

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**Evaluación de biocarbón magnético derivado de cáscara de nuez
(*Carya illinoensis*) para remoción de arsénico en agua subterránea
de la Región Lagunera.**

Presenta:

Baeza Mendoza Alicia de los Angeles

TESIS

Presentado como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Saltillo, Coahuila. México

Febrero 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

EVALUACIÓN DE BIOCARBÓN MAGNÉTICO DERIVADO DE CÁSCARA
DE NUEZ (*Carya Illinoensis*) PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN
AGUA SUBTERRÁNEA DE LA REGIÓN LAGUNERA

POR:

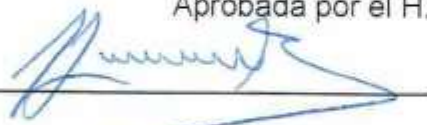
BAEZA MENDOZA ALICIA DE LOS ANGELES

TESIS

Presentada como requisito parcial de para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el H. Jurado Examinador



Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor Principal



Dra. Sasirot Khamkure

Codirectora



Dr. Javier De Jesús Cortés Bracho

Coasesor



Dr. Auberto Reyes Rosas

Coasesor Externo



M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador De La División De Ingeniería

Buenavista, Saltillo. Coahuila. México. Febrero de 2026.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

EVALUACIÓN DE BIOCARBÓN MAGNÉTICO DERIVADO DE CÁSCARA
DE NUEZ (*Carya Illinoensis*) PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN
AGUA SUBTERRÁNEA DE LA REGIÓN LAGUNERA

POR:

BAEZA MENDOZA ALICIA DE LOS ANGELES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Alejandro Zermeno González

Asesor principal interno



Dra. Sasirot Khamkure

Codirectora



Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Coasesor Interno



Dr. Audberto Reyes Rosas

Coasesor Externo

Saltillo, Coahuila, México. Febrero 2026.

DECLARATORIA DE NO PLAGIO

Declaro que el presente trabajo de investigación es original, siendo resultado de mi trabajo personal, el cual no he copiado de otro trabajo de investigación, ni utilizado ideas, fórmulas, ni citas completas, así como ilustraciones diversas, sacadas de tesis, obra, o artículo.

Caso contrario, menciono de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor.

Declaro que el trabajo de investigación que pongo en consideración para evaluación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en la tesis, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Asimismo, me hago responsable ante la universidad o terceros, de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado.

De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello sometiéndome a las normas establecidas y vigentes.

Alicia Baeza

Alicia de los Angeles Baeza Mendoza

Agradecimientos

A Dios, por darme esta oportunidad que no creí tener, porque gracias a ti señor hoy estoy aquí, hoy he alcanzado un sueño.

A mis padres, que nunca me dijeron que no a nada, me apoyaron y se esforzaron conmigo para dar este paso a pesar de la distancia y los tropiezos siempre estuvieron a mi lado, me abrazaron y me dieron su amor infinito. Gracias mami por tus palabras, papá, gracias por no rendirte.

A mi hermana Montse, gracias por tu apoyo incansable durante estos años, por los mensajes de ánimo cada mañana, por animarme a seguir caminando.

Un agradecimiento especial a Dra. Sasirot Khamkure, por toda su enseñanza y apoyo en este proyecto, gracias por confiarme un proyecto tan grande e importante en su profesión. A la Mtra. Gloribel Vázquez, quien estuvo conmigo en los experimentos y me tuvo toda su paciencia para llevarlos a cabo. Dra. Victoria Bustos, gracias por su apoyo durante la redacción y sus enseñanzas, por escucharme.

Gracias especiales al Dr. Cortes Bracho, por todas sus palabras, sus pláticas y su enseñanza a lo largo de la carrera, gracias por siempre estar.

La Dra. Manuelita Bolivar, muchas gracias por tener siempre un espacio y escucharme, por apoyarme e insistir en sus clases para ser una mujer en un trabajo de hombres.

A todos los docentes del Departamento de Riego y Drenaje, las maestras encargadas de los laboratorios, las secretarias, la señora María Victoria Palomo Flores, gracias por apoyar y hacernos camino en la carrera.

Gracias al equipo de Ciencias Químicas del CINVESTAV, por permitirme realizar mi proyecto en sus instalaciones, el Dr. Procoro Gamero, y la Dra. Lourdes Díaz. Al Dr. De Paul por su apoyo en Unidad Laguna para la investigación. Gracias al doctor Audberto Reyes Rosas por su apoyo en este proyecto.

Mis compañeros de generación y con quienes compartir estos años; Tomás Gutiérrez, Yasiel Alvarado, Mauro Molares, Adrián De la Cruz, Alan Velasco, Eduardo Escobar, Gerardo Hernández, Carlos Macías.

Gracias infinitas a Janet Laureano, mujer gracias por estar en todo conmigo, tus palabras y tu apoyo; Yolanda Pérez, gracias por escucharme y acompañarme. Elena Soto, gracias, amiga por estar desde el principio conmigo. Gracias Daniela Pliego y Miriam Cazales por acompañarme.

Dedicatoria

A mis padres, esto es por ustedes y para ustedes, porque todo su esfuerzo valió la pena siempre.

A ti, Monse, a tus desveladas y sacrificios que siempre han sido la vela de mi barco.

A Salvador †; Hermano, here and heaven.

A cada investigador que lucha por compartir sus conocimientos y que se esfuerza en mejorar el mundo que tenemos.

Sin agua no existimos.

Si estas tan seguro, quema los barcos.

Alejandro Magno.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	XIII
<i>Palabras clave</i>	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Hipótesis	C
1.4 Objetivos	7
<i>Objetivo general</i>	7
<i>Objetivos específicos</i>	7
REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1 MÉTODOS DE REMOCIÓN	8
2.1.1 <i>Filtración por membrana</i>	8
2.1.2 <i>Electrodialisis</i>	5
2.1.3 <i>Osmosis inversa</i>	5
2.1.4 <i>Coagulación - Filtración</i>	10
2.1.5 <i>Intercambio iónico</i>	10
2.1.6 <i>Precipitación con Fe</i>	11
2.1.7 <i>Adsorción con Hidrogeles</i>	11
2.1.8 <i>Adsorción</i>	12
2.2 TIPOS DE ADSORCIÓN	14
2.2.1 <i>Adsorción Física</i>	14
2.2.2 <i>Adsorción Química</i>	14
2.3 TOXICIDAD DEL ARSÉNICO EN EL AGUA	15
2.3.1 <i>Distribución de la contaminación de arsénico en el mundo</i>	17
2.4 TOXICIDAD DEL FLUORURO EN EL AGUA	18
2.5 NORMATIVIDAD PARA EL ARSÉNICO Y FLUORURO	21
2.6 MÉTODO PARA ANALIZAR ARSÉNICO Y FLUORURO	24
2.7 ANÁLISIS DEL ACUÍFERO PRINCIPAL REGIÓN LAGUNERA	25
2.7.1 <i>Fisiografía</i>	2C
2.7.2 <i>Clima</i>	27
2.7.3 <i>Hidrografía</i>	27
2.7.4 <i>Geología</i>	28
2.7.5 <i>Edafología</i>	25
2.7.6 <i>Uso de suelo</i>	30
MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1 PREPARACIÓN DE BIOCARBÓN	32
3.2 SÍNTESIS DE BIOCARBÓN MAGNÉTICO	34
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	35
3.3.1 <i>Difracción de Rayos X (XRD)</i>	35
3.3.2 <i>Espectrofotometría Infrarroja por Transformaciones de Fourier (FTIR)</i>	3C
3.3.4 <i>Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)</i>	37
3.4 ESTUDIO ADSORCIÓN DE ARSÉNICO	38

3.4.1 Pruebas preliminares de adsorción.....	38
3.4.2 Optimización RSM – Modelo de Superficie de Respuesta.....	35
3.4.3 Cinética	40
3.4.4 Diseño de isoterma.....	41
3.5 ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE FLUORURO.....	42
3.5.1 Pruebas preliminares de adsorción.....	42
3.5.2 Diseño experimental.....	42
3.5.3 Estudio de adsorción Cinética de Fluoruro.....	43
3.6 APLICACIÓN EN AGUA SUBTERRÁNEA CON BIOCARBÓN MAGNÉTICO.....	44
3.6.1 Aplicación de la muestra FS7-500 en Agua Subterránea en el Pozo No.75 para remoción de arsénico.....	4C
3.6.2 Composición química agua subterránea	4C
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1 Caracterización de los materiales.....	48
4.2 RESULTADOS DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO.....	53
4.2.1 Estudio preliminar de Arsénico.....	53
4.2.2 Modelo RSM para optimización de la remoción de As.....	54
4.2.3 Cinética de Adsorción	58
4.3 ADSORCIÓN DE FLUORURO.....	60
4.3.1 Experimento preliminar de fluoruro	C0
4.3.2 Diseño Experimental	C0
4.4 ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN POZO NO.75.....	64
4.5 EFECTO DE PROPIEDADES DE MATERIALES CON CAPACIDAD ADSORCIÓN DE ARSÉNICO.....	66
CONCLUSIONES	67
ANEXOS	68
REFERENCIAS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1 DISTINTAS TÉCNICAS DE FILTRACIÓN POR MEMBRANA	8
FIG. 2 TÉCNICA DE ELECTRODIÁLISIS.....	9
FIG. 3 PROCESO OSMOSIS INVERSA.....	10
FIG. 4 MÉTODO DE INTERCAMBIO IÓNICO.....	11
FIG. 5 PROCESO DE ADSORCIÓN CON HIDROGELES	12
FIG. 6 MECANISMO DE ADSORCIÓN	13
FIG. 7 CARTA TOPOGRÁFICA BERMEJILLO G13D15. UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO	26
FIG. 8 CARTA GEOLÓGICA BERMEJILLO G13D15.....	29
FIG. 9 CARTA EDAFOLÓGICA. BERMEJILLO G13D15.....	30
FIG. 10 CARTA USO DE SUELO. BERMEJILLO G13D15.....	31
FIG. 11 HORNO TUBULAR HORIZONTAL CON REACTOR DE CUARZO VICH HT-100.....	33
FIG. 12 PIRÓLISIS DE ADSORBENTE MEDIANTE UN HORNO TUBULAR CON UN REACTOR DE CUARZO	33
FIG. 13 ESQUEMA DEL PROCESO DE PIRÓLISIS	34
FIG. 14 DEMOSTRACIÓN DEL MÉTODO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD)	36
FIG. 15 ESPECTROMETRÍA INFRARROJA POR TRANSFORMACIONES DE FOURIER (FTIR)	36
FIG. 16 ESQUEMA DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) A) ESQUEMA DE SEÑALES E INSTRUMENTACIÓN DESARROLLADA POR LA REALIZACIÓN DE EXPERIMENTOS IN SITU EN UN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO, B) FOTOGRAFÍA DE LA INFRAESTRUCTURA PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	37
FIG. 17 UBICACIÓN DEL POZO No.75 REGIÓN LAGUNERA	44
FIG. 18 MODELO XRD DE BIOCARBÓN ACTIVADO CON MAGNETITA, FS7-500 (A); BIOCARBÓN, PC-500 (B); BIOMASA, PM (C).....	49
FIG. 19 MODELO FTIR DE LAS MUESTRAS FS7-500 (A); PM (B); PC-500 (C)	50
FIG. 20 ESTUDIO SEM DE LA MUESTRA FS7-500 CON AMPLIACIÓN 50,00x.....	51
FIG. 21 ESTUDIO SEM DE LA MUESTRA FS7-500 CON AMPLIACIÓN 100,00x.....	51
FIG. 22 ESTUDIO SEM DE LA MUESTRA FS7-500, AMPLIACIÓN DE 400,00x.....	52
FIG. 23. GRÁFICA DE RESULTADOS PRELIMINARES DE ARSÉNICO.....	53
FIG. 24 % REMOCIÓN DE As VS DOSIS, CONCENTRACIÓN INICIAL (PH CONSTANTE).....	56
FIG. 25 % REMOCIÓN DE As VS CONCENTRACIÓN INICIAL, PH (DOSIS CONSTANTE).....	57
FIG. 26 % REMOCIÓN DE As VS DOSIS, PH (CONCENTRACIÓN INICIAL CONSTANTE).....	58
FIG. 27 CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO, CON MODELOS PSEUDO PRIMER Y SEGUNDO ORDEN, Y MODELO DE ELOVICH.....	58
FIG. 28. GRÁFICA DE RESULTADOS PRELIMINARES DE REMOCIÓN DE F	60
FIG. 29 % REMOCIÓN DE F ⁻ VS CONCENTRACIÓN INICIAL, PH (DOSIS CONSTANTE)	61
FIG. 30 % REMOCIÓN DE F ⁻ VS DOSIS, PH (CONCENTRACIÓN CONSTANTE)	62
FIG. 31 % REMOCIÓN DE F ⁻ VS DOSIS, CONCENTRACIÓN INICIAL (PH CONSTANTE)	63

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. ESQUEMA DE LEVELL Y CLARKE: ETAPAS DE HACRE.....	16
CUADRO 2. ENFERMEDADES CAUSADAS POR FLUORURO	20
CUADRO 3. LÍMITES PERMISIBLES PARA ARSÉNICO Y FLUORURO.....	23
CUADRO 4. PRUEBAS PRELIMINARES DE ADSORCIÓN DE AS.....	38
CUADRO 5. CONFIGURACIÓN DE LOS NIVELES DE LAS TRES VARIABLES PREDICTORAS (CONCENTRACIÓN INICIAL, pH Y DOSIS) A INCLUIR EN LA METODOLOGÍA DE MODELO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA	39
CUADRO 6. ANÁLISIS DE CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE AS	40
CUADRO 7. PRUEBA PRELIMINAR DE ADSORCIÓN DE FLUORURO.....	42
CUADRO 8. CONFIGURACIÓN DE LOS NIVELES DE LAS TRES VARIABLES INDEPENDIENTES UTILIZADAS EN EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE MODELO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA REMOCIÓN DE F	43
CUADRO 9. APLICACIÓN DE LA MUESTRA FS7-500 EN EL POZO No. 75.....	46
CUADRO 10. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL POZO No.75	46
CUADRO 11. PRUEBA VOLUMÉTRICA DEL POZO No.75.....	47
CUADRO 12. RESULTADOS RSM DE AS.....	54
CUADRO 13. VALORES ÓPTIMOS PARA LA REMOCIÓN DE AS	56
CUADRO 14. COMPARACIÓN DE MODELOS DE CINÉTICA DE ADSORCIÓN: PSEUDO PRIMER ORDEN, PSEUDO SEGUNDO ORDEN, ELOVICH	59
CUADRO 15. CONDICIONES ÓPTIMAS Y RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO RSM PARA LA REMOCIÓN DE FLUORURO UTILIZANDO EL BIOCARBÓN FS7-500	61
CUADRO 16. RESULTADOS DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN EL POZO No. 75	64

Resumen

La contaminación de aguas subterráneas con arsénico (As) y fluoruro (F^-) representa un grave peligro para la salud pública, especialmente en la Comarca Lagunera, México. Esta investigación evalúa el aprovechamiento de la cáscara de nuez pecanera (*Carya Illinoensis*), un residuo abundante en la región, para su transformación en un biocarbón magnético capaz de remover estos contaminantes de manera eficiente.

Se sintetizó el biocarbón magnético (FS7-500) mediante el método de coprecipitación química y proceso de pre y pospirólisis a 500°C. La optimización de las condiciones de adsorción y (pH, dosis de adsorbente y concentración inicial) se realizó mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) con un diseño compuesto central (CCD), validando los resultados con muestras reales de agua subterránea.

Las técnicas de caracterización (DRX, FTIR, y MEB) confirmaron la funcionalización del biocarbón con nanopartículas de magnetita y el desarrollo de una estructura porosa. El modelo estadístico presentó una alta correlación (R^2 de 0.98 para F^- y 0.93 para As), logrando una remoción de arsénico del 98.19% en condiciones optimizadas y del 98.66% en pruebas con agua subterránea real a pH 6.

