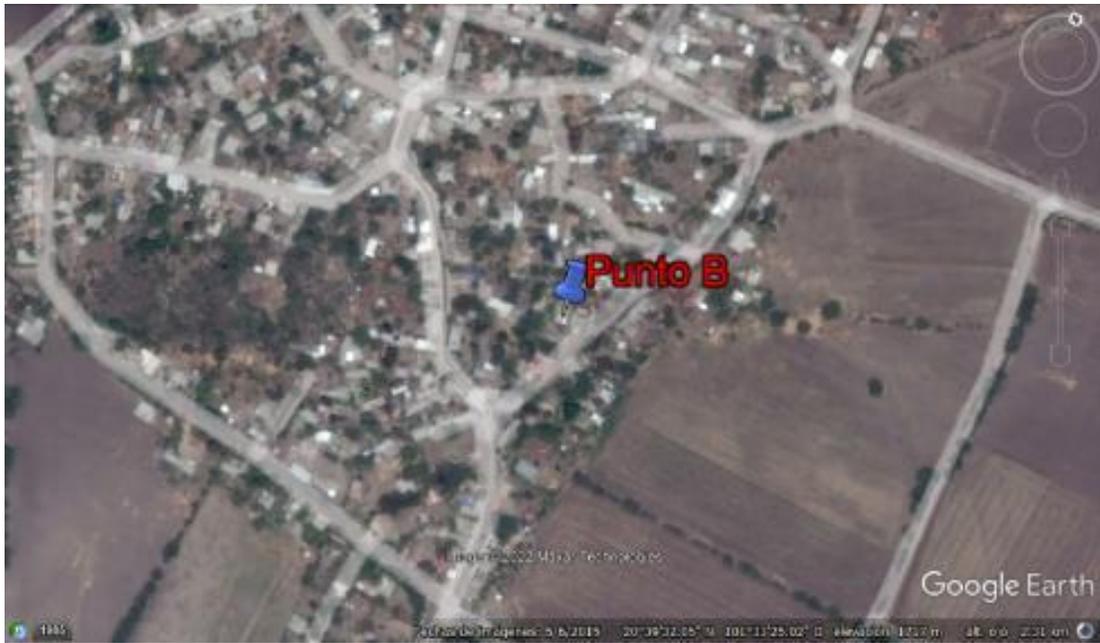


Figura 3.22 Sitio de toma de muestras en Loma de la Esperanza (Google Earth, 2022)



Figura 3.23 Sitio de toma de muestras en Colonia los Pinos, Abasco (Google Earth, 2022)

3.5 Determinación de As en muestras de agua potable.

Las muestras se analizaron mediante el uso del kit portátil para la determinación de arsénico MQuant® As Arsenic Test, método colorimétrico con tiras de ensayo y reactivos con un intervalo de medición de 0.005 - 0.50 mg/l As.

Dentro de esta prueba de arsénico MQuant®, las tiras reactivas se utilizan en combinación con reactivos adicionales. El arsénico se libera de la muestra agregando polvo de zinc, un ácido sólido y para eliminar los iones de sulfuro que interfieren un agente oxidante. En la zona de reacción de la tira reactiva se forma un tinte de amarillo a marrón, dependiendo de la concentración de arsénico, el resultado se mide semicuantitativamente por comparación visual de la zona de reacción de la tira reactiva con los campos de una escala de colores.

Para obtener mejores resultados las determinaciones se realizaron por triplicado, a continuación, se presenta el procedimiento para la determinación del arsénico con dicho Kit:

1. Llenar el frasco de reacción hasta la señal de enrase, 60 ml de la muestra.



Figura 3.24 Añadir 60 ml de muestra (Tomada por: Torres, 2021)

2. Colocar la tira reactiva en la tapa rosca quedando en el centro para evitar tocar las paredes
3. Añadir 2 gotas del Reactivo As-1 y agitar ligeramente.



Figura 3.25 Añadir Reactivo As-1 y agitar ligeramente (Tomada por: Torres, 2021)

4. Añadir 1 cucharada rasa del Reactivo As-2 utilizando el dosificador rojo proporcionado en el Kit y cuidando que no toque las paredes del frasco y agitar ligeramente hasta que el reactivo se haya disuelto completamente.



