



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

“Adsorción de arseniato en agua empleando Hidróxidos Dobles Laminares”

Tesis para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental.

presentada por:

I.Q. ALEXIS CALDERÓN HERRERA

Dirección de Tesis:

D.C. ROBERTO GUERRA GONZÁLEZ

CO-Dirección de Tesis:

D.C. SAYRA LISSETTE OROZCO CERROS

INDICE GENERAL

RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	8
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Metales pesados:	10
2.2. Metales pesados en el ambiente:	10
2.3. Adsorción:	10
2.4. Adsorción física:	11
2.6. Equilibrio de adsorción:	11
2.7. Hidróxidos dobles laminares:	12
2.8. Arsénico:	14
2.9. Especiación de especies de Arsénico:	14
3. ANTECEDENTES	16
4. JUSTIFICACIÓN	21
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
6. HIPÓTESIS	23
7. OBJETIVO GENERAL	23
8. OBJETIVOS ESPECIFICOS	23
9.METODOLOGIA EXPERIMENTAL	24
9.1. Materiales y reactivos	24
9.2. Síntesis de los hidróxidos dobles laminares Mg/Fe/Zn	25
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
10.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM).	26
10.2. Difracción de Rayos X (DRX).	27
10.3. Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).	29
10.4. Pruebas de adsorción (Isotermas de Langmuir y Freundlich).	31
11. CONCLUSIONES	35
12. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.	36
BIBLIOGRAFIA	37

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Características de un adsorbente.	11
Figura 2: Tipos de representativos de isothermas de adsorción.	12
Figura 3: a) Estructura de la brucita (lamina). b) LDH.	13
Figura 4: Esquema de la hidrotalcita.	13
Figura 5: Distribución de especies de hidróxidos de arseniato en función del pH a 25°C..	15
Figura 6: Representación de los complejos de arsénico formados en superficies minerales de óxido de hierro.	17
Figura 7: Etapas de síntesis.	24
Figura 8: Microscopia electrónica de barrido (SEM) del material HDL Mg/Fe/Zn.	26
Figura 9: Difracción de rayos X (DRX) del material HDL Mg/Fe/Zn antes de la adsorción de As (V).	27
Figura 10: Difracción de rayos X (DRX) HDL Mg/Fe/Zn después de la adsorción de As (V).	28
Figura 11: Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) HDL Mg/Fe/Zn antes de la adsorción de As (V).	29
Figura 12: Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) HDL Mg/Fe/Zn después de la adsorción de As (V).	30
Figura 13: Isothermas de Langmuir y Freundlich.	32
Figura 14: Comportamiento de la concentración de As (V) en la solución al transcurrir el tiempo de contacto con el material HDL Mg/Fe/Zn.	34

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modelos de equilibrio de adsorción.	19
Tabla 2: Reactivos de síntesis.	24
Tabla 3: Parámetros de las isothermas de equilibrio para la adsorción de As (V) en los HDL de Mg/Fe/Zn.	33

GLOSARIO

Agua decarbonatada: Agua carente de sales minerales del agua, es decir aniones y cationes, completamente libre de sólidos disueltos totales.

Alcalina: Adjetivo empleado para definir determinados elementos o compuestos químicos capaces de neutralizar los ácidos y sus efectos.

Análisis termogravimétrico: Técnica de análisis en la que se mide la masa (pérdida o ganancia) de una muestra cuando ésta se somete a un programa controlado de temperatura.

Arcillas: Rocas sedimentarias descompuestas constituidas por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato.

Brucita: Mineral de hidróxido de magnesio, por lo tanto, de la clase de los llamados minerales óxidos.

Carga electrostática: Propiedad de la materia responsable de los fenómenos electrostáticos, cuyos efectos aparecen en forma de atracciones y repulsiones entre los cuerpos que la poseen.

Catión trivalente: Un catión es un ion de carga positiva y trivalente en el caso del catión significa que pierde 3 electrones.

Coprecipitación: Proceso por el cual una especie que normalmente es soluble se separa de la disolución durante la formación de un precipitado.

Cristalinidad: Propiedad de un compuesto macromolecular que consiste en una disposición regular de las macromoléculas entre sí.