Los resultados indican que la presencia de nanopartículas de Fe_3O_4 proporciona sitios activos de unión específicos (complejos de esfera interna), mientras que los grupos funcionales en la superficie de biocarbón facilitan el proceso químico. La remoción de fluoruro se vio favorecida por interacciones electrostáticas en medios ácidos, debido a la protonación de la superficie del material.

El biocarbón modificado FS7-500 es un adsorbente prometedor, de bajo costo y fácil recuperación magnética, con un potencial impacto significativo en la mitigación de contaminantes en el agua potable.

Palabras clave

Adsorción, Contaminación en agua potable, Coprecipitación química, Fluoruro en agua, Metodología de Superficie de Respuesta, Nanopartículas de Fe_3O_4 , Pirólisis, Torreón,

Abstract

The contamination of groundwater with arsenic (As) and fluoride (F^-) represents a serious public health threat, especially in the Comarca Lagunera, Mexico. This research evaluates the use of pecan nutshell (*Carya Illinoensis*), an abundant agricultural byproduct in the region, for its conversion into a magnetic biochar capable of efficiently removing these contaminants.

The magnetic biochar (FS7-500) was synthesized using the chemical coprecipitation and subjected to pre- and post-pyrolysis processes at 500°C. The optimization of adsorption conditions (pH, adsorbent dose, and initial concentration) was carried out using the Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD), validated with actual groundwater samples.

The characterization techniques (XRD, FTIR, and SEM) confirmed the functionalization of the biochar with magnetite nanoparticles and the development of a porous structure. The statistical model showed a high correlation (R^2 of 0.98 for F^- and 0.93 for As), achieving an arsenic removal of 98.19% under optimized conditions and 98.66% in tests with real groundwater at pH 6.

The results indicate that the presence of Fe_3O_4 nanoparticles provides specific active binding sites (inner-sphere complexes), while the functional groups on the surface of biochar facilitate the chemical process. The removal of fluoride was favored by electrostatic interactions in acidic media, due to the protonation of the material's surface.

The modified FS7-500 biochar is a promising adsorbent, low-cost, and easily recoverable adsorbent, with the potential to significantly mitigate contaminants in drinking water.

Keywords

Adsorption, Chemical coprecipitation, Drinking water contamination, Fe_3O_4 nanoparticles, Fluoride in water, Response Surface Methodology, Torreon.

INTRODUCCIÓN

El arsénico está presente en rocas y minerales comunes en muchas zonas. La erosión y el desgaste de estas rocas y minerales, y, sobre todo, la sobreexplotación de acuíferos, hacen que el arsénico se mueva del suelo hacia las aguas subterráneas; originando la contaminación de estas fuentes de agua potable. El Arsenito (As III) y el arseniato (As V), son las formas más contaminantes del elemento, los cuales están presentes de manera natural en el agua subterránea, el arsénico se origina de la meteorización, de las emisiones volcánicas, en el uso de combustibles fósiles, y en la agricultura en el uso de pesticidas y herbicidas. (Alarcón-Herrera et al., 2020).

La contaminación por arsénico es causada por la reacción de oxidación de minerales de sulfuro de rocas metasedimentarias, por su parte el fluoruro es proporcional al grado de interacción agua-roca con fluorita (CaF_2) en función de tiempo de permanencia en el acuífero. (Navarro et al., 2017).

Los fluoruros se encuentran naturalmente en rocas en el suelo, y en carbón y arcilla en la corteza terrestre. Los fluoruros se asocian con varios elementos presentes en el agua, principalmente con aluminio en agua dulce y con calcio en agua de mar, y se depositan en el sedimento en donde se adhieren fuertemente por el suelo, formando fuertes asociaciones con los componentes del suelo. El movimiento del agua a través del suelo remueve solamente una pequeña cantidad de fluoruros del suelo. Se sabe que algunas plantas acumulan fluoruro en las hojas, a su vez si un animal come de ellas, puede acumular fluoruro, pues este se acumula principalmente en los huesos.

La alta concentración de fluoruro en las aguas subterráneas se debe a la meteorización de los espatos fluorados (CaF_2), fluorapatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$] y criolita (Na_3AlF_6) presentes en las cortezas terrestres y también a los procesos volcánicos y fumarólicos. (Mohan et al., 2014).

El uso de biocarbón como adsorbente para remover elementos pesados en el agua subterránea, se ha implementado en los últimos años. Varios autores han elaborado remoción con rastrojo de soja cáscara de maní en 2012 por Mathab Ahmad, en 2020 Bhushad B., realizó biocarbón activado derivado de aserrín, residuos sólidos de café para remover arsénico hecho por Goiochea en 2018 y Prathna en ese mismo año realizó con extracto de cáscara de nuez un biocarbón para remover metales pesados. (Ahmad et al., 2012; Bhushan et al., 2020; Goicochea-Núñez & Ruiz-Cacha, 2018; Prathna et al., 2018). Siendo una opción de bajo costo y promoviendo una agricultura sostenible, incluso con el agua. Además de ayudar a combatir la erosión en los suelos.

1.1 Planteamiento del problema

Las concentraciones de arsénico (As) y fluoruro (F^-) en aguas subterráneas de las zonas áridas del norte y centro de México se encuentran entre las más altas del país. Esta contaminación es originada, principalmente, por la liberación de estos elementos desde rocas volcánicas silíceas hacia los acuíferos.(Alarcón-Herrera et al., 2020).

La exposición prolongada al arsénico (As) a través del agua de consumo representa un desafío crítico para la salud pública, asociado con intoxicación crónica, lesiones cutáneas y diversos tipos de cáncer. En México, este contaminante está estrictamente regulado por la NOM-127-SSA1-2021, establece límites de 0.01 mg/L para As y 1.0 mg/L para F^- . Es notable que, para el caso del arsénico, la norma mexicana converge con los estándares internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la EPA; sin embargo, para el fluoruro, la regulación nacional es incluso más exigente que el límite de 1.0 mg/L sugerido por dicho organismo internacional (NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, 2021).

Según datos de la CONAGUA, los niveles más críticos de arsénico y F^- se concentran en estados como Durango, Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí, entre otros (Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, 2018). Esta problemática representa un desafío urgente de salud pública y remediación ambiental. Atender la contaminación de las fuentes de abastecimiento es fundamental para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, específicamente el objetivo 6: garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

1.2 Justificación

La presencia de arsénico y F^- en niveles superiores a los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 representa un desafío crítico para la salud pública en México, especialmente en regiones áridas y semiáridas. La exposición crónica a este metaloide a través del agua de consumo está estrictamente vinculada al hidroarsenicismo crónico regional (HACRE), el cual se manifiesta en lesiones cutáneas, afecciones cardiovasculares y diversos tipos de cáncer, siendo clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer como un carcinógeno del Grupo 1 (International Agency for Research on Cancer, 2012).

Dado que el agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento humano en la Región Lagunera, es imperativo desarrollar tecnologías de remediación que sean técnica y económicamente viables. En este escenario, la adsorción destaca como la metodología más prometedora debido a su alta eficiencia, versatilidad y bajo costo operativo.

En este contexto, el uso de biocarbón derivado de residuos agroindustriales ofrece una solución de economía circular. México, y particularmente estados como Chihuahua, Coahuila y Durango, lideran la producción de nuez pecanera (*Carya illinoensis*), generando miles de toneladas de cáscara anualmente. (Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, 2022). Este residuo, lejos de ser considerado basura, posee una estructura química rica en grupos funcionales capaces de interactuar con contaminantes iónicos.

Sin embargo, el biocarbón convencional suele presentar dificultades para su separación en sistemas de tratamiento de agua y una capacidad de adsorción limitada para aniones como el arsénico y el fluoruro. Por ello, esta investigación justifica la síntesis de un biocarbón magnético mediante procesos de pre y post-pirólisis. La incorporación de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) no solo facilita la recuperación del adsorbente mediante

campos magnéticos externos, sino que también incrementa los sitios activos para la captura de contaminantes.

Al aprovechar un desecho regional abundante para tratar una problemática de salud local, este proyecto contribuye simultáneamente a la gestión sostenible del agua (Objetivo de Desarrollo Sostenible 6) y al aprovechamiento integral de recursos agroindustriales.

1.3 Hipótesis

La funcionalización del biocarbón de cáscara de nuez (*Carya illinoensis*) con nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) mediante estrategias de pre y post-pirólisis optimiza las propiedades superficiales y el carácter magnético del material, lo que permite incrementar significativamente la eficiencia de remoción de arsénico en agua subterránea en comparación con el biocarbón sin modificar, logrando concentraciones finales inferiores al límite de 0.01 mg/L establecido por la NOM-127-SSA1-2021. (NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, 2021).

1.4 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la capacidad de remoción de arsénico en agua subterránea mediante el uso de un biocarbón magnético derivado de cáscara de nuez (*Carya illinoensis*), sintetizado a través de procesos de pre y post-pirólisis y activado con nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4).

Objetivos específicos

- **Acondicionar** la biomasa residual de cáscara de nuez pecanera para su posterior transformación termoquímica.
- **Sintetizar** el biocarbón magnético mediante el método de coprecipitación química, integrando modificaciones de pre y post-pirólisis para determinar su influencia en la funcionalización del material.
- **Caracterizar** las propiedades estructurales, morfológicas y fisicoquímicas de los materiales desarrollados empleando técnicas de espectroscopía (FTIR), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).
- **Optimizar** las condiciones de adsorción (dosis de adsorbente, pH y concentración inicial) para la remoción de arsénico y fluoruro mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) con un diseño compuesto central (CCD).
- **Analizar** los mecanismos de adsorción y el comportamiento cinético del arsénico en contacto con el biocarbón magnético desarrollado.
- **Validar** la eficiencia del adsorbente optimizado en condiciones reales, utilizando muestras de agua subterránea provenientes del Pozo No. 75 de la Región Lagunera.

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Métodos de Remoción

2.1.1 Filtración por membrana

Se usa principalmente en la recuperación de sales metálicas usadas en procesos de galvanoplastia, reciclaje de aceites, producción de alimentos y bebidas. (Pabón Guerrero et al., 2020; Wang & Guo, 2020). De este método se derivan: Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración. Fig. 1

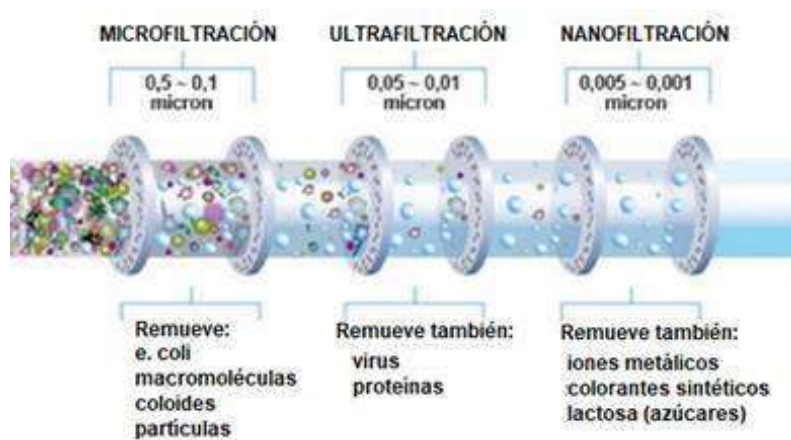


Fig. 1 Distintas Técnicas de Filtración por Membrana

Fuente: (Wang & Guo, 2020).

Nanofiltración

Esta técnica requiere presiones de 10 – 50 bar, las membranas retienen especies neutras (con un pH alrededor de 7) con pesos de 200 – 300 g/mol. (Pabón Guerrero et al., 2020; Wang C Guo, 2020).

Ultrafiltración

Es un proceso de fraccionamiento selectivo usando presiones de 10 bar, concentra sólidos en suspensión y solutos de peso molecular mayor a 1000 uma. (Pabón Guerrero et al., 2020; Wang & Guo, 2020)

2.1.2 Electrodialisis

Esta técnica puede remover componentes iónicos de soluciones acuosas usando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante, las membranas se colocan entre dos electrodos; provocando que los cationes y aniones sean retenidos por las membranas de intercambio catiónico o aniónico. Fig. 2 Técnica de Electrodialisis (Pabón Guerrero et al., 2020; Wang & Guo, 2020)

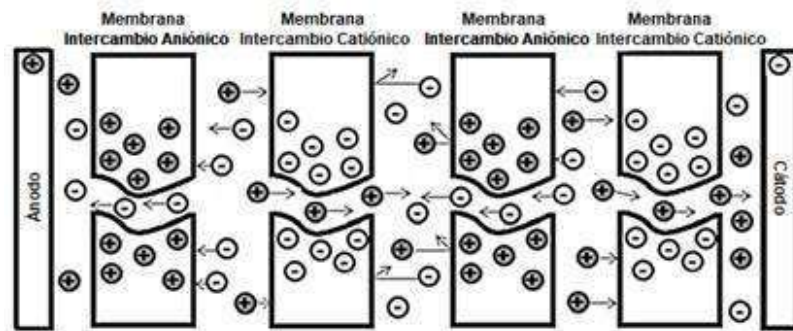


Fig. 2 Técnica de Electrodialisis

Fuente: (Wang & Guo, 2020).

2.1.3 Osmosis inversa

Para esta técnica, se usan membranas que, por difusión controlada, separan por difusión. Se basa en el principio de exclusión de tamaño y carga. Fig. 3 (Pabón Guerrero et al., 2020; Wang C Guo, 2020)

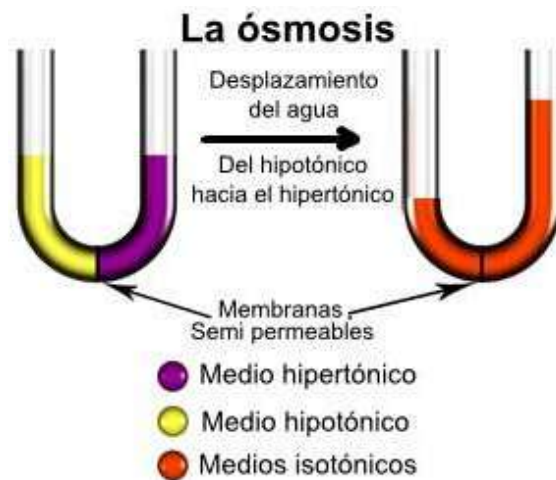


Fig. 3 Proceso Osmosis Inversa

Fuente: (Wang & Guo, 2020).

2.1.4 Coagulación - Filtración

Se añade un coagulante (como Cloruro Férrico, FeCl_3) al agua contaminada con el metal, el FeCl_3 se hidroliza en el agua para formar un hidróxido férrico cargado positivamente. Mediante los procesos de sedimentación y filtración se eliminan las partículas de arsénico. Es recomendable que el metal a eliminar se presente en forma oxidada como el caso del Arsenito (AsIII), de no ser así, deberá oxidarse para convertirlo en Arseniato (AsV). (Carbotecnia, 2023; Usepa et al., 2007).

2.1.5 Intercambio Iónico

Se requieren tipos de resina en forma aniónica y catiónica; el intercambio iónico se produce cuando un material sólido o resina presenta numerosos sitios de unión cargados. Los sitios se ocupan por iones con la carga opuesta, cuando el agua entra en contacto los iones desprenden los contraiones y se produce un intercambio catiónico. Fig. 4 (Carbotecnia, 2023).

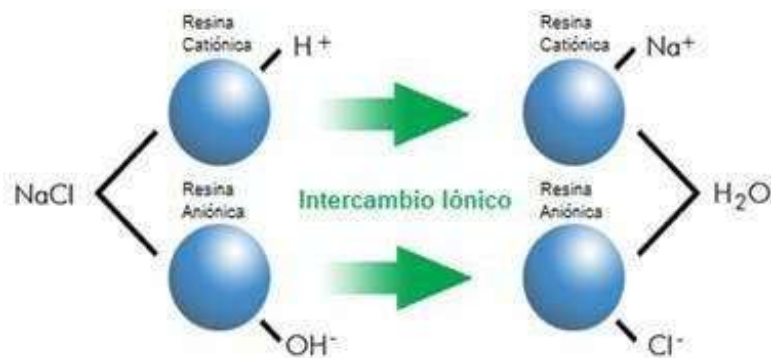


Fig. 4 Método de Intercambio Iónico

Fuente: (Carbotecnia, 2023).