Figura 3.26 Añadir Reactivo As-2 y agitar ligeramente (Tomada por: Torres, 2021)

5. Añadir 1 cucharada rasa del Reactivo As-3 utilizando el dosificador verde proporcionado en el Kit y cuidando que no toque las paredes del frasco y cerrar inmediatamente el frasco de reacción con la tapa roscada.



Figura 3.27 Añadir Reactivo As-3 y cerrar inmediatamente (Tomada por: Torres, 2021)

6. Dejar en reposo 20 minutos, agitando ligeramente dos o tres veces en forma circular, evitar el contacto entre la tira de ensayo y la solución.



Figura 3.28 Dejar reposar la muestra 20 minutos y agitar dos o tres veces en dicho tiempo (Tomada por: Torres, 2021)

7. Sacar la tira y sumergirla brevemente en agua destilada y sacudirla para eliminar el exceso de líquido.

8. De acuerdo con el cambio de color de la tira leer el correspondiente valor de medición en mg/L de As.



Figura 3.29 Lectura de resultado de acuerdo con la colorimetría (Tomada por: Torres, 2021)

Nota: Después de transcurrido el tiempo de reacción indicado, la zona de reacción puede continuar cambiando de color. Esto no debe ser tomado en cuenta en la medición.

3.6 Filtraciones.

Para las filtraciones se utilizaron botellas de plástico de 1 litro, para simular el filtro, la parte trasera de la botella fue cortada, se retiró el centro de la tapa de la botella y se colocó papel filtro fino, posteriormente se rellenó de la biomasa, se agregó el agua y se dejó filtrar hasta obtener la última gota.

Para realizar la filtración mediante el biofiltro se realizaron 3 tratamientos con diferente composición de biomasa, el tratamiento 1 biomasa de seca de nopal molido, tratamiento 2 carbón activado de nopal y tratamiento 3 combinación de los tratamientos anteriores (carbón activado de nopal + biomasa seca de nopal molida). En la figura 3.30 se muestra la filtración biomasa seca de nopal, en la figura 3.31 con el carbón activado de nopal y en la figura 3.32 el tratamiento tres la combinación de carbón activado y biomasa de nopal.



Figura 3.30 Filtración de agua con arsénico 0.025 mg/L y 0.01 mg/L, usando biomasa seca de nopal (Tomada por: Torres, 2021)



Figura 3.31 Filtración de agua con arsénico 0.025 mg/L y 0.01 mg/L, usando carbón activado de nopal (Tomada por: Torres, 2021)



Figura 3.32 Filtración de agua con arsénico 0.025 mg/L y 0.01 mg/L, tratamiento 3
(Tomada por: Torres, 2021)

Las filtraciones se realizaron en los 3 tratamientos cada uno expuesto a las 3 concentraciones diferentes del arsénico. Se realizaron 3 réplicas por cada concentración y tratamiento.

3.7 Determinación de la concentración final.

Finalizada la filtración se procedió a determinar la concentración final del agua filtrada, utilizando el mismo método, mostrado en el punto 3.5

3.8 Determinación de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad y turbidez).

Los parámetros fisicoquímicos se midieron antes y después de la filtración, para conocer las condiciones iniciales y finales del agua, con el fin de conocer su comportamiento.

3.8.1 Medición de turbidez.

Para la medición de la turbidez se utilizó un turbidímetro portátil Hach Co.® modelo 2100QIS01, para realizar la medición se agrega el agua a las cubetas al nivel señalado en las mismas, se inserta al turbidímetro y posteriormente se presiona la tecla de medición y en unos segundos marca el resultado, como se muestra en la figura 3.33.



Figura 3.33 Procedimiento de medición de la turbidez del agua (Tomada por: Torres, 2021)

3.8.2 Medición de pH y conductividad.

Para medir el pH y conductividad se utilizó el medidor de bolsillo pH/EC/TDS HI98130 de la marca Hanna®, a continuación, se muestra el procedimiento para realizar las mediciones:

1. Encender el probador manteniendo presionado el botón MODE.
2. Para tomar las medidas, se sumerge el electrodo en el agua.
3. Se selecciona el parámetro a medir, para cambiar el parámetro se utiliza el botón SET/HOLD, en este caso se mide el pH y conductividad.
4. Una vez finalizadas las mediciones se apaga el equipo presionado el botón MODE.

En la figura 3.34 se muestra la medición de los parámetros fisicoquímicos.