Descomposición térmica: Reacción en la que un compuesto se separa en al menos otros dos cuando se somete a un aumento de temperatura.

Desorción: Fenómeno por el cual una sustancia se libera desde o a través de una superficie.

Ecotóxicos: Producto químico peligroso con capacidad para ser absorbido por cualquiera de los elementos de un ecosistema y para, por pequeña que sea la cantidad presente, alterar los equilibrios biológicos del mismo.

Estabilidad térmica: Capacidad de un material para resistir un cambio (en su forma física o de tamaño) conforme cambia su temperatura.

Hidrotalcita: Es un compuesto químico octaédrico a base de magnesio comercializado con el nombre de Baytalcid y Gastrum e indicado en medicina como medicamento antiácido para el alivio de la acidez estomacal.

Intercalación: Inclusión reversible de una molécula (o grupo) entre otras dos moléculas

Intercambio aniónico: Intercambio de iones entre dos electrolitos o entre una disolución de electrolitos y un complejo.

Interfase: Límite entre dos regiones espaciales ocupadas por materia diferente, o por materia en diferentes estados físicos.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como finalidad estudiar los hidróxidos dobles laminares (HDL) de Mg/Fe/Zn, como medio de adsorción del arseniato (As (V)) presente en el agua. Con el objetivo de que este pueda ser empleado en múltiples casos para la remediación del agua, teniendo un alto impacto en áreas ambientales, de salud pública, etc.

Estos materiales se sintetizaron por el método de precipitación a baja sobresaturación siendo este el más indicado para la obtención de estos materiales de morfología cristalina para los cationes metálicos Mg/Fe/Zn.

Los materiales se caracterizaron por difracción de rayos X (DRX), los cuales mostraron que el material del HDL Mg/Fe/Zn corresponde a una estructura del tipo hidrotalcita, los análisis por transformada de Fourier (FTIR) permitieron identificar el grupo funcional que reacciona en este caso específico con el Fe.

Palabras clave: Hidróxidos dobles laminares, Arseniato, Adsorción, Agua, Intercalación.

ABSTRACT

The purpose of this work was to study the Mg/Fe/Zn lamellar double hydroxides (HDL) as a means of adsorption of arsenate (As (V)) present in water. With the objective that this can be used in multiple cases for water remediation, having a high impact in environmental, public health, etc. areas.

These materials were synthesized by the precipitation method at low supersaturation, being this the most indicated for obtaining these materials of crystalline morphology for the metallic cations Mg/Fe/Zn.

The materials were characterized by X-ray diffraction (XRD), which showed that the HDL Mg/Fe/Zn material corresponds to a hydrotalcite type structure, the analysis by Fourier transform (FTIR) allowed to identify the functional group that reacted in this specific case with Fe.

Keywords: Lamellar double hydroxides, Arsenate, Adsorption, Water, Intercalation.

1. INTRODUCCIÓN

La disposición de aguas residuales altamente contaminadas ha aumentado durante las últimas décadas esto debido a ciertas acciones como el descontrol de la urbanización, la industrialización y las prácticas agrícolas principalmente [1, 2].

Los contaminantes que se generan en el efluente se pueden clasificar en contaminantes orgánicos e inorgánicos que tienen un rango diferente de niveles tóxicos entre sí. Los métodos biológicos, físicos y químicos son ampliamente utilizados en el tratamiento de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Pero estos métodos no son del todo adecuados ni fáciles de aplicar para el segundo contaminante inorgánico como los metales pesados, esto dado por sus cualidades como solubilidad, oxidación-reducción, características y formación compleja, por lo que la descomposición de metales pesados juega un papel importante en la preocupación a nivel salud al estar ya presentes en las aguas de consumo humano [3].

Un metal pesado se considera que es aquel elemento que tiene el peso atómico entre 63,5 y 200,6 y en específico una gravedad superior a 5 indica que el elemento es un metal pesado [4].

Este tipo de elementos aparecen como algo natural, ya que este elemento se encuentra en el medio ambiente ya presente. La palabra metal pesado se refiere al elemento que tiene una mayor densidad y aun así sigue siendo tóxico incluso a baja concentración. En los últimos años, los metales pesados en las aguas residuales son un gran problema en el medio ambiente, por el alto riesgo que está asociado a los ecosistemas y salud humana incluso en concentraciones muy bajas. Debido a sus características como lo es su flexibilidad, acumulación, no biodegradable y resistencia, la contaminación por metales pesados es una carga ambiental importante y de preocupación que aumenta día a día [5, 6].