2.1.6 Precipitación con Fe

Un compuesto de hierro, como el Sulfato Férrico $[Fe_2(SO_4)_3]$, se añade al agua a tratar; el arsénico se combina con el hierro para formar un precipitado que se deposita en el clarificador. Después de esto, se emplea un filtro que elimina las partículas de hierro y arsénico que no se eliminan en el clarificador. Es importante recalcar que se debe oxidar el metal a extraer para ampliar la remoción. (Nicomel et al., 2015).

2.1.7 Adsorción con Hidrogeles

Los hidrogeles son redes poliméricas tridimensionales e insolubles de carácter hidrófilo; esto les confiere la capacidad de absorber y retener grandes volúmenes de agua sin perder su integridad estructural. Debido a esta propiedad, constituyen materiales excelentes para la adsorción de metales pesados en medios acuosos.

La presencia de grupos hidrófilos en la red polimérica favorece la formación de una estructura flexible que facilita la difusión de los solutos

hacia el interior de la matriz tridimensional. Una vez dentro, los iones metálicos forman complejos estables con los grupos funcionales distribuidos a lo largo de las cadenas poliméricas (Figura 5) [Burciaga-Montemayor *et al.*, 2020; Jang *et al.*, 2008].

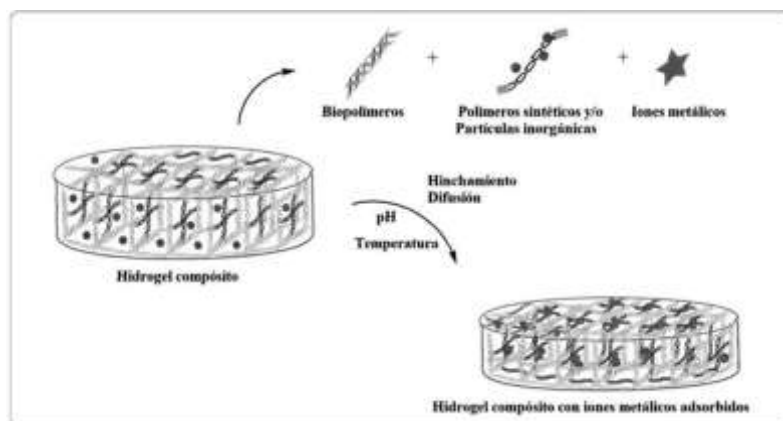


Fig. 5 Proceso de adsorción con hidrogeles

Fuente: (Burciaga-Montemayor *et al.*, 2020).

2.1.8 Adsorción

La adsorción es un proceso de transferencia de masa que transporta contaminantes de la fase líquida al adsorbente sólido. (Wang & Guo, 2020). La fuerza impulsora de este proceso es la atracción electrostática entre el adsorbente y el adsorbato.

El proceso de adsorción de los iones de metales pesados está determinado por la afinidad del metal a los grupos funcionales presentes en la superficie del adsorbente (sitios activos), los cuales se comportan como ligandos y asociándose a los metales por interacciones físicas o químicas. (Burciaga-Montemayor *et al.*, 2020). Entre los adsorbentes más económicos y eficientes se encuentran materiales naturales como la bentonita, el caolín y las zeolitas, cuya estructura y composición les confieren una gran capacidad de intercambio catiónico y los hace (Wang

& Guo, 2020). La fuerza impulsora de este proceso es la atracción electrostática entre el adsorbente y el adsorbato.

El proceso de adsorción de los iones de metales pesados está determinado por la afinidad del metal a los grupos funcionales presentes en la superficie del adsorbente (sitios activos), los cuales se comportan como ligandos y asociándose a los metales por interacciones físicas o químicas. (Burciaga-Montemayor et al., 2020). Entre los adsorbentes más económicos y eficientes se encuentran materiales naturales como la bentonita, el caolín y las zeolitas, cuya estructura y composición les confieren una gran capacidad de intercambio catiónico y los hace materiales ideales para la remoción de diferentes tipos de contaminantes. Fig. 6 (Carbonel, 2018).

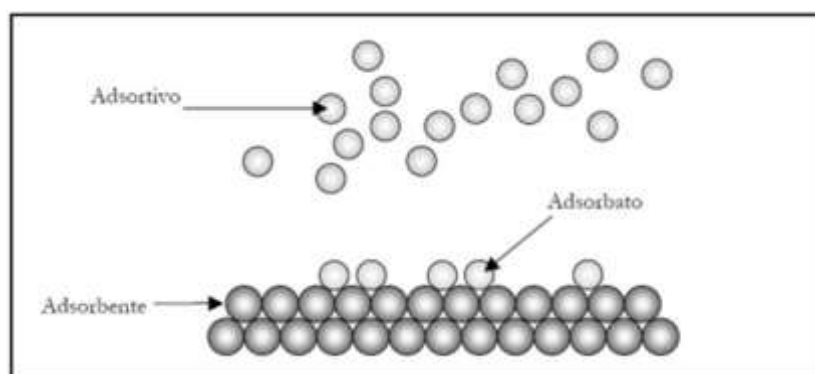


Fig. 6 Mecanismo de Adsorción

Fuente: (Carbonel, 2018).

2.2 Tipos de Adsorción

2.2.1 Adsorción Física

El adsorbato y la superficie adsorbente interactúan por medio de fuerzas de Van Der Waals (atracciones débiles que mantienen unida a moléculas eléctricamente neutras), las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos comparables al calor de vaporización del adsorbato. El aumento de la temperatura disminuye considerablemente la adsorción.

2.2.2 Adsorción Química

Se produce cuando las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie, se forman y se rompen enlaces. Se caracteriza por la unión química fuerte entre el adsorbato y el adsorbente. Este tipo de adsorción requiere más energía para eliminar moléculas.

Para el experimento con el tratamiento de remoción de F^- , el extracto de la cáscara de nuez en un estudio hecho por Prathna, Saroj y María Kennedy en su estudio de remoción de As y F^- con óxido de hierro y compuestos de alumina. (Prathna et al., 2018). En el caso de la contaminación por arsénico (Goicochea-Núñez & Ruiz-Cacha, 2018) se han utilizado los residuos sólidos del café (Goicochea-Núñez & Ruiz-Cacha, 2018) biomasa inmovilizada como el zumo de naranja y carbones como la cáscara de coco, además de goetita, resinas, geles, y la sílice realizados por Dinesh Mohan y Charles U. Pittman en 2007 (Mohan & Pittman, 2007), biocarbón de rastrojo de maíz de preparado con pirólisis lenta de 500° y biocarbón de rastrojo de maíz magnetizado para la eliminación de Fluoruro (Mohan et al., 2014). Hemant Humar junto a Mavendra Patel y Dinesh Mohan, 2019; publicaron un sistema de remoción de fluoruro del agua con biocarbón a una pirólisis de $500-600^\circ C$ a base del tallo de okra y paja. Logrando eliminar $6.0 mg/g$. (Kumar et al., 2019).

2.3 Toxicidad del arsénico en el agua

El arsénico, al estar presente en aguas subterráneas y directamente para el consumo humano, se convierte en un problema para el consumidor final; ya que puede ser ingerida como bebida, en los alimentos que se preparan con el agua y como agua para ganado.

El agua potable con altos niveles de arsénico puede provocar efectos en la salud, tales como: engrosamiento y decoloración de la piel, dolor estomacal, náuseas, vómitos y diarrea. Diabetes y trastornos en el sistema reproductor, nervioso, pulmonar o cardíaco. La exposición prolongada al arsénico a través del consumo de agua y alimentos contaminados puede causar cáncer y lesiones cutáneas. También se ha asociado a enfermedades cardiovasculares y diabetes. La exposición intrauterina y en la primera infancia se ha relacionado con efectos negativos en el desarrollo cognitivo y un aumento de la mortalidad en jóvenes adultos. El hidroarsenicismo crónico es una enfermedad grave de larga duración provocada por la presencia de aguas contaminadas por arsénico.

HACRE

Hidroarcanismo Crónico Regional Endémico, es una enfermedad grave de larga evolución que afecta varias provincias argentinas, provocada por la presencia de aguas de bebida contaminadas naturalmente con arsénico. (García, 2011). Los efectos en el consumo del agua contaminada por arsénico no se presentan como intoxicación, como principalmente se mostraría, en cualquier caso; sino que, para el hidroarcanismo los efectos son derivados de la ingesta de pequeñas cantidades de agua contaminada.

Etapas del desarrollo del HACRE (esquema de Levell y Clarke) (García, 2011):

Cuadro 1. Esquema de Levell y Clarke: Etapas de HACRE

Etapas de desarrollo	Nivel de intoxicación
Prepatogénico	Las poblaciones están expuestas a concentraciones elevadas de arsénico inorgánico en el agua de consumo diario.
Preclínico	No se presentan síntomas, el arsénico puede ser detectado en muestras de tejidos y muestras de orina.
Clínico	Aparecen manifestaciones en la piel. Según la OMS se requiere una exposición de 5 a 10 años.
Complicaciones	Síntomas clínicos más pronunciados y afectación de los órganos internos; desarrollo de tumores o cáncer que afectan la piel u otros órganos.

2.3.1 Distribución de la contaminación de arsénico en el mundo

En Argentina, el área afectada va desde el noroeste al suroeste del país. Es en este país donde se reconoce el HACRE como enfermedad carcinógena. Países como Estados Unidos, Chile, Bolivia, Perú, Camboya, China, Vietnam, Bangladesh, Bengala, Tailandia, Nepal, Ghana y México; tienen registros de altas concentraciones de As en los acuíferos.(García, 2011).

En la Región de la Comarca Lagunera se encontraron niveles altos de Arsénico para el año esto debido a la explotación de las fuentes subterráneas dentro de las zonas de estudio. (Julio – Diciembre, 2022). (Hernández Alvarado et al., 2022).

2.4 Toxicidad del fluoruro en el agua

La exposición al F^- se acumula en el follaje de las plantas y ocurre principalmente a través de la atmósfera o mediante la adsorción de la raíz al suelo. Los fluoruros pueden acumularse en los dientes, y al consumirse también en los huesos, provocando problemas de osteoporosis hasta cáncer.

Parches blanquecinos calcáreos. Se tiñen de amarillo a marrón de aspecto moteado; puede debilitar el esmalte y formar pequeñas deformaciones en la superficie de los dientes. A niveles graves, producen cambios óseos como osteoesclerosis, exostosis de la columna vertebral y rodilla valga, se presenta en adultos cuando ya han tenido una exposición de varios años. (García, 2011; Taylor et al., 2025).

La fluoración de agua es el proceso en el que se agrega fluoruro al suministro de agua hasta alcanzar una concentración de 0.7ml/l de agua con el objetivo de prevenir la caries dental. Esta actividad comenzó en Estados Unidos desde 1945 con el objetivo de prevenir enfermedades en los dientes; para 2008 encima del 72% de la población de EE. UU. ya contaba con agua fluorada. (Instituto Nacional del Cáncer, 2017).

Entre los problemas por contaminación de fluoruro en las aguas subterráneas están:

- Fluorosis dental: Pequeñas rayas o manchas blancas en el esmalte del diente. Este deterioro se debe a la ingesta excesiva de flúor durante la etapa de formación del esmalte. Su apariencia puede variar en severidad, desde manchas color blanco-opaco a marrón oscuro; el esmalte además puede aparecer socavado, irregular, poroso, y a veces con estriaciones horizontales. (García, 2011).
- Fluorosis ósea: La fluorosis esquelética provoca dolor y daño en los huesos y articulaciones, volviéndose menos elásticos. La fusión vertebral es frecuente en diversas zonas de la columna vertebral, especialmente en

las cervicales. (García, 2011). El flúor se incorpora fácilmente a la estructura cristalina del hueso y se acumula con el tiempo. Aumentando la densidad ósea provocando rigidez y dolor articular.

En Estados Unidos se presentó pocos casos de fluorosis esquelética crónica, pero no se descartó como un problema para la salud; las investigaciones arrojaron concentraciones de fluoruro en los huesos debido al concentrado de fluoruro en el agua potable de 2mg/L o 4 mg/L; lo que es preocupante ya que superan los parámetros permitidos por la EPA. (Romero et al., 2017).

- Problemas de la tiroides: El exceso de fluoruro daña la glándula paratiroidea, resultando hiperparatiroidismo. Estudios recientes en EE. UU. en desequilibrios hormonales limitrofos y sustancias químicas disruptoras endocrinas indicaron que los efectos podrían estar asociados con desequilibrios o perturbaciones leves en las concentraciones hormonales. Esto de acuerdo con concentraciones de 4mg/L de fluoruro en el agua potable. Siendo niños pequeños los afectados principalmente. (Romero et al., 2017). El consumo durante el embarazo provoca problemas neurológicos durante el desarrollo infantil.
- En animales, se presenta la disminución de la función tiroidea, aumento de la actividad de la calcitonina entre otros aspectos relacionados con la hormona tiroidea. En este mismo estudio se presentaron problemas renales por el consumo de 4mg/L debido a que puede llegar a afectar los tejidos y la función renal. (Romero et al., 2017)

Cuadro 2. Enfermedades causadas por fluoruro

Enfermedades por toxicidad de flúor	Síntomas	Tratamiento	Observaciones
Fluorosis esquelética	Dolor articular Cansancio Crónico Rigidez articular	Opioides AINE Antiinflamatorios Analgésicos	En etapas avanzadas, la fluorosis es irreversible y solo se recetan relajantes musculares para controlar el dolor.
Fluorosis dental	Los dientes presentan manchas color blanco-opaco a marrón oscuro	Micro abrasión dental, en los casos más leves Blanqueamiento o carillas dentales para fluorosis avanzada	Cuando la fluorosis está muy avanzada ningún tratamiento puede ser efectivo y se recomienda la opción de carillas dentales

Existe un problema significativo por la contaminación de fluoruro en el agua subterránea a nivel global. Afectando a personas de todas las edades, pero dañando principalmente a niños y adultos mayores, afectando los dientes maduros en su mayoría y durante el desarrollo de estos. El fluoruro se produce en el medio ambiente debido a la presencia de minerales que contienen fluoruro, a saber, fluorita, biotita, topacio, etc., en la corteza terrestre, así como de actividades industriales, especialmente las industrias de semiconductores, galvanoplastia, vidrio, acero, cemento, fundición de aluminio, cerámica y fertilizantes.

2.5 Normatividad para el arsénico y fluoruro

NOM-117-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Método de prueba para la determinación de Cadmio, Arsénico, Plomo, Estaño, Cobre, Fierro, Zinc y Mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. (NOM-117-SSA1-1994. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica, 1995).

El método se basa en hacer pasar un haz de luz monocromática de una frecuencia tal que puede ser absorbido por el analito que se encuentra presente en forma de vapor atómico. La medida de la intensidad luminosa antes y después de su paso por el vapor atómico permite determinar el porcentaje de absorción.

Parámetros permitidos para la calidad del agua en el consumo humano.

NMX-AA-077-SCFI-2001. Normatividad para Determinación de Fluoruros en Aguas Naturales, residuales y residuales tratadas. (Diario Oficial de la Federación, 1982).

Método espectrofotométrico

Se basa en la reacción entre los iones fluoruro y el Zirconilo del complejo Zr-SPANDS, formando otro anión complejo incoloro (ZrF_6^{2-}). Al aumentar el contenido de fluoruro, la intensidad del color disminuye. La concentración de fluoruros y la absorbancia son inversamente proporcionales.

Método potenciométrico

Se usa un electrodo selectivo de ion Fluoruro; en conjunción con un electrodo de referencia de calomel y un potenciómetro que cuenta con una escala expandida en milivoltios o un medidor de iones que proporciona una concentración directa en la escala del ion fluoruro.