Figura 3.34 Medición de pH y conductividad usando el medidor de bolsillo HI98130
(Tomada por: Torres, 2021)

3.9 Incineración de la biomasa.

La incineración de las biomásas utilizadas se realizó en la mufla eléctrica ARSA® modelo AR-3040, a una temperatura de 590 °C para evitar la volatilización del metal, por una hora hasta obtener cenizas.

Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados visuales carbón activado de nopal.

Para observar el cambio del carbón activado con el ácido fosfórico se observó en el estereoscopio MOTIC® modelo SMZ-171-TLED, con una lente de ampliación de 0.75X, se observó la muestra de biomasa de nopal calcinada, carbón activado sin lavar, y carbón activado de nopal.

En la figura 4.1 se observa la biomasa de nopal calcinada, se nota que el color del carbón es negro opaco y en algunas partes se aprecia un color café oscuro que representa la biomasa quemada o partes que no se quemaron correctamente.



4.1 Biomasa de nopal calcinada (Tomada por: Torres, 2021).

En la figura 4.2 se observa el carbón activado de nopal sin lavar el cual presentaba un color más oscuro y en algunas zonas de este un color blanco, lo que indica la presencia de residuos de la base utilizada para su ajuste de pH.



4.2 Carbón activado de nopal sin lavar (Tomada por: Torres, 2021).

En la figura 4.3 se observa el carbón activado de nopal, el cual presenta un color negro intenso el cual es característico del carbón activado, también su dureza es mejor respecto a la biomasa calcinada sin activar.



4.3 Carbón activado de nopal (Tomada por: Torres, 2021).

4.2 Resultados de filtraciones de arsénico, pH, conductividad eléctrica y turbidez.

La experimentación consistió en la filtración de tres muestras de arsénico de agua de pozos de uso para consumo humano, las concentraciones del agua fueron obtenidas de la comunidad Rancho Nuevo de la Cruz 0.02 mg/L (M1), Loma de la Esperanza 0.025 mg/L (M2) y colonia los Pinos 0.1 mg/L (M3), todas pertenecientes al municipio de Abasolo. Utilizando 3 tratamientos a base de nopal, el tratamiento 1 es biomasa seca molida (T1), tratamiento 2 carbón activado (T2), tratamiento 3 una combinación de los dos tratamientos mencionados (T3), se realizaron 3 réplicas por tratamiento y concentración de arsénico de la muestra.

Los resultados obtenidos se compararon con la NOM-127-SSA1-1994 (modificación 2000), Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, la norma marca un límite máximo permisible de 0.025 mg/L para arsénico, un pH de 6.5 a 8.5, conductividad eléctrica 1500 μ S/cm y una turbidez de 0 a 5 NTU, la concentración de arsénico al igual se comparó con el límite máximo permisible de

la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de 0.1 mg/L.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos de las filtraciones realizadas con los tres tratamientos y su tiempo de filtración.

Tabla 4.1 Concentración final y remoción de As.

Tratamiento	Concentración (mg/L)		Remoción (%)	Tiempo de filtrado (horas, min)
	Inicial	Final		
T1	0.02	0.015	25	05:15
T2		0.013	33.3	01:20
T3		0.1	50	03:28
T1	0.025	0.018	26.67	04:10
T2		0.02	20	03:10
T3		0.01	60	03:10
T1	0.1	0.02	80	03:18
T2		0.05	50	04:28
T3		0.007	93.3	03:05

Fuente: Autoría propia

El mejor tratamiento para la remoción de As en la muestra de 0.02 mg/L, es el T3 logrando una remoción del 50% y una concentración final de 0.01 mg/L valor aceptado por la NOM-127-SSA1-1994 (modificación 2000), OMS y EPA, seguido del T2 con un 33% de remoción de As y una concentración final de 0.013 mg/L valor aceptador por la NOM-127 pero rechazada por la OMS y EPA, por último, el T1 obtuvo una remoción de As del 25% y una concentración final de 0.015 mg/L valor aceptado por la NOM-127 y rechazado por organismos internacionales.

El mejor tratamiento para la muestra de 0.025 mg/L de As, es el T3 con una remoción del 60% de As y una concentración final de 0.1 mg/L valor aceptado por la NOM-127, OMS y EPA, seguido del T1 con un 26.67% de remoción de As y una concentración final de 0.018 mg/L y por último el T2 con un 20% de remoción de As y concentración final de 0.02 mg/L, ambos valores aceptados por la NOM-127 y rechazado por organismos internacionales.