El mecanismo del desarrollo de un potencial sensible al fluoruro a través de la membrana es el siguiente: la ionización crea una carga en la superficie de la membrana, en las dos interfases. La magnitud de la carga depende de la disolución. El lado de la membrana que encuentra una concentración de ion fluoruro más baja se vuelve positivo con respecto a la otra superficie, la diferencia de carga proporciona una medida de la diferencia de concentración fluoruro en las dos disoluciones.

La siguiente Cuadro 3 muestra las Normativas recomendadas en países de altas concentraciones de Arsénico y Fluoruro.

En México, la Norma Oficial Mexicana- Agua para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994), es la que rige de acuerdo con los límites permitidos para metales y no metales en el agua para el consumo humano. Esta norma se ha modificado con la intención de abastecer el consumo de agua en la República de manera saludable y que no sea un riesgo en las personas que la consumen. (NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, 2021).

Cuadro 3. Límites permisibles para arsénico y fluoruro

País/ Organización	As	F ⁻	Norma
WHO (World Health Organization)	0.01	1.5 mg/L	WHO 2004 (Organización Panamericana de la Salud, 2022).
EUA – Environmental Protection Agency	0.01	1.5 mg/L	USEPA 2001/ PHS 2015 (Environmental Protection Agency, 2025).
Unión Europea	0.01	1.5 mg/L	European Union 1998 (Directiva (UE) 2020/2184) (Environmental Protection Agency, 2025)
Chile	0.05	1.5 mg/L	Diario Oficial de la República de Chile 1984 (NCh409)
India	0.01	1.50 mg/L	Mohan & Pittman 2007 (Mohan C Pittman, 2007).
México – Norma Oficial Mexicana	0.01	1.00 mg/L	NOM-127-SSA1-2021 (NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, 2021).

2.6 Método para analizar arsénico y fluoruro

Espectrometría ICP – Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente, es una técnica de análisis multielemental que permite determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica a nivel de traza. Además, permite conocer la composición elemental de una muestra y la relación isotrópica de determinados elementos.

Electrodo ISE (Electrodo de Ion Selectivo) – Se basa en medir la diferencia de potencial causada por el contacto del electrodo con el ion F^- , respecto de la diferencia de potencial en un electrodo de referencia.

Los electrodos están hechos de una membrana permeable que solo responde al contacto de un determinado ion. Esta membrana selectiva se somete a una reacción específica con un ion específico contenido en las muestras. La interacción electroquímica resulta en un cambio de potencial eléctrico entre la membrana y el ion en la muestra.

2.7 Análisis del Acuífero Principal Región Lagunera

La región lagunera se encuentra ubicada en la parte central de la porción norte de la República Mexicana, entre los meridianos 102°15' y 103°50' al oeste, y los paralelos 25°00' y 26°45' hacia el norte. Fig. 7

Con una superficie aproximada de 12,617km² la cual la conforman los estados de Coahuila en los municipios de San Pedro, Viesca, Torreón, Francisco I. Madero Matamoros y el municipio de Tlahualilo; y en el estado de Durango comprende los municipios de Gómez Palacio, Lerdo, Mapimí. Pertenece a la Región Hidrológica No. 36 “Nazas-Aguanaval”, Subregión Hidrológica Río Nazas, cuencas de “Río Nazas-Torreón”, “Laguna de Mayrán y Viesca” y “Río Aguanaval”, subcuencas “Río Nazas-C. Santa Rosa”, “Laguna de Mayrán”, “Laguna del Rey” y “Río Aguanaval-Nazareno”. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014).

Cuenta con una extensión montañosa y una superficie plana donde se ubican áreas agrícolas y urbanas. La producción de hortalizas como chile, leguminosas como el frijol, y frutales de nuez y manzana. Además de la producción más destacada, la leche de vaca y la madera en Durango generando hasta 2013 17 mil 235 millones de pesos. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014).

En la provincia de la Sierra Madre Oriental presenta un conjunto de sierras que en su mayoría muestran rocas sedimentarias marinas del Cretácico y Jurásico Superior; calizas, areniscas y secuencias arcillosas principalmente. La Subprovincia Sierra La Paila está constituida por un conjunto de sierras y bolsones amplios, presentando un drenaje interno, en el cual las calizas dominan en las sierras y en menor medida las rocas volcánicas. (de Antuñano, 2022; Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los 653 Acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, 2022).

2.7.2 Clima

Para el acuífero Principal Región-Lagunera el tipo de clima de mayor porcentaje es el BWhw (seco a desértico, semicálido con invierno seco muy extremo), mientras que para las sierras el clima que se presenta es BSk_i (seco templado). Mediante el método de polígonos de Thiessen los valores promedio anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial fueron de 260mm, 19.0 °C y 2500mm. (de Antuñano, 2022; Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los 653 Acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, 2022).

2.7.3 Hidrografía

La Subregión hidrológica Río Nazas distribuye para la Comarca Lagunera a través de las cuencas: Río Nazas-Torreón, Laguna Mayrán y Viesca y al Río Aguanaval; y las subcuencas Río Nazas-C., Santa Rosa, Laguna de Mayrán, Laguna del Rey y Río Aguanaval-Nazareno.

La distribución más importante ocurre en los ríos Nazas y el Río Aguanaval.

Según la topografía del lugar, se encuentra en el plano topográfico Bermejillo G13D115, perteneciente al estado de Durango. (de Antuñano, 2022; Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los 653 Acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, 2022).

2.7.4 Geología

Suelo eólico; resulta de la erosión de los sedimentos sueltos como arena, limo y arcilla siendo principalmente arena por los registros de lagunas en la zona de Coahuila. Al ser un lugar de baja humedad, favorece al viento para el transporte de los sedimentos a largas distancias. Estos sedimentos se acumulan y son arrastrados por el viento a regiones bajas, formando dunas en algunos lugares.

También contacta los límites de una formación aluvial; estos son suelos formados por materiales como arena limo y arcilla, arrastrados por corrientes de lagunas hacía zonas planas. Este tipo de material se puede interpretar que se originó por el registro de lagunas anteriormente, es un suelo fértil rico en nutrientes para los cultivos. (de Antuñano, 2022; Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los 653 Acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, 2022).

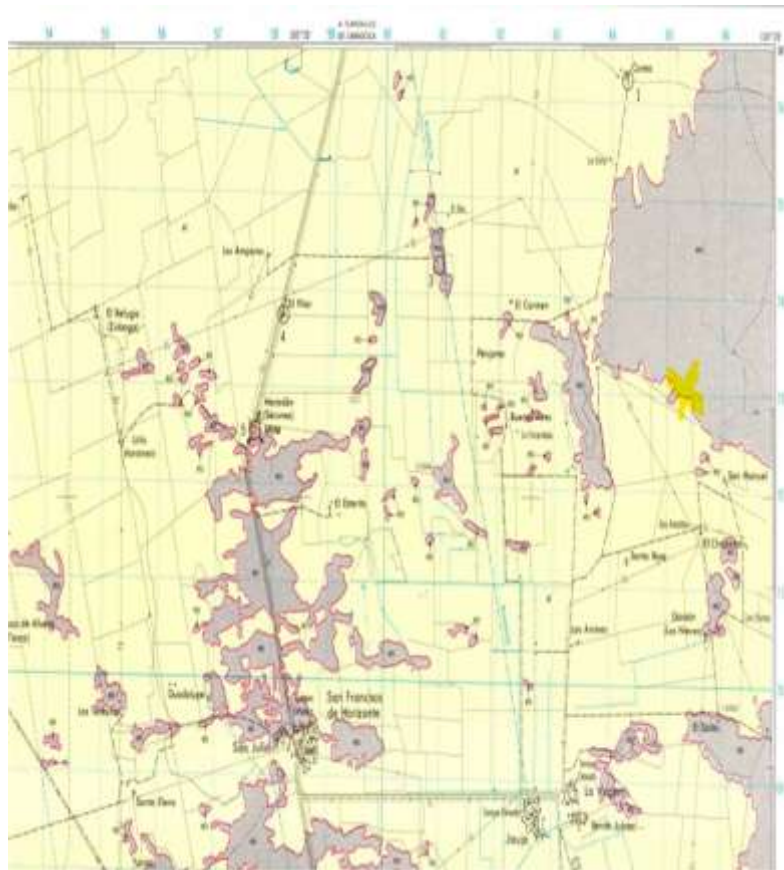


Fig. 8 Carta Geológica Bermegillo G13D15.

2.7.5 Edafología

La salinidad de la zona es moderadamente salina desde 8 hasta 16 mmhos/cm a 25°C. Suelo sódico mayor a 15% de saturación de sodio intercambiable. La textura se clasifica fina a media fina.

Yermosol cálcico y xerosol háplico; tiene una capa superficial de color claro y pobre en materia orgánica, debajo puede haber subsuelo rico en arcillas o carbonatos muy parecido a la capa superior, presentan cristales de yeso o caliche. Suelos con problemas de erosión. (de Antuñano, 2022; Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los 653 Acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, 2022).

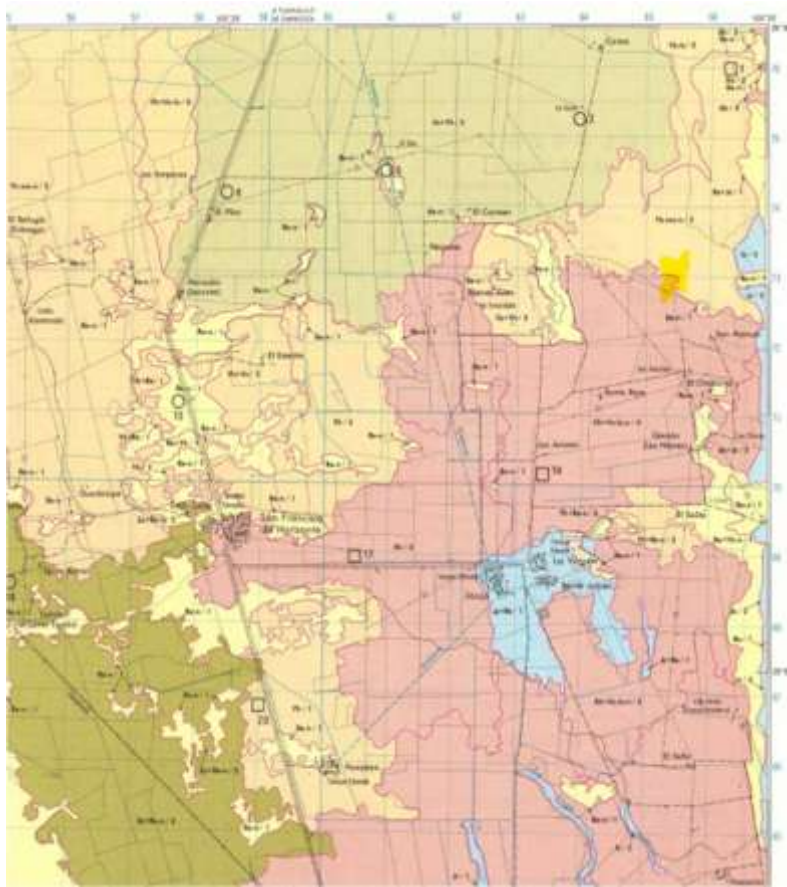


Fig. 9 Carta Edafológica. Bermejillo G13D15.

2.7.6 Uso de suelo

Presenta matorral desértico micrófilo (vegetación en zonas áridas con dominancia de plantas con hojas pequeñas), con una porción de matorral subinermé (matorral con mezcla de plantas espinosas y no espinosas, este tipo de vegetación se encuentra en zonas planas o con pendientes y lomeríos que crece sobre suelos someros). (de Antuñano, 2022; Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los 653 Acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, 2022).



Fig. 10 Carta Uso de suelo. Bermejillo G13D15.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Preparación de Biocarbón

El proceso de la preparación del biocarbón se llevó a cabo en el laboratorio de R.A.S.P.A. de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. La cáscara de nuez se lava con agua desionizada para remover impurezas o residuos que no sean propios de la cáscara de nuez. El material se seca en estufa a 60°C durante 24h, una vez seco el material se pulveriza utilizando un molino, el material obtenido se identificó como **Biomasa (PM)**. La biomasa fue sometida a un proceso de pirolisis lenta en un horno tubular horizontal de cuarzo (Vichi HT-1100) para obtener biocarbón, bajo las siguientes condiciones: 1h de tratamiento térmico a 500°C, con una velocidad de 10°C/min, en una atmósfera de Nitrógeno. Pasado este tiempo se permite su enfriamiento.

El biocarbón producido se pesó y se almacenó en un desecador para su posterior caracterización y evaluación como adsorbente. El biocarbón modificado se obtuvo de la siguiente manera: las sales de Fe_3 y Fe_2 (cloruros y sulfatos respectivamente) se colocan en solución básica para permitir su coprecipitación con la subsecuente formación del Óxido mixto. De manera inmediata se agrega la cantidad proporcional de biocarbón para obtener una relación 1:1. Se permite la reacción de la mezcla durante 30 minutos y posteriormente el material se lava y se seca. El material obtenido se identificó como **Biocarbón, PC-500**.



Fig. 11 Horno tubular horizontal con reactor de cuarzo Vichi HT-100.



Fig. 12 Pirólisis de adsorbente mediante un horno tubular con un reactor de cuarzo.

3.2 Síntesis de biocarbón magnético

En un matraz de tres bocas de 1000 ml se mezclan 27.03g (0.1 mol) de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, con 13.9g (0.05 mol) de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 600 ml de agua destilada previamente calentada a 80°C . La mezcla resultante se mantiene durante 10 min a 80°C con agitación mecánica de 500 rpm. Posteriormente a esta misma mezcla se le adiciona, gota a gota, una solución formada por 16 g (0.4 mol) de NaOH y 150 ml de agua previamente calentada a 60°C . De manera inmediata se forma un precipitado de color negro. En este momento se ajusta el pH de la suspensión resultante a 10-11. Después de este tiempo se adiciona a esta mezcla de reacción una cantidad suficiente del biocarbón de cáscara de nuez (PC) para tener un equivalente Fe: biocarbón= 1:1, y se deja reaccionar durante 30 min a 80°C y 500 rpm. Pasado este tiempo el material sólido se separa por decantación magnética y se lava con suficiente agua desionizada caliente (75°C aproximadamente) hasta alcanzar un pH de 7. El producto obtenido es secado a una temperatura de 60°C por 24h e identificado como **FS7-500**.

Los tres materiales se almacenaron en un desecador hasta su uso en caracterización y evaluación de la capacidad de adsorción de Arsénico y Fluoruro. Este experimento se realizó dentro del Laboratorio de Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo.

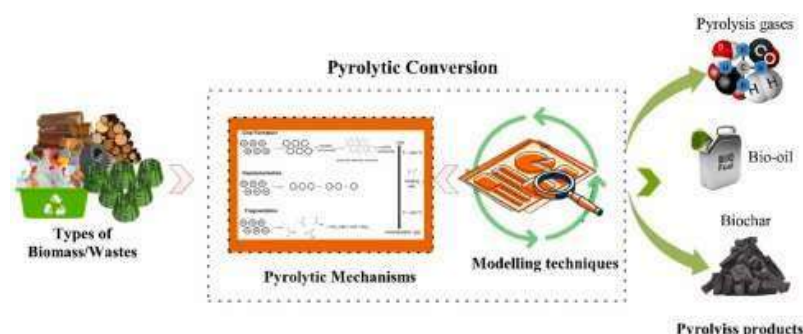


Fig. 13 Esquema del proceso de pirólisis.

3.3 Caracterización de los materiales

La caracterización de los adsorbentes de biocarbón magnético se realizó mediante un conjunto de técnicas analíticas para evaluar sus propiedades estructurales, morfológicas, fisicoquímicas y texturales. Los análisis de llevaron a cabo en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo (CINVESTAV).