El T3 es el mejor para la remoción de As en la muestra de 0.1 mg/L, con una remoción del 93.3% y una concentración final de 0.007 mg/L valor aceptado por la NOM-127, OMS y EPA, el T1 logro una remoción del 80% del As y una concentración final de 0.02 mg/L, valor aceptado por la NOM-127 y rechazado por organismos internacionales. El T2 obtuvo una remoción del 50% de As y concentración final de 0.05 mg/L valor rechazado por la NOM-127 y organismos internacionales.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados de la medición de los parámetros fisicoquímicos en las muestras.

Tabla 4.2 Resultados de parámetros fisicoquímicos.

Tratamiento	Muestras (mg/L)	pH		Conductividad (µS/cm)		Turbidez (NTU)	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
T1	0.02	8.5	8.2	550	52	0.31	-----
T2		8.5	8.2	550	14	0.31	10.9
T3		7.7	5.6	552	14	0.62	-----
T1	0.025	8.5	8.6	573	5	0.22	-----
T2		8.6	5.4	575	46	0.49	9.6
T3		8.6	7.6	582	68.3	0.69	-----
T1	0.1	8.5	8.9	710	31	0.77	-----
T2		8.6	4.9	732	56	0.81	0.5
T3		8.4	6.4	718	85.7	0.41	-----

----- Rango no medible

Fuente: Autoría propia

Para las muestras de 0.02 mg/L, el pH en el T1 y T2 es aceptable en el caso del T3 el pH es ácido con un valor de 5.6, la conductividad en los tres tratamientos está dentro del rango y la turbidez en todos los tratamientos supera el LMP.

Para las muestras de 0.025 mg/L, en la M2 el pH es aceptable para el T3, y rechazado para el T1 valor superior con 8.6, al igual el pH del T2 con un valor de 5.4 ácido, la conductividad es aceptable en todos los tratamientos, la turbidez en todos los tratamientos supera el LMP.

Para las muestras de 0.1 mg/L, el pH para la M3 para el T2 y T3 está debajo del límite y el T1 es superior, ningún valor se encuentra dentro del rango, la conductividad en todos los tratamientos es aceptable y la turbidez en el T1 y T3 está fuera de rango el único valor aceptado es el T2 con un valor de 0.5 NTU.

CONCLUSIÓN

El uso de biomasa seca molida, carbón activado de nopal y la combinación de estos, resulta una alternativa factible para el tratamiento de aguas potables contaminadas con As, logrando remociones de un 20% hasta 93.3% del As presente en el agua.

La combinación de la biomasa seca y del carbón activado obtuvo mayores porcentajes de remoción de As con un 93% para la muestra de 0.1 mg/L de As, un 60% para la muestra de 0.025 mg/L y un 50% para la muestra de 0.02 mg/L, logrando concentraciones finales de As de 0.007 mg/L para la muestra de 0.1 mg/L, 0.01 mg/L para la muestra de 0.025 mg/L y 0.01 mg/L para la muestra de 0.02 mg/L, todos los valores aceptados por la NOM-127-SSA1-1994 (2000), OMS y EPA y un tiempo de filtrado de 3 horas 21 minutos.

El T1 es el segundo mejor tratamiento logrando una remoción de As del 80% para la muestra de 0.1 mg/L, un 26.67% para la muestra de 0.025 mg/L y un 25% para la muestra de 0.02 mg/L con una concentración final de 0.02, 0.018 y 0.015 mg/L para la M3, M2 y M1 respectivamente, valor aceptado por la norma oficial mexicana pero rechazado por organismos internacionales y un tiempo de filtrado de 4 horas 21 minutos.

El T2 obtuvo menores resultados de remoción de As, logrando una remoción del 50% para la muestra de 0.1 mg/L de As, un 20% para la muestra de 0.025 mg/L y un 33% para la muestra de 0.02 mg/L y una concentración final de 0.05 mg/L para la muestra de 0.1 mg/L, 0.02 para la muestra de 0.025 mg/L y 0.013 mg/L para la muestra de 0.02 mg/L, valores aceptados para la M1 y M2 por la norma oficial mexicana y rechazados por organismos internacionales, la M3 supera el LMP por la NOM-127 superando el valor al doble y por organismos internacionales hasta 5 veces sin embargo obtuvo un buen rendimiento de remoción y un tiempo de filtrado de 2 horas 59 minutos.

El comportamiento de los parámetros fisicoquímicos se determina por el bioadsorbente, según la NOM-127-SSA1-1994 (2000), el límite máximo permisible en aguas potables para la conductividad es de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el pH se establecen valores entre 6.5 y 8.5 y para la turbidez el valor indicado debe de ser

de 0-5 NTU, en todos los tratamientos la conductividad se mantuvo dentro del LMP, la turbidez en el T1 y T3 no se pudo medir ya que superaban el rango de medición del turbidímetro, sin embargo el color del T3 era un poco más claro en comparación al T1 lo que indica que el carbón activado ayuda a disminuir la turbidez, en el T2 una de las muestras obtuvo un valor de 0.5 NTU, el cual es un valor que está dentro de los parámetros de la normatividad oficial, mientras que las otras muestras obtuvieron valores de 9.6 NTU y 10.9 NTU, los cuales claramente sobrepasan los valores permitidos por la norma, en términos de pH en el T3 una de las muestras obtuvo un valor de 7.6 el cual está dentro del rango establecido por la normatividad oficial mexicana, mientras que dos muestras obtuvieron valores de 6.4 y 5.6 los cuales son inferiores a lo establecido por la norma, el T1 obtuvo un valor de 8.2 el cual está dentro del rango según la normatividad, si bien dos de las muestras obtuvieron valores de 8.6 y 8.9 los cuales sobrepasan el límite marcado por la normatividad, el T2 obtuvo un valor dentro del rango establecido por la norma con un pH de 8.2 aunque dos muestras obtuvieron un valor de 4.9 y 5.4 valores inferiores al límite señalado en la normatividad.

Esto indica que la biomasa de nopal tiene un carácter básico y el carbón activado contiene aún un poco de residuos del ácido y la combinación de estos, ayuda a estabilizar el mismo. En las muestras que superan 5 NTU de turbidez es necesario realizar un proceso de clarificación para estabilizarla y del pH también es necesario realizar un tratamiento posterior para ajustar el mismo, en el caso de las muestras ácidas agregar carbonato de sodio o potasio y en las muestras básicas agregar ácido cítrico o fosfórico.

En términos de remoción el T3 es el mejor logrando remover de un 50% hasta un 93.3% de As en aguas potables contaminadas con este metal, lo que demuestra que la combinación de biomasa seca de nopal molido y carbón activado de nopal es más efectiva de usar en un solo tratamiento, sin embargo, el T1 por sí solo obtuvo muy buen desempeño, al combinar los tratamientos 1 y 2 se logró un aumento en la remoción de As de un 13% a 43%.

Es necesario estudiar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos obtenidos después de la filtración con lo cual se puede determinar la influencia que tienen los tratamientos utilizados en la modificación del pH, conductividad eléctrica y turbidez. Además, analizar la capacidad de adsorción para otros metales pesados que representan una problemática ambiental y de salud pública como aluminio, cobre, cromo, flúor, hierro, mercurio., y plomo.

Por cuestiones de tiempos, equipos y reactivos el carbón activado se activó solo por una hora en la mufla eléctrica es importante estudiar su efectividad sometiéndolo a 2 y 3 horas de activación a temperaturas de 400°C hasta 750°C ya que la temperatura es un factor determinante para aumentar la porosidad, además impregnar con ácido fosfórico de un 25% a 80% y analizar la remoción del carbón activado en aguas con As u otros metales pesados. Además de buscar mejores alternativas de lavado para eliminar la mayor cantidad de residuos del ácido y la base utilizados.