Durante el proceso de caracterización, las muestras fueron molidas y posteriormente tamizadas, hasta que la muestra obtuviera el tamaño de partícula promedio de 74 μm , para ello se utilizó la malla No. 200.

La muestra se puede moler con ayuda de un mortero para obtener una consistencia más fina.

3.3.1 Difracción de Rayos X (XRD)

Se llevó a cabo un análisis de difracción de rayos X en un difractómetro Bruker equipado con un espejo de Gobel, empleando radiación Cu Ka y detector NaI. Los experimentos se realizaron en el CINVESTAV-Saltillo, utilizando los siguientes parámetros:

Velocidad de barrido de $2^\circ/\text{min}$, tamaño de paso de 0.02° y un rango de 2θ de $3-80^\circ$. Estos parámetros permitieron obtener una caracterización detallada de la estructura cristalina de las muestras. La cantidad mínima de muestra es de 300 mg.



Fig. 14 Demostración del método de Difracción de Rayos X (XRD).

3.3.2 Espectrofotometría Infrarroja por Transformaciones de Fourier (FTIR)

Modelo Frontier FT-IR/NIR, equipado con un accesorio ATR Miracle Diamond Frontier, fue utilizado para analizar la muestra. Se realizaron 25 barridos con una resolución de 4 cm^{-1} en un rango de 4000 a 450 cm^{-1} .

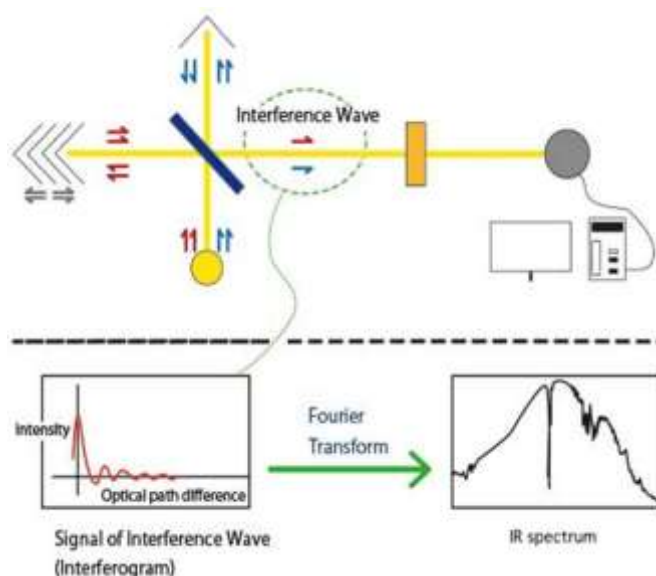


Fig. 15 Espectrofotometría Infrarroja por Transformaciones de Fourier (FTIR).

3.3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El equipo que se utilizó para este estudio fue un microscopio electrónico de barrido con haz de iones focalizados (MEB/FIB) marca FEI, modelo Scios.

La cantidad requerida para el análisis es de 50 mg, misma que se pesó y molió como en los análisis anteriores.

Las figuras de SEM se tomaron a diferentes ampliaciones; 50,000x, 100,000x y 400,000x. Los parámetros indican unos 5kV de voltaje de aceleración, 50,000x de aumento, 3.0 mm de distancia de trabajo, y 3.0 al punto de imagen. El detector fue puesto a WD, y a 1 μ m incluido en la escala de barras.

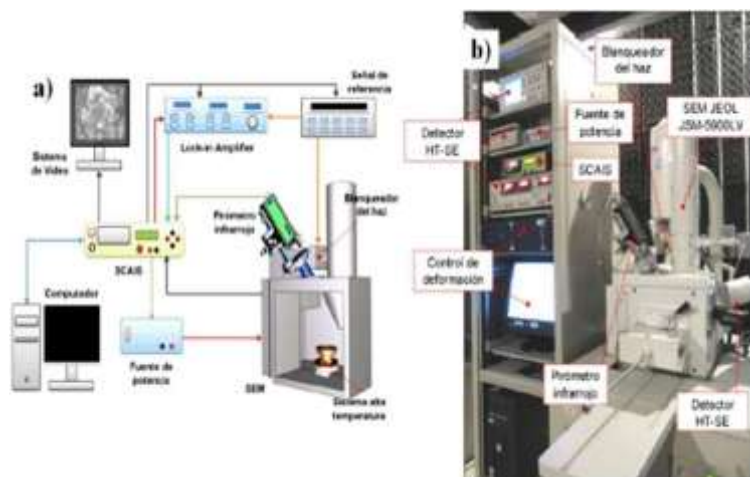


Fig. 16 Esquema de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a) Esquema de señales e instrumentación desarrollada por la realización de experimentos in situ en un microscopio electrónico de barrido, b) fotografía de la infraestructura para la realización de los ensayos.

3.4 Estudio Adsorción de Arsénico

3.4.1 Pruebas preliminares de adsorción

Con el propósito de identificar el tipo de material con mayor potencial de capacidad de adsorción, se estudiaron diferentes muestras tanto de biomasa, biocarbón (biomasa pirolizada) y biocarbón activado magnéticamente. (FS7-500). Durante esta etapa se empleó un agitador orbital marca JOANLAB. Las variables monitoreadas fueron dosis del adsorbente, pH del agua sintética, y concentraciones iniciales de arsénico.

La temperatura a la que se sometió la muestra FS7-500 para los tratamientos de pirolisis y activación de biocarbón magnético fue de 500°C. En el diseño preliminar se sometieron tres muestras (PM, PC-500 y FS7-500).

Se utilizaron frascos de vidrio de capacidad 25 ml; en cada frasco se pesó 0.05 mg del extracto de nuez (FS7-500) y se mezcló con 20 ml de la solución de arsénico. La solución de Arsénico se preparó con Arseniato de Sodio heptahidratado marca Spectrum Chemical MFG, con una pureza del 98%. Las condiciones para el experimento fueron:

Cuadro 4. Pruebas preliminares de adsorción de As

Parámetro	Condición	Unidad
Concentración	4	mg/L
pH	3	
Dosis	1.5	g/L
Agitación	150	rpm
Tiempo	24	h
Temperatura	25°	C

3.4.2 Optimización RSM - Modelo de Superficie de Respuesta

Cuadro 5. Configuración de los niveles de las tres variables predictoras (Concentración inicial, pH y dosis) a incluir en la metodología de Modelo de Superficie de Respuesta

Factor	Bajo	Medio	Alto	Unidad
Concentración Inicial	1	3	5	mg/L
pH	3	5	7	
Dosis	0.5	1.5	2.5	g/L

Para llevar a cabo el diseño experimental, las muestras de PM, PC-500 y FS7-500 se tomaron en cuenta los parámetros de concentración inicial de Arsénico (1, 3 y 5 mg/L), pH 3, 5 y 7; y dosis del adsorbente 0.5, 1.5 y 2.5 g/L. La solución de As se preparó con Arseniato de Sodio, las muestras permanecieron en agitación a 150rpm durante 24h.

La remoción de arsénico y fluoruro con la muestra FS7-500 fue optimizada vía Diseño Compuesto Central (CCD) usando el software R estadístico (versión 4.0.3.), evaluando tres variables independientes: Concentración Inicial As (1-5 mg/L), pH (3-7) y dosis del adsorbente (0.5-2.5 g/L).

Modelo cuadrático de variables correlacionadas para la eficiencia de As removido (%), ecuación polinomial de segundo orden (Bayuo et al., 2024).

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Y = factor de respuesta previsto

β_0 = coeficiente constante

β_i = coeficiente lineal

β_{ii} = coeficiente cuadrático

β_{ij} = coeficiente de interacción

$X_i X_j$ = valores codificados de los factores

ε = función de error

3.4.3 Cinética

Para conocer la capacidad de remoción de adsorbente con el elemento, se requiere conocer un tiempo al cual es constante la remoción y no ocurra lo contrario (adsorción-desorción). El tiempo se conocerá durante el experimento de cinética; las muestras se sometieron al mismo pH, concentración y dosis. Estos parámetros, con ayuda del diseño de experimento, se fijaron para una mejor adsorción.

En un matraz Erlenmeyer de 125 ml, se pesó 300 mg del extracto de nuez (FS7-500) y también se vertió 150 ml de solución de $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Arseniato de Sodio), la solución se ajustó a un pH 3, y se agitó a 150 rpm. La concentración inicial fue de 4 mg/l a diferentes intervalos de tiempo, como se observa en la tabla 5.

Cuadro 6. Análisis de cinética de adsorción de As

Concentración	pH	Tiempo	Dosis
4 mg/L	3	Intervalos de tiempo durante 24 h	1.5 g/L

3.4.4 Diseño de isoterma

Con los resultados del diseño experimental se puede realizar el proceso de Isotherma, el cual consiste en conocer la concentración máxima de adsorción del elemento sobre la superficie del adsorbente. De acuerdo con los datos conseguidos en el diseño de experimento, la muestra FS7-500 ya cuenta con un nivel de concentración de adsorbente, un pH y una dosis adecuada.

En frascos de vidrio de 7.5 ml se pesaron 15 mg de extracto de cáscara de nuez con y 7.5 ml de la solución de fluoruro, se ajustó a un pH de 3.5, la dosis fue de 1.5 g/L para todas las muestras y la concentración fue desde 0.5 mg/L hasta 10 mg/L. La agitación fue de 150 rpm durante un tiempo de 24 h. Las muestras que se tomaron al concluir las 24 horas se llevaron a laboratorio para un análisis de Arsénico.

3.5 Estudio de Adsorción de Fluoruro

3.5.1 Pruebas preliminares de adsorción

Se estudiaron las muestras de biomasa, biocarbón activado y la muestra pirolizada de biocarbón FS7-500. En un frasco de vidrio de capacidad de 25 ml se vació 20 mg de cada muestra y se mezcló con 10 ml de la solución sintética con fluoruro de amonio empleada para simular contaminación en aguas subterráneas.

Las muestras se cubrieron con papel Parafilm y se sometieron en un agitador JOANLAB modelo OS-20PRO a 150 rpm durante 2 horas.

Cuadro 7. Prueba preliminar de adsorción de fluoruro

Parámetro	Condición	Unidad
Concentración	10	mg/L
pH	2	
Dosis	2	g/L
Tiempo	2	h
Agitación	150	RPM
Temperatura	25°	C

3.5.2 Diseño experimental

Al igual que el experimento con Arsénico, se elaboró una metodología de Modelo de superficie de respuesta. Para el cual los variables fueron:

Variable de respuesta: % Remoción (F^-)

Variables independientes: x_1 : Concentración Inicial, x_2 : pH, y x_3 : dosis del adsorbente.

La adsorción de Fluoruro fue hecha con el Diseño Compuesto Central (CCD) bajo RSM.

Cuadro 8. Configuración de los niveles de las tres variables independientes utilizadas en el desarrollo de la metodología de Modelo de Superficie de Respuesta para la remoción de F⁻

Factor	Bajo	Medio	Alto	Unidades
Concentración Inicial	5	10	15	mg/L
pH	2	4	6	
Dosis	2	6	10	g/L

3.5.3 Estudio de adsorción Cinética de Fluoruro

Durante el diseño experimental las muestras de Fluoruro (F⁻) no arrojaron los resultados esperados. Debido a esto el experimento de remoción de fluoruro con extracto de cáscara de nuez concluyó en el diseño experimental.

3.6 Aplicación en agua subterránea con biocarbón magnético

Se tomaron muestras de agua subterránea en el pozo No. 75 R – Ampliación Senderos, Torreón Coahuila.



Fig. 17 Ubicación del Pozo No.75 Región Lagunera

Datos del Pozo:

Clave: OCCCN0022RNL21

Pozo No. 75 R - Ampliación Senderos

Acuífero: Principal - Región Lagunera. Cuencas Centrales del Norte

Torreón, Coahuila de Zaragoza

Fuente: Pozo profundo

Uso: Público urbano

Gasto promedio de operación: 15 lps

Profundidad: 237 m

Ubicación: Tramo Paso del Águila la Concha-Cerrada del Sauce SIMAS

Coordenadas Geográficas

Longitud: -103.381361

Latitud: 25.622861

Altitud: 1120 msnm

La cantidad de arsénico en este pozo supera la NOM 127-SSA1-2021, que es de 0.025 mg/L, siendo que en el pozo se tiene 0.1397 mg/L, se encuentra catalogada como agua no apta como como fuente de abastecimiento de agua potable. Datos obtenidos por CONAGUA 2021. (CONAGUA, 2025; Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014).

Se tomaron muestras del pozo y se analizaron en crudo para conocer su contenido de Arsénico, así como conocer la calidad en cuanto a condiciones fisicoquímicas del agua. La muestra de agua real se caracterizó para conocer la concentración de arsénico.

Los estudios se realizaron dentro de los laboratorios de análisis químicos del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), Unidad Saltillo. Ubicado en Parque Industrial Saltillo – Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila de Zaragoza. C. P. 25900.

La muestra FS7-500 se ajustó con 0.1 M de HCl/NaOH (ácido clorhídrico con hidróxido de sodio).

3.6.1 Aplicación de la muestra FS7-500 en Agua Subterránea en el Pozo No.75 para remoción de arsénico.

Cuadro 9. Aplicación de la muestra FS7-500 en el Pozo No. 75

Dosis	pH	Duración	Agitación	Temperatura
2 g/L	3.5, 5.0,6.0	6 h	150 RPM	25°C

3.6.2 Composición química agua subterránea

Se realizó un análisis químico de la muestra de agua subterránea mediante el método de espectroscopía de Emisión Atómica por Plasma (ICP) utilizando un espectrómetro de emisión por plasma marca Pekin Elmer Modelo Optima 8300.

Cuadro 10. Composición química del agua subterránea del Pozo No.75

As	0.1397 mg/L
Ca	2.16 mg/L
Cd	<0.010 mg/L
Cr	<0.010 mg/L
Cu	<0.010 mg/L
Fe	0.120 mg/L
Hg	<0.050 mg/L
K	1.95 mg/L
Mg	<0.10 mg/L
Mn	<0.020 mg/L
Na	65.96 mg/L
P	<0.10 mg/L
Si	4.16 mg/L
Zn	<0.010 mg/L
Pb	<0.020 mg/L
S	16.52 mg/L

Cuadro 11. Prueba volumétrica del Pozo No.75

Dureza (como mg/L de CaCO_3)	5.4 mg/L
Alcalinidad (como mg/L de CaCO_3)	60 mg/L
Acidez	<1.0
Cloruros	62.02 mg/L
Sulfatos	75 mg/L
Silicatos	8.90 mg/L
Nitritos	<0.02 mg/L
Nitratos	<2.0 mg/L
pH	11.11
Sólidos totales	267.0 mg/L

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de los materiales

Difracción de rayos X (XRD)

La

Fig. 18 (FS7-500) muestra la intensidad de los rayos X difractados contra el ángulo de difracción; los picos que aparecen corresponden a la difracción de los planos cristalográficos específicos dentro de la muestra.

El estudio XRD confirma la presencia de óxido de hierro cristalino, Fe_3O_4 (magnetita), principalmente. Los picos de difracción se presentan en 30, 35, 43, 54, 62 y 75 grados; mostrados en las posiciones 2θ , la cual es la posición estándar lo que indica que cumple con la funcionalidad.

Se presentan desviaciones en el ensanchamiento e intensidad de los picos esto puede atribuirse al tamaño de los óxidos cristalinos presentes, las interacciones con el soporte del carbón y el efecto en la textura.

La muestra de biomasa (PM) presente en el estudio XRD mostró una naturaleza amorfa, presentando poca cantidad de picos de difracción y una joroba ancha. Lo que comprueba que no hubo presencia de fases cristalinas definidas en el material. La estructura tiene una composición orgánica de celulosa, hemicelulosa y lignina.