Bibliografía

- Alcantara, I., & Colín, J. (2019). PROPUESTA DE UN MÉTODO ALTERNATIVO ELABORADO A PARTIR DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) PARA LA POSIBLE REMOCIÓN DE GLIFOSATO EN SOLUCIONES ESTÁNDAR. *Tesis Licenciatura*. Universidad Autonoma del Estado de Mexico, Toluca de Lerdo, Estado de Mexico, Mexico.
- Amézaga, B. (2016). Actualización hidrogeológica del acuífero del Valle de Celaya. Análisis y determinación por concentraciones de Arsénico; propuesta de sitio para la perforación de un pozo de adsorción. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Ciudad de Mexico.
- Arango, A. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Lasallista de Investigación*, 1(2), 61-66.
- Arzola, D., & Li, Y. (2016). ESTADO DE CONTAMINACIÓN DE ARSÉNICO Y FLÚOR EN EL ACUÍFERO DE SILAO-ROMITA. *Jovenes en la Ciencia*, 2(1), 1101-1105.
- Avila, A., & Alata, V. (2020). Evaluación de la eficiencia de remoción del arsénico en agua subterránea utilizando harina de Totorá Nativa (*Schoenoplectus californicus*) en la zona rural de Coata, región Puno. *Tesis Licenciatura*. Universidad Peruana Union, Lima, Perú.
- Balbuena, G., Garzón, Z., & Moeller, C. (10 de Febrero de 2011). *BIOFILTRO: opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales*.
- Bayona, L. (2020). Efecto y mitigación de la toxicidad por arsénico y cadmio en cultivo de arroz. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 6(2), 47-68.
- Becerra, J. (2022). ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE GLIFOSATO EN AGUA SINTÉTICA MEDIANTE EL USO DEL HONGO *PENICILLIUM* SPP. *Tesis Licenciatura*. Escuela Politecnica Nacional, Quito, Ecuador.

- Capacoila, J. (2020). Remoción de arsénico con biomásas orgánicas. Una revisión. *Tesis Licenciatura*. Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.
- Caviedes, D., Muñoz, R., G. A., Rodríguez, D., & Sandoval, I. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 78.
- Chalen, W. (2021). EVALUACION DE LA BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN BIVALVOS EN PROVINCIAS COSTERAS DEL ECUADOR POR MEDIO DE RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA. *Tesis Licenciatura*. UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA, La Liberta, Ecuador.
- Contreras, A. (2017). Desarrollo de membranas porosas a partir de zeolita natural para la disminución de cadmio contenido en agua. *Tesis Maestría*. Universidad Autonoma de Querétaro, Querétaro, Mexico.
- Covarrubias, S., & Peña, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y Estrategias de Fitorremediación. *Internacional de Contaminación Ambiental*, 8-9. doi:10.20937/RICA.2017.33.esp01.01
- Cruz, I., Lara, K., & Li, Y. (2016). Estudio de la contaminación de arsénico en el agua subterránea del acuífero cuenca alta del río Iaja. *Verano de la Investigación Científica*, 2(1), 1882-1887.
- Cubillos, C. (2019). Evaluación de la obtención de carbón activado a partir de bambú de la especie *Chusquea scandens* Kunth por activación física. *Tesis Licenciatura*. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- De la Rosa, M. (2018). Efectos Toxicológicos: Arsénico. *Visión Criminológica-criminalística*, 36-43.
- Fernandez, A. (2012). El Agua: Un recurso esencial. *Revista: Química Viva*, 146-149.
- Fiestas, M., & Millones, A. (2019). INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN Y EL TIEMPO DE CONTACTO DEL CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE

COCO EN LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE MÓRROPE. *TESIS LICENCIATURA*. UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO, LAMBAYEQUE, PERÚ.

Gadd, G. M. (2009). Biosorción: revisión crítica de la justificación científica, la importancia ambiental y la importancia para el tratamiento de la contaminación. *Revista de tecnología química y biotecnología*, 84(1), 13-28.

Gallegos, R. (2021). BIOADSORCIÓN DE PLOMO (II) EN MATRIZ ACUOSA USANDO RESIDUOS DE CABELLO, A ESCALA LABORATORIO. *Tesis Licenciatura*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Peru.

García, A. (2021). Uso de lirios acuáticos (*Eichornia crassipes*) en un filtro modular para la extracción de cromo total en aguas residuales. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.

García, R., & Granillo, Y. (2017). EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES EN EL PROCESO DE PREPARACIÓN DE CARBÓN ACTIVO DE CÁSCARA DE NARANJA VALENCIA (*Citrus Sinensis* Linn Osbeck), LABORATORIOS DE QUÍMICA UNAN-MANAGUA, II SEMETRE 2016. *Monografía Licenciatura*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA UNAN-MANAGUA, Managua, Honduras.

Garzón, M. (2020). Estudio de la bioadsorción de níquel con adsorbente de maíz en aguas residuales provenientes de una industria de galvanotécnica. *Tesis Maestría*. UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA, Colombia.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2015). *La actualización de la norma sobre agua potable*. Ciudad de México: Gobierno de México.