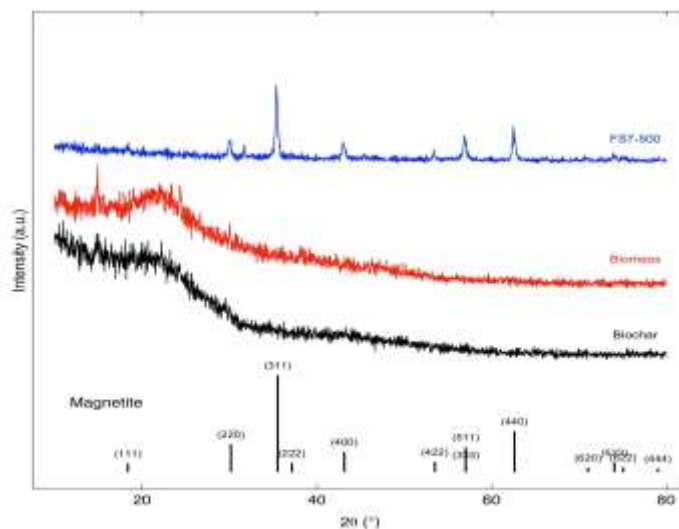


Fig. 18 Modelo XRD de Biocarbón activado con magnetita, FS7-500 (a); Biocarbón, PC-500 (b); Biomasa, PM (c).

Espectrofotometría Infrarroja por Transformaciones de Fourier (FTIR)

En el espectro FTIR (Fig. 19) se observa una disminución en la intensidad de las bandas Fe-O, lo que se debe a una interacción entre arsénico y las nanopartículas de Fe_3O_4 . Mientras que las bandas de $450\text{-}495\text{ cm}^{-1}$ se observan más anchas y menos definidas, esto de igual manera sugiere que el arsénico altera el entorno local de las nanopartículas de hierro.

Las alteraciones en las bandas de $2000\text{-}2200\text{ cm}^{-1}$ indican una posible participación del biocarbón en el proceso de adsorción. Una disminución en la intensidad a través de los espectros sugiere que el material ha adsorbido material de arsénico en los grupos de superficie Fe-O, el biocarbón y tal vez grupos -OH.

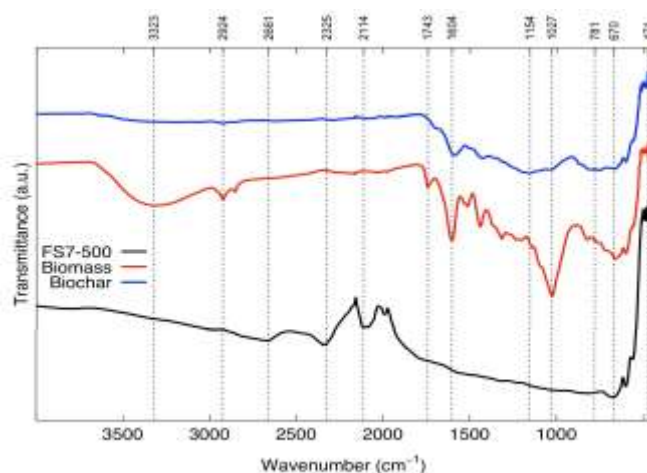


Fig. 19 Modelo FTIR de las muestras FS7-500 (a); PM (b); PC-500 (c).

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La Fig. 20 SEM (50,00x) retrata una sustancia polvorienta compuesta de partículas densamente compactas, las cuales varían en tamaño y morfología. La imagen revela que el material FS7-500 está constituido por partículas aglomeradas submicrométricas caracterizadas por formas irregulares con texturas superficiales rugosas.

La Fig. 21(SEM 100,000x), muestra un espaciamiento entre partículas muy distintivo. Las partículas individuales aparecen esféricas con perímetros bien definidos en su ampliación. Las nanopartículas constituyentes de los agregados se vuelven más perceptibles.

La Fig. 22 (SEM 400,000x), nos da una perspectiva detallada de las nanopartículas individuales. Esto se visualiza predominantemente de forma esférica. Se observan partículas de tamaños como 15 hasta 31nm dentro del rango aproximadamente.

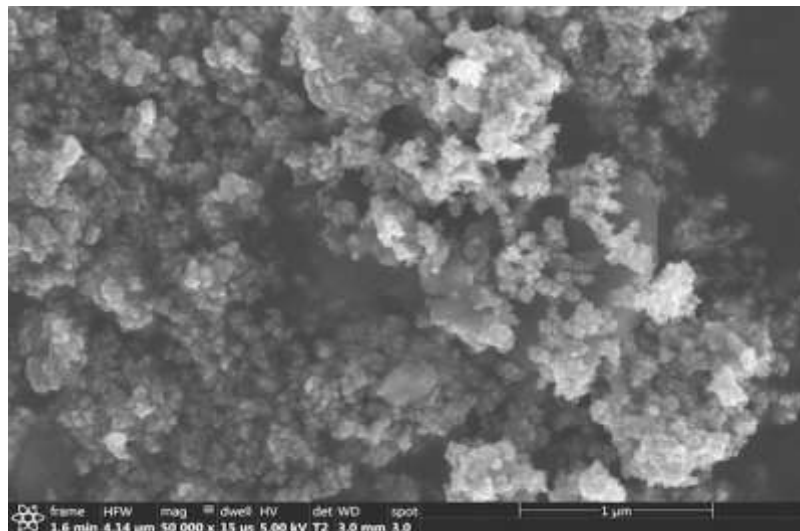


Fig. 20 Estudio SEM de la muestra FS7-500 con ampliación 50,00x.

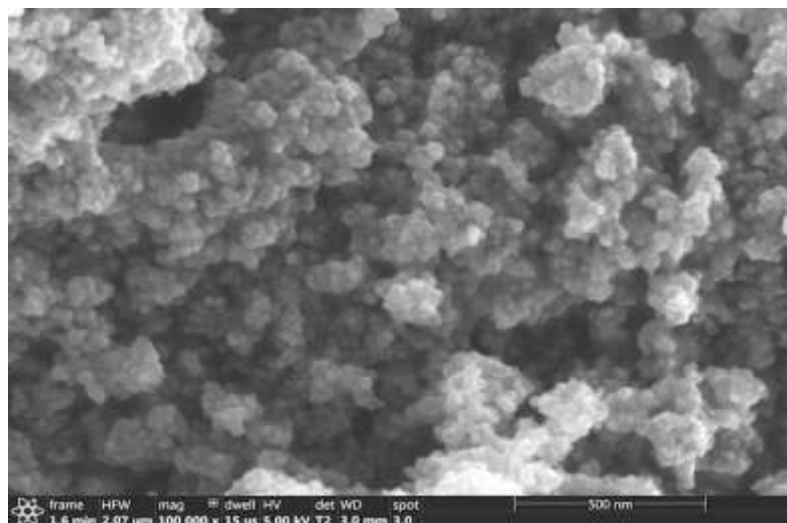


Fig. 21 Estudio SEM de la muestra FS7-500 con ampliación 100,00x.

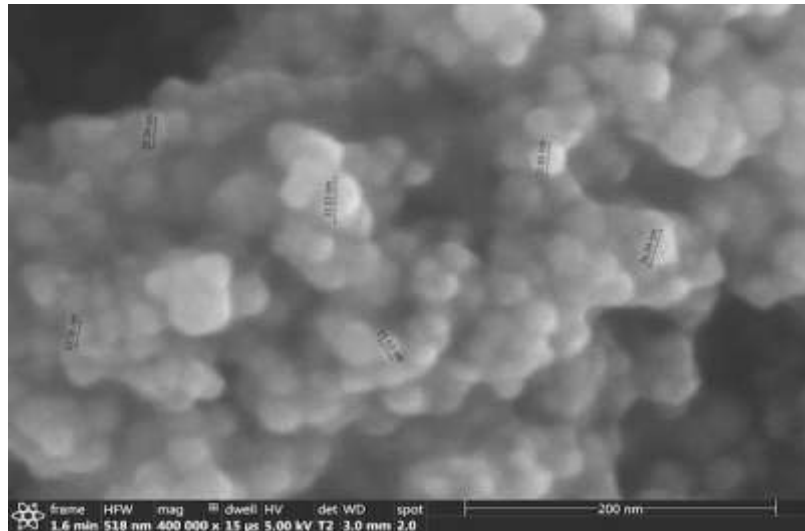


Fig. 22 Estudio SEM de la muestra FS7-500, ampliación de 400,00x.

4.2 Resultados de Adsorción de Arsénico

4.2.1 Estudio preliminar de Arsénico

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta el estudio preliminar de Arsénico con tres materiales; son PM, PC-500 y FS7-500. Se puede observar la adsorción de arsénico para FS7-500 tiene el porcentaje de remoción de arsénico más alto con 99.03%, en la muestra de PC-500 se presenta 8.09% y PM 2.53%. La capacidad de adsorción de las muestras fue de 3.39 mg/g, 1.04 mg/G y 0.27 mg/g respectivamente.

La biomasa (PM) obtuvo una remoción de 2.53%, esto es debido a que el biocarbón no tiene material adherente, como el caso del biocarbón activado (FS7-500) que contiene nanopartículas de magnetita. La biomasa no posee un alto volumen de poros, por lo que es más difícil sea buen adsorbente de partículas de sólidos, sin embargo, cuando esta se somete a procedimiento de pirolisis, su área superficial es mejor aumentando el volumen de poros. Lo que la hace eficiente para la adsorción. (Albatrni et al., 2022).

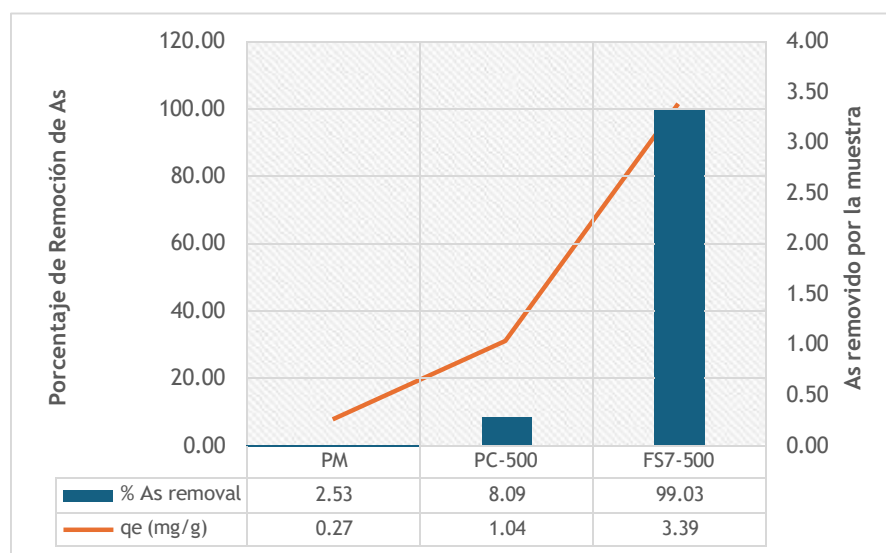


Fig. 23. Gráfica de resultados preliminares de arsénico

4.2.2 Modelo RSM para optimización de la remoción de As.

La concentración inicial, el pH y la dosis tienen un impacto significativo en la eliminación de arsénico. Se observaron efectos lineales para el pH y la dosis, mientras que se encontraron interacciones entre la concentración y la dosis.

El Diseño Compuesto Central (CCD) fue usado para generar los datos, que, dados los términos cuadráticos en el modelo de regresión, permiten la interpretación del área de superficie de respuesta. El desarrollo del modelo cuadrático se ajustó bien con los datos experimentales, con R^2 de 0.9262, esto explica como las variables cruciales influyen con el porcentaje de arsénico removido.

En el experimento de arsénico el diseño fue hecho con los factores pH, concentración inicial y dosis, el valor $p < 0.05$. Se logró una remoción de 98.19% bajo los parámetros: pH 3, dosis del adsorbente de 1.5 g/L y concentración inicial de 4 mg/L. El análisis y los resultados gráficos respaldan la eficacia de FS7-500 para la adsorción de arsénico y la eliminación de contaminantes de soluciones acuosas.

Cuadro 12. Resultados RSM de As

Parámetros	Valor	Unidad
Concentración Inicial	4.037	mg/L
pH	3	
Dosis de adsorción	1.5	g/L
Arsénico removido	98.19	%

Análisis estadístico y evaluación de modelos

Ecuación de regresión (variables codificadas):

$$Y = 80.48 - 3.64x_1 - 4.26x_2 + 6.11x_3 + 2.21x_1 \cdot x_2 + 6.53x_1 \cdot x_3 - 1.54x_2 \cdot x_3 + 12.4x_1^2 + 6.49x_2^2 - 12.91x_3^2$$

La intersección (80.48) es el % de eliminación predicho cuando todas las variables están en su nivel cero codificado (valores medios: Concentración Inicial = 3 mg/L, pH = 5, Dosis = 1.5 g/L).

Significancia Estadística:

Los valores p indican la importancia de cada término en el modelo:

Efectos lineales significativos ($p < 0.05$) para pH y dosis

Efecto de interacción significativo ($p < 0.05$) para Concentración Inicial*Dosis

Efectos cuadráticos significativos ($p < 0.05$) para la concentración inicial y la dosis

El pH y la dosis son variables cruciales que influyen en el porcentaje de eliminación de arsénico.

Adecuación del modelo:

R cuadrado múltiple: 0.9262 (el modelo explica el 92.62% de la variabilidad de los datos).

R cuadrado ajustado: 0.8156 (este valor disminuye después de corregir el tamaño de la muestra), indica un ajuste más bajo.

Prueba de falta de ajuste: valor p de 0.082651 (> 0.05) (La falta de ajuste no es significativa, lo que significa que el modelo puede predecir adecuadamente la respuesta).

Cuadro 13. Valores óptimos para la remoción de As

Valores Óptimos de Remoción de Arsénico con Error Estándar						
Concentración Inicial	pH	Dosis del adsorbente	Arsénico Removido	ES	Límite de confianza Inferior	Límite de confianza Superior
2.361	3.5	1.9706	93.4885	2.656	89.9693	99.9877

A continuación, se muestran ilustraciones de la relación y como interfiere cada factor en el modelo de experimento.

Fig. 24 % Remoción de As vs Dosis, Concentración Inicial (pH constante): % Remoción de As vs Dosis, Concentración Inicial (pH constante)

Al aumentarse la dosis de FS7-500, el porcentaje de remoción aumentó significativamente; en concentraciones bajas de la muestra FS7-500 la remoción no tiene ningún efecto. En concentraciones iniciales altas, la remoción aumenta, pero si las concentraciones mayores a 5 mg/L la remoción comienza a disminuir.

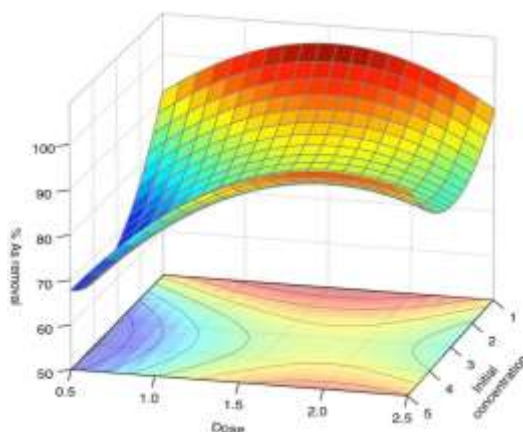


Fig. 24 % Remoción de As vs Dosis, Concentración Inicial (pH constante)

Fig. 25: % Remoción de As vs Concentración inicial y pH (dosis constante)

El porcentaje de remoción de arsénico disminuye con el incremento de la concentración inicial, particularmente en los valores más altos. Como el pH incrementa, el porcentaje de remoción de arsénico también aumenta, especialmente en los valores más altos de pH. Parece haber una interacción entre la concentración inicial y el pH, ya que su comportamiento combinado influye en la remoción de arsénico.