Litter, M., Armienta, M., & Farías, S. (2009). *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos*. Argentina: CYTED.

López, E., Navarro, G., Valdés, M., Barroso, J., & Sierra, R. (2019). Tecnologías para eliminar el arsénico del agua. *Ciencia y Desarrollo*.

- Mamani, W. (2019). DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO (AS) TOTAL EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE POZOS TUBULARES EN EL DISTRITO DE JULIACA Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN. *Tesis Doctorado*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA, Arequipa, Perú.
- Martinez, A. (2012). DESARROLLO DE CARBONES ACTIVADOS A PARTIR DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA LA ADSORCIÓN Y RECUPERACIÓN DE TOLUENO Y N-HEXANO. *Tesis Doctoral*. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE Y LA SOSTENIBILIDAD, Villanueva de Gállego.
- Martínez, C. (2012). Preparación y Caracterización de Carbón Activo a partir de Lignina para su Aplicación en Procesos de Descontaminación de Aguas. *Tesis Doctoral*. Universidad Autonoma de Madrid, España, Madrid.
- Mojica, L., Ramírez, W., Rincón, N., Blanco, D., Giraldo, L., & & Moreno, J. (2012). Síntesis de carbón activado proveniente de semillas de eucalipto por activación física y química. *Revista de química teórica y aplicada*, 69(559), 203-210.
- Moreno, A. (2013). ESTUDIO DE DIFERENTES BIOADSORBENTES COMO POSIBLES RETENEDORES DE FOSFATOS EN AGUAS . *Tesis Licenciatura*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Nava, F. (2019). ¿Arsénico en agua potable? *Ciencia y Desarrollo*.
- Ovando, M. (2012). Modificación de biopolímero extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su aplicación para la remoción de metales pesados en agua. *Tesis Maestría*. INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA A.C., San Luis Potosí, Mexico.
- Pérez, S. (2016). DETERMINACION DE FLAVONOIDES Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE CLADODIOS DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*). *Tesis Licenciatura*. Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

- Pineda, E. (2021). ANÁLISIS EXPERIMENTAL MEDIANTE PLANTAS PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS, APLICANDO TECNOLOGÍAS DE BIOFILTRACIÓN EN EL SECTOR RURAL. *Tesis Doctoral*. Universidad de Granada, Granada, España.
- Quansah, R., Armah, F. A., Essumang, D. K., Luginaah, I., Clarke, E., Marfoh, K., . . . Dzodzomenyo, M. (2015). Association of Arsenic with Adverse Pregnancy Outcomes/Infant Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environ Health Perspect*, 412-21.
- Rangel, E., Montañez, L., Luévanos, M., & Balagurusamy, M. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2).
- Secretaría de Salud . (2000). *Norma Oficial Mexicana. NOM-127-SSA1-1994 (modificada en 2000). Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. México, D. F.: Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Salud. (2022). *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Sepulveda, C. (2014). PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CÁSCARA DE FRIJOL DE SOYA PARA SU APLICACIÓN COMO ADSORBENTE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CONTAMINADAS CON COLORANTE VERDE DE MALAQUITA. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- SSA. (2015). *NOM-201-SSA1-2015, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.

- Tejada, C., Villabona, A., & Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Tomaille, J., & Iannacone, J. (2018). Toxicidad letal y subletal del arsénico, cadmio, mercurio y plomo sobre el pez *Parachanna niloticus* (Characidae). *Revista de Toxicología*, 35(2), 95-115.
- Torres, A., Choquecota, R., Mamani, G., Ticona, P., Sanga, M., & Gutierrez, I. (2020). Bioadsorción de arsénico del agua del río Locumba utilizando cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), Tacna. *Ciencia & Desarrollo*, 19(26), 41-47. doi:doi.org/10.33326/26176033.2020.26.931
- Velasco, M. (2018). Evaluación del riesgo toxicológico por la probable presencia de Arsénico en fuentes de agua para consumo humano, en las ciudades de Cuenca y Azogues. *Tesis Maestría*. Universidad Cuenca, Cuenca, Ecuador .
- Zavala, E. (2012). OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CINCO ESPECIES DE *Opuntia* (L.) Miller DE MICHOACÁN. *Tesis Maestría*. Universidad Michoacana San Nicolas Hidalgo, Morelia, Michoacan , México.