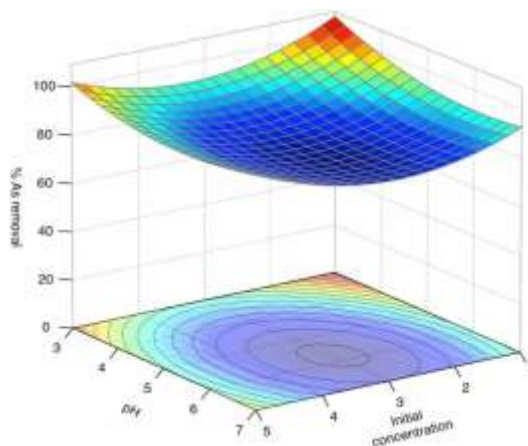


Fig. 25 % Remoción de As vs Concentración inicial, pH (dosis constante)

Fig. 26: % Remoción de As vs dosis y pH (concentración inicial constante)

Tanto dosis como pH influyen en la remoción de arsénico, la remoción más alta de arsénico se logra con el incremento del pH. Es probable que exista un pH óptimo más allá del cual la tendencia se invierte, ya que la curva es convexa y comienza a disminuir con respecto a las variables.

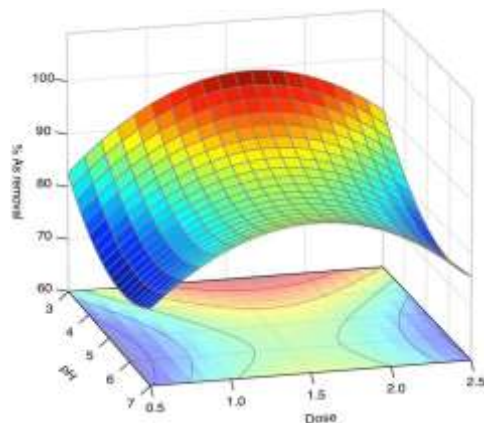


Fig. 26 % Remoción de As vs Dosis, pH (concentración inicial constante)

4.2.3 Cinética de Adsorción

La imagen muestra los puntos de datos experimentales como círculos en color negro con barras de error. Estos representan la cantidad de arsénico adsorbido por unidad de masa de FS7-500 (q_t , en mg/g) en diferentes intervalos de tiempo (en minutos).

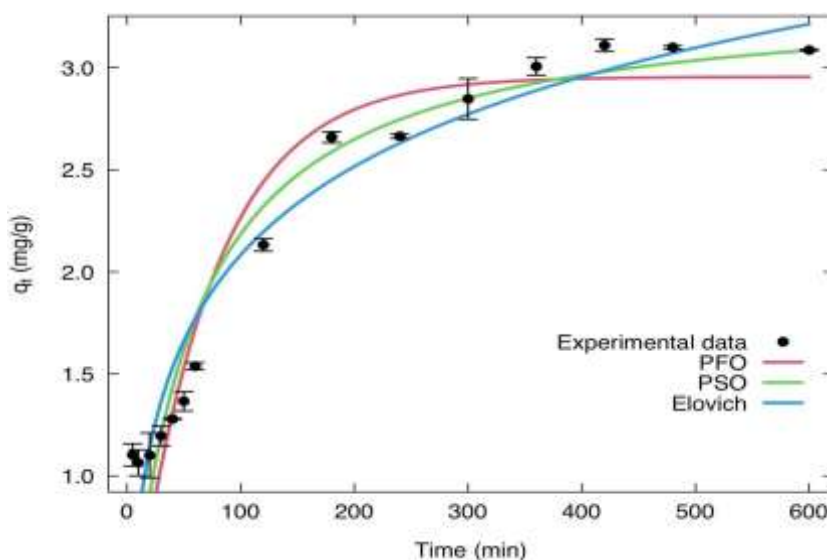


Fig. 27 Cinética de Adsorción de arsénico, con modelos Pseudo primer y segundo orden, y modelo de Elovich

La adsorción es rápida en las etapas iniciales (0-100 minutos) y luego se ralentiza gradualmente. Se ajustaron tres modelos cinéticos diferentes PFO (Pseudo Primer Orden), PSO (Pseudo Segundo Orden) y el modelo de Elovich, siendo el modelo Elovich el que mejor se ajustó con los datos del experimento.

El modelo Elovich tuvo el valor R^2 más alto (0.928) en comparación con PSO (0.883) y PFO (0.840). Cuadro 14 El modelo de Elovich muestra los errores más bajos en los parámetros. Tanto el valor de Chi-cuadrado como el RMSE son los más bajos.

Cuadro 14. Comparación de modelos de cinética de adsorción: Pseudo Primer Orden, Pseudo Segundo Orden, Elovich

PFO	valores	PSO	valores	Elovich	valores
q_e	2.955	q_e	3.363	β	1.555
k_1	0.015	k_2	0.006	α	0.158
R^2	0.840	R^2	0.883	R^2	0.928
R^{2adj}	0.827	R^{2adj}	0.874	R^{2adj}	0.922
X^2	5.266	X^2	3.046	X^2	0.948
RSS	1.669	RSS	1.213	RSS	0.755
RMSE	0.334	RMSE	0.284	RMSE	0.224
RMSPE	16.009	RMSPE	13.650	RMSPE	10.765

Este modelo se usa a menudo para sistemas de adsorción que involucran superficies heterogéneas o cuando el paso limitante de la velocidad es el proceso de adsorción química. Los parámetros de este modelo pueden proporcionar información sobre la tasa de adsorción inicial y el alcance de la cobertura superficial. Este modelo asume que la superficie de adsorción es heterogénea, este modelo es mejor que los demás, ya que se espera que un compuesto de nano materiales soportado por biocarbón sea heterogéneo.

4.3 Adsorción de Fluoruro

4.3.1 Experimento preliminar de fluoruro

Los resultados muestran el porcentaje de remoción de fluoruro con las muestras de biomasa (PM), biocarbón (PC-500) y biocarbón activado (FS7-500). la muestra FS7-500 tuvo un porcentaje de remoción de 30.5% muy similar a la muestra PC-500 la cual fue de 27%. A pesar de que se siguieron estudios anteriores a cerca de remoción con biocarbón, los resultados fueron bajos. Esto puede ser debido al tiempo de agitación, para otros experimentos se implementó un tiempo de 24 horas.

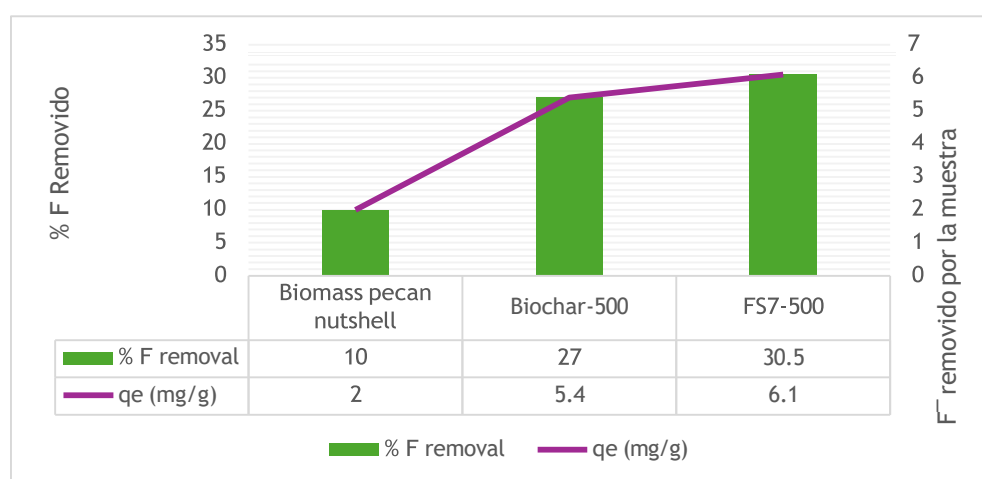


Fig. 28. Gráfica de resultados preliminares de remoción de F^-

4.3.2 Diseño Experimental

Con el objetivo de determinar las condiciones óptimas para el proceso, se muestra la tabla a continuación. Los factores críticos evaluados en este diseño experimental fueron la concentración inicial de fluoruro, el pH de la solución y la dosificación del adsorbente FS7-500.

Se determina 53% como valor más alto de remoción de F^- con la muestra FS7-500.

Cuadro 15. Condiciones óptimas y resultados de la validación del modelo RSM para la remoción de fluoruro utilizando el biocarbón FS7-500

Valores Óptimos para Remoción de Fluoruro con Error Estándar						
Concentración Inicial	pH	Dosis del adsorbente	Fluoruro Removido	ES	Límite de confianza Inferior	Límite de confianza Superior
5	2	10	53.1695	4.0697	43.2114	63.1276

Fig. 29 % Remoción de F^- vs Concentración inicial, pH (dosis constante): % Remoción de F^- vs Concentración Inicial & pH (dosis constante):

A medida que aumenta la concentración inicial de fluoruro, el porcentaje de eliminación de fluoruro disminuye drásticamente. Este efecto pronunciado sugiere un número limitado de sitios activos para la adsorción de fluoruro en la superficie del FS7-500. A medida que aumenta el pH, disminuye el porcentaje de eliminación de flúor. Esto indica que FS7-500 es más eficaz para eliminar el fluoruro en condiciones ácidas.

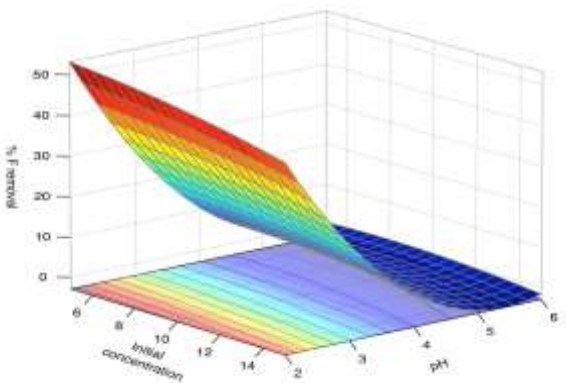


Fig. 29 % Remoción de F^- vs Concentración inicial, pH (dosis constante)

Fig. 30: % Remoción de F^- vs dosis y pH (concentración inicial mantenida constante):

El aumento de la dosis de FS7-500 conduce a un aumento gradual en el porcentaje de eliminación de fluoruro. Esto sugiere que una dosis más alta proporciona más sitios de unión disponibles para el fluoruro. El porcentaje de eliminación de fluoruro disminuye con el aumento del pH.

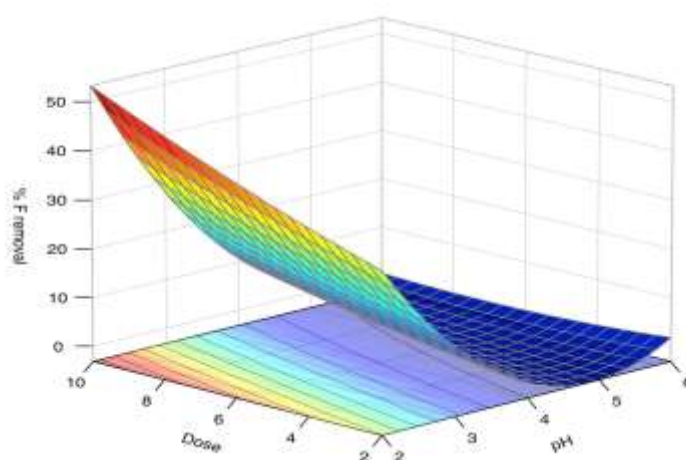


Fig. 30 % Remoción de F^- vs Dosis, pH (concentración constante)

Fig. 31: % Remoción de F^- vs dosis y concentración inicial (pH constante):

El aumento de la dosis de FS7-500 da como resultado un aumento correspondiente en la eliminación de fluoruro. Es esencial determinar el rango de dosis óptimo para maximizar la eficiencia de eliminación. El aumento de la concentración inicial de fluoruro afecta negativamente el porcentaje de eliminación de fluoruro.

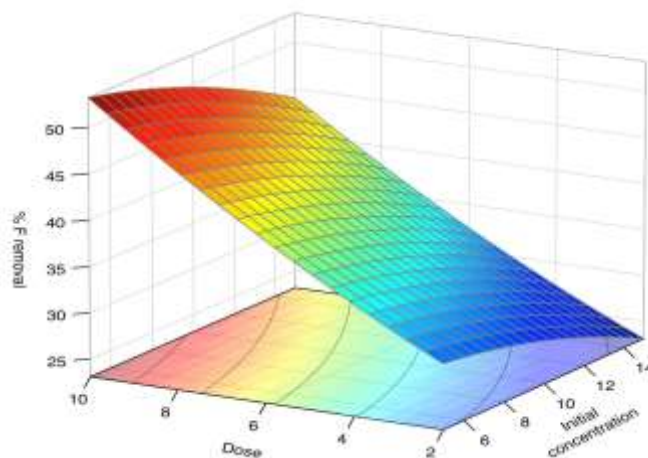


Fig. 31 % Remoción de F^- vs Dosis, concentración inicial (pH constante)

Los valores de pH más bajos (ácidos) favorecen la eliminación del flúor. Esta es una observación común en los procesos de adsorción de fluoruro, atribuida al aumento de la atracción electrostática entre el adsorbente y los iones fluoruro. También puede indicar que los sitios basados en hierro en FS7-500 son más accesibles para la unión de fluoruro a pH más bajo, debido a la protonación de grupos hidroxilo superficiales, lo que mejora la atracción electrostática.

Todos los gráficos indican la ausencia de un óptimo claro dentro del rango de valores de las variables independientes estudiadas. Por lo tanto, es necesaria una mayor investigación dentro de un rango de valores de dichas variables cercano al punto en el cual el porcentaje remoción fue máximo, de esa manera determinar las condiciones óptimas para estas variables. Las condiciones ácidas y el aumento de las dosis de adsorbente promueven la adsorción de fluoruro en FS7-500, mientras que las altas concentraciones iniciales de fluoruro reducen la extracción de fluoruro del agua.

4.4 Adsorción de Arsénico en Pozo No.75

En el estudio de adsorción de arsénico para agua subterránea se observa principalmente el comportamiento del pH, de acuerdo con el experimento en tres modelos de pH diferente, el pH óptimo fue de 6, esto afecta las interacciones entre la muestra FS7-500 y las especies de arsénico en medios ácidos o alcalinos. A niveles de pH bajos, los oxianiones de arsénico suelen protonarse facilitando la atracción electrostática entre el adsorbente cargado positivamente y las especies de arsénico.

Así mismo la superficie del material permite una mayor adsorción del material, siendo este aspecto de importancia para el estudio. Los resultados de SEM mostraron una nanoestructura que proporciona una alta área superficial para la adsorción de arsénico, mejorando el proceso de adsorción en el experimento de agua subterránea.

Los resultados fueron extremadamente altos, con un pH de 6 se obtuvo un porcentaje de remoción de 98.6% de arsénico, a una dosis de 2 g/L.

Cuadro 16. Resultados de adsorción de arsénico en el pozo No. 75

Efecto de pH	% Arsénico Removido	qe (mg/L)
3.5	62.66	0.094
5	29.33	0.044
6	98.67	0.148

De acuerdo con los estándares de la NOM-127-SSA1-2021 (*Agua para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de la Calidad del Agua*), el límite permisible para el arsénico (As) en todas las localidades es de 0.01 mg/L. El Pozo No. 75 "Ampliación Sendero" presentó una concentración inicial de arsénico de 0.075 mg/L, excediendo significativamente el límite establecido. Al finalizar el experimento, se logró una remoción del 98 %

(con una concentración final de As por debajo del límite de detección del equipo, 0.005 mg/L), lo que permite concluir que el biocarbón magnético activado, elaborado a partir de cáscara de nuez pecanera, es un adsorbente eficaz para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con metales pesados o metaloides. Este rendimiento óptimo está sujeto a factores críticos como el pH, la dosis de adsorbente y el tiempo de agitación.

Al contrastar los resultados con la literatura, se confirma la relevancia del pH, la dosis del adsorbente y el método de pirólisis como variables clave en la remoción de contaminantes. En el proceso de pirólisis, se recomienda mantener la temperatura por debajo de los 600 °C (idealmente 500 °C), ya que temperaturas superiores pueden provocar la descomposición excesiva de la lignina y reducir el rendimiento del adsorbente, tal como reportaron (Ahmad et al., 2012)., en sus estudios con rastrojo de soja y cáscara de maní.

Las caracterizaciones mediante MEB (SEM), FTIR y DRX (XRD) revelan la morfología porosa del adsorbente, así como sus grupos funcionales y composición química. Este estudio demostró la presencia de grupos hidroxilo y nanopartículas de magnetita, los cuales facilitan la adherencia de los iones del contaminante. Gracias a la incorporación de Fe_3O_4 , la interacción con el arsénico y el fluoruro se traduce en una adsorción exitosa, mejorando la viabilidad del biocarbón como un removedor natural de bajo costo. Estos resultados son consistentes con los de Bhushan et al. (2020), quienes lograron una impregnación de alta efectividad mediante pirólisis de aserrín a 500 °C tratada con H_2SO_4 .

Finalmente, el uso de residuos orgánicos permite obtener adsorbentes excelentes para la remediación de agua y suelos con costos operativos reducidos. Se requiere ampliar las investigaciones actuales sobre el biocarbón y sus aplicaciones emergentes en la ciencia ambiental.

4.5 Efecto de propiedades de materiales con capacidad adsorción de Arsénico

En los resultados de FTIR se encuentran grupos en la superficie de FeO, hidroxilo y grupos de carbono que es sitio activo de adsorción de Arsénico. La presencia de oxígeno que contiene el grupo funcional se encuentra en la superficie de biocarbón, lo que puede contribuir con las propiedades de adsorción de arsénico. (Zhang et al., 2023).

PC-500 revela una naturaleza amorfa; estos materiales carecen de orden en su disposición atómica, partículas como celulosa, hemicelulosa y lignina no están ordenados en un retículo cristalino. Mientras que el patrón XRD de FS7-500 indica claramente la presencia de nanopartículas cristalinas de Fe_3O_4 , en la muestra de biomasa no se observa esto debido a su composición orgánica. La comparación destaca que el material de carbón vegetal PC-500 sirve como soporte no cristalino para las nanopartículas magnéticas cristalinas formadas en el compuesto FS7-500.

De acuerdo con el análisis SEM, tanto PC-500 y FS7-500 sugieren que el material está compuesto por nanopartículas aglomeradas, una característica frecuente de diversos nanomateriales, especialmente aquellos sintetizados mediante coprecipitación y pirólisis. (Padasalagi & Rabinal, 2024).

El material FS7-500, de acuerdo con los estudios de caracterización, posee características importantes: como la presencia de magnetita y su volumen de superficie alto, así como porosidad aptos para lograr una remoción efectiva en materiales como arsénico en el agua subterránea y en soluciones acuosas con similitud. La muestra se consideró elegible al experimento debido a su facilidad de recolección por la zona de estudio y su composición orgánica.

Conclusiones

- **Éxito de la Síntesis:** Se obtuvo un biocarbón magnético mediante la funcionalización de cáscara de nuez con nanopartículas de Fe_3O_4 . Este material combina la porosidad de la biomasa con propiedades magnéticas que permiten su recuperación eficiente después del tratamiento.
- **Eficiencia frente al Arsénico:** El adsorbente FS7-500 logró una remoción de As del 98.19 % en condiciones controladas y superior al 98% en agua subterránea real. Los resultados finales se sitúan por debajo de los 0.01 mg/L, cumpliendo rigurosamente con la NOM-127-SSA1-2021.
- **Mecanismo y Optimización:** Las condiciones óptimas para remover arsénico (pH 6; 2 g/L de adsorbente) sugieren un mecanismo de adsorción mediante complejos de esfera interna sobre la superficie del biocarbón magnetizado.
- **Selectividad del Ion Fluoruro (F^-):** La remoción de fluoruro fue ineficaz bajo las condiciones óptimas del arsénico. Su dependencia de un pH más ácido y mayores tiempos de contacto limita la aplicación simultánea.
- **Valorización de Residuos:** Se validó que la cáscara de nuez pecanera es una materia prima viable y de bajo costo para producir adsorbentes de alta eficiencia, transformando un residuo agrícola en una solución tecnológica para la crisis del agua en la Comarca Lagunera.

Anexos

Preparación de solución madre Fluoruro

Para realizar los experimentos se elaboró una solución de fluoruro de amonio para simular el agua contaminada. Para esto se trabajó con Fluoruro de Amonio (NH_4F) al 98% de la marca SIGMA-ALDRICH.

Se preparó una solución madre de Fluoruro de Amonio de 194.96 ppm de acuerdo con los siguientes cálculos:

Considerando que 1 mol de Fluoruro de Amonio contiene 18.998 g de F el peso molar de la solución (37.04 g/mol) se calculó con la pureza la cantidad de gramos que llevaría la solución madre.

$$\text{NH}_4\text{F} = 37.04 \text{ g/mol}$$

$$\text{F} = 18.998 \text{ g/mol}$$

$$\frac{37.04}{18.998} \times 100 = 194.96 \text{ ppm} \rightarrow \text{La pureza del reactivo es de 98\%,}$$

como solo queremos obtener el fluoruro, obtenemos a un 100%; para ello aplicamos una regla de tres.

$$194.96 - 98 \%$$

$$-100 \%$$

$$= 198.93 \text{ mg para Sol. } 100\text{mg/L}$$

Concentración inicial

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \frac{(10 \frac{\text{mg}}{\text{L}}) (1000\text{ml})}{100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} = 100 \text{ ml de agua Tipo 1.}$$

Se toman 100 ml de Solución madre NH_4F y se afora con agua desionizada en un matraz de 1000ml para obtener una concentración de 10mg/L. Y así se continuó trabajando según las concentraciones que se requerían en los experimentos.

Preparación de Solución madre de Arsénico

Para la elaboración de la solución madre de Arsénico, se trabajó con el reactivo Arseniato de Sodio Heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) al 98% de la marca SPECTRUM CHEMICAL MGF, que tiene un peso molar de 207.887 g/mol.

$$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 306.0603 \text{ g/mol}$$

$$\text{As} = 74.992 \text{ g/mol}$$

$$\frac{306.0603}{74.992} \times 100 = 408.1239 \text{ ppm}$$

$$408.1239 - 98 \%$$

$$-100 \%$$

$$= 4.16453 \text{ g para } 1000\text{ml}$$

$$= 0.4164 \text{ g para una solución de } 100 \text{ ml con agua Tipo 1.}$$

Difracción de Rayos XRD

Se basa en la interacción de la estructura cristalina de un sólido con una fuente de rayos x los rayos x viajan a través de una estructura cristalina, son difractados por las diversas capas atómicas dentro del cristal; los rayos difractados sufren interferencias, que pueden ser constructivas o destructivas. Después de la difracción, la intensidad de los rayos x se puede evaluar con precisión generando un patrón de difracción en forma de gráfico; que nos permite identificar, por su intensidad, los elementos cristalinos de alguna sustancia o elementos que contiene la muestra. (Vázquez, 2020).

Preparación de muestra para análisis con FTIR

La textura al igual que para análisis XRD debe ser fina, lográndose con ayuda de un tamiz No. 200 y un mortero. Para este método se tomaron 100 mg de la muestra y se etiquetó.

La FTIR reúne los datos espectrales de todas las longitudes de onda, una fuente continua genera luz IR en una amplia gama de longitudes de onda infrarrojas, esta pasa a través de un interferómetro y luego se dirige a la muestra. (Carroll C Flinn, 2025).

La intensidad de luz debe ser transformada por Fourier para producir la representación IR más familiar de intensidad en función al número de onda; cada una característica de enlaces específicos en la molécula y dependen de la intensidad del grupo funcional que contiene. (Bruker, 25 C.E.; Carroll & Flinn, 2025).

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido permite obtener imágenes en gran resolución de materiales microscópicos y elementos, así como conocer la morfología y tamaño de la muestra.

La luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie. En el microscopio la muestra es recubierta con una capa de carbón o también puede recubrirse de una capa delgada de oro. (Castroviejo-Fernández, 2025).

REFERENCIAS

- Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536-544. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.05.042>
- Alarcón-Herrera, M. T., Martín-Alarcon, D. A., Gutiérrez, M., Reynoso-Cuevas, L., Martín-Domínguez, A., Olmos-Márquez, M. A., & Bundschuh, J. (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Science of The Total Environment*, 698, 134168. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.134168>
- Albatrni, H., Qiblawey, H., & Al-Marri, M. J. (2022). Walnut shell-based adsorbents: A review study on preparation, mechanism, and application. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102527. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2021.102527>
- Bhushan, B., Gupta, V., & Kotnala, S. (2020). Development of magnetic-biochar nano-composite: Assessment of its physico-chemical properties. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3271-3274. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.911>
- Bruker. (25 C.E.). *Guía de Espectroscopía Infrarroja*. Bruker. <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html>
- Burciaga-Montemayor, N. G., Claudio-Rizo, J. A., Cano-Salazar, L. F., Martínez-Luévanos, A., & Vega-Sánchez, P. (2020). Compósitos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales. *TIP Revista Especializada en*

- Ciencias Químico-Biológicas, 23, 13.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.211>
- Carbonel, D. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería*, 23(3), 22. <https://doi.org/10.14483/23448393.13418>
- Carbotecnia. (2023). Arsénico en el agua potable ¿Cómo eliminarlo_ toxicidad, salud? *Carbotecnia*, 11.
[Arsénico en el agua potable ¿Cómo eliminarlo? toxicidad, salud](#)
- Carroll, J., & Flinn, B. (2025). Espectroscopía Infrarroja Por Transformada de Fourier. 2025, 1, 25.
<https://es.jsheld.com/perspectivas/art>
- Castroviejo-Fernández, M. P. (2025). Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). *Universidad de Burgos: Regional University Network*, 6. <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb#:~:text=Inventado>
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Estadísticas del Agua en México 2023 Comisión Nacional del Agua*.
- CONAGUA. (2025, August 18). Indicadores de Calidad del Agua _ Comisión Nacional del Agua _ Gobierno _ gob.mx. 2025/08/18, 4.
[Indicadores de Calidad del Agua | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx](#)

- de Antuñano, S. Eguiluz. (2022). Stratigraphy and structural evolution of the Coahuila Block, northeastern Mexico. *Boletín de la Sociedad Geologica Mexicana*, 74(2), 41. <https://doi.org/10.18268/BSGM2022v74n2a110522>
- Diario Oficial de la Federación. (1982). *Análisis de Aguas - Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4890444&fecha=01%2F07%2F1996&cod_diario=209551&
- Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea de los 653 Acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, 2023/09/18 8 (2022). https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- García, S. I. (2011). *Programa Nacional de Prevención y Control de las Intoxicaciones - Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE)*. <https://www.mendoza.gov.ar/wp-content/uploads/sites/7/2017/11/Guia-Hidroarsenisismo-Cronico-Regional-Endemico-HACRE.pdf>
- Goicochea-Núñez, A. S., & Ruiz-Cacha, J. J. (2018). *Adsorción de arsénico disuelto en agua subterránea en el distrito de Mórrope (Lambayeque) utilizando residuos sólidos de café (afrecho)* [Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. [file:///C:/Users/ali_b/Downloads/BC-TES-TMP-2010%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/ali_b/Downloads/BC-TES-TMP-2010%20(3).pdf)
- Hernández Alvarado, H. G., Enríquez Robledo, A. del C., & Morales Pérez, J. A. (2022). Hidroarsenicismo. Un acercamiento a su significado en localidades emblemáticas del norte de México. *Transdisciplinar. Revista de Ciencias Sociales Del CEH*, 2(3), 64-97. <https://doi.org/10.29105/transdisciplinar2.3-36>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). *Diccionario de Datos de Uso del Suelo y Vegetación*. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825063443.pdf
- Instituto Nacional del Cáncer. (2017, May 15). *Agua fluorada*. <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/mitos/hoja-informativa-agua-fluorada>
- International Agency for Research on Cancer. (2012). Arsenic, Metals, Fibres and Dusts. *IARC MONOGRAPHS*, 100 C, 527. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23189751/>
- Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. (2022). Aprovechamiento integral de la nuez. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Gobierno de México. www.gob.mx/inifap/articulos/aprovechamiento-integral-de-la-nuez
- Jang, S. H., Jeong, Y. G., Min, B. G., Lyoo, W. S., & Lee, S. C. (2008). Preparation and lead ion removal property of hydroxyapatite/polyacrylamide composite hydrogels. *Journal of Hazardous Materials*, 159(2-3), 294-299. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2008.02.018>
- Kumar, H., Patel, M., & Mohan, D. (2019). Simplified Batch and Fixed-Bed Design System for Efficient and Sustainable Fluoride Removal from Water Using Slow Pyrolyzed Okra Stem and Black Gram Straw Biochars. *ACS Omega*, 4(22), 19513-19525. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00877>

- Mohan, D., Kumar, S., & Srivastava, A. (2014). Fluoride removal from ground water using magnetic and nonmagnetic corn stover biochars. *Ecological Engineering*, 73, 798-808.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2014.08.017>
- Mohan, D., & Pittman, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 1-53.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.01.006>
- Navarro, O., González, J., JÚnez-Ferreira, H. E., Bautista, C. F., & Cardona, A. (2017). Correlation of Arsenic and Fluoride in the Groundwater for Human Consumption in a Semiarid Region of Mexico. *Procedia Engineering*, 186, 333-340.
<https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.03.259>
- Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., & Du Laing, G. (2015). Technologies for arsenic removal from water: Current status and future perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1), 24.
<https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>
- NOM-117-SSA1-1994. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica, 1995/06/29 8 (1995).
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4879610&fecha=16%2F08%2F1995&#gsc.tab=0
- NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, Pub. L. NOM-127-SSA1-2021, 2022/03/16 151 (2021).
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705

Organización de las Naciones Unidas. (2023). Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible. ONU, 8.

<https://www.unwater.org/>

Pabón Guerrero, S. E., Benítez Benítez, R., Sarria Villa, R. A., & Gallo Corredor, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
<https://doi.org/10.31908/19098367.1734>

Padasalagi, A. B., & Rabinal, M. K. (2024). The crucial role of casein on crystal structure, size, morphology, and magnetic properties of carbon supported Ni nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 602, 172215.
<https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2024.172215>

Prathna, T. C., Sitompul, D. N., Sharma, S. K., & Kennedy, M. (2018). Synthesis, characterization and performance of iron oxide/alumina-based nanoadsorbents for simultaneous arsenic and fluoride removal. *Desalination and Water Treatment*, 104, 121-134.
<https://doi.org/10.5004/DWT.2018.21960>

Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua. (2018). *Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA)*.
<https://files.conagua.gob.mx/transparencia/CalidaddelAgua.pdf>

Romero, V., Norris, F. J., Ríos, J. A., Cortés, I., González, A., Gaete, L., & Tchernitchin, A. N. (2017). Consecuencias de la fluoración del agua potable en la salud humana. *Revista Médica de Chile*, 145, 10.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872017000200012>

Taylor, K. W., Eftim, S. E., Sibrizzi, C. A., Blain, R. B., Magnuson, K., Hartman, P. A., Rooney, A. A., & Bucher, J. R. (2025, March 3).

Fluoride Exposure and Children's IQ Scores: A Systematic Review and Meta-Analysis. American Medical Association. JAMA Pediatrics. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2024.5542>

Usepa, Region, & Foia. (2007). *Division of Toxicology and Environmental Medicine ToxFAQs - Arsenic*. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf>

Vazquez, J. (2020, October 20). *¿Qué es la Difracción de Rayos X (XRD)_ - Espectrometría?* Espectrometría. <https://espectrometria.com.mx/que-es-la-difraccion-de-rayos-x-xrd-y-por-que-es-tan-importante-para-la-industria/>

Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122156. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122156>

Zhang, N., Reguyal, F., Praneeth, S., & Sarmah, A. K. (2023). A green approach of biochar-supported magnetic nanocomposites from white tea waste: Production, characterization and plausible synthesis mechanisms. *Science of The Total Environment*, 886, 163923. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163923>