Las industrias como industrias del papel, pesticidas, curtidurías, industrias de revestimiento de metales, minería operaciones, etc., descargan metales pesados en los efluentes que se encuentran en los alrededores, lo cual es tóxico o dañino para la fisiología humana y otros sistemas biológicos.

Los metales tóxicos pueden permanecer en forma química o forma mixta, por lo que es difícil de eliminar de las aguas residuales [7].

Si bien es cierto los metales pesados crean componentes esenciales que son requeridos por los seres vivos en definitivas entidades para actividades metabólicas, también pueden causar toxicidad incurable a la salud humana en mayores cantidades [8].

En el caso del Arsénico, sabemos que es un metaloide que está muy presente en el medio ambiente y por lo cual ha sido demasiado notorio sus compuestos tóxicos, gracias a esto la contaminación del agua potable por este elemento es un gran problema de salud pública [9, 10, 11].

La eliminación por medio de la adsorción para la eliminación de Arsénico del agua es muy adecuada ya que es eficiente y económicamente factible, no requiere adición química y es económicamente factible, es muy utilizada en países en desarrollo los cuales no cuentan con personal calificado [12].

Se sabe que el arsénico es adsorbido por varios tipos de materiales, entre los que se puede encontrar la alúmina, óxidos metálicos, carbón activado, materias primas agrícolas y por su puesto los hidróxidos dobles laminares [13].

La hidrotalcita y los compuestos similares a la hidrotalcita se denominan colectivamente hidróxidos dobles en capas (HDL). Los HDL están compuestos por dos o más elementos metálicos y tienen una estructura cristalina en capas. Comúnmente, las HDL se pueden representar mediante la fórmula: $[M^{II}_{1-x}M^{III}_x(OH)_2][A^{n-}]_{x/n} \cdot mH_2O$, donde M^{II} y M^{III} representan cationes metálicos divalentes y trivalentes, respectivamente, y A^{n-} es el anión de n carga [14].

Hoy en día, las LDH tienen abundantes aplicaciones, especialmente para la adsorción eficiente. Debido a la capacidad única de intercambio de aniones, las HDL se han aplicado para eliminar aniones como el Cr(VI) [15].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Metales pesados:

Una de las maneras de referirnos a metales pesados es referida al peso atómico y esto definiría a un metal pesado como un elemento químico, otra manera se refiere a los metales es por su densidad entre 4 g/cm^3 hasta 7 g/cm^3 se encuentra otra clasificación referida al número atómico. En ocasiones se ha incluido al hablar de contaminación por metales pesados a los elementos que son ligeros como lo son el aluminio (Al), berilio (Be) y hasta el semimetal como arsénico (As).

2.2. Metales pesados en el ambiente:

Se sabe que los metales pesados se encuentran de manera natural en el medio ambiente, pero también existen de manera antropogénica y se llegan a movilizar en matrices de agua, suelo y aire. Los metales pesados son contaminantes resistentes ya que no pueden ser degradados ya sea de manera biológica ni antropogénica mente.

Los efectos tóxicos dependen del metal, la concentración y en algunos otros casos en la edad de la población expuesta a los mismos, en algunos estudios en que se evalúan la contaminación en alimentos de metales pesados han encontrado el cadmio, mercurio, plomo y arsénico, estos cuatro elementos tienen un impacto a la salud y su concentración debe de ser monitoreada.

2.3. Adsorción:

Es aquel fenómeno físico en el cual los componentes que hay en una mezcla ya sea gaseosa o líquida se transfieren de una manera selectiva a la superficie de algún sólido, esta es una de las maneras en que se puede separar las mezclas. La sustancia que se llega a concentrar en la superficie del algún sólido se le llama adsorbato y la fase en la que se absorbe es denominada adsorbente.

Para que se logre una mejor adsorción, la superficie debe tener una porosidad, ya que esto nos va a generar una mayor área superficial (Figura 1) en la cual nos muestra los medios de captación y almacenamiento que posee el adsorbente.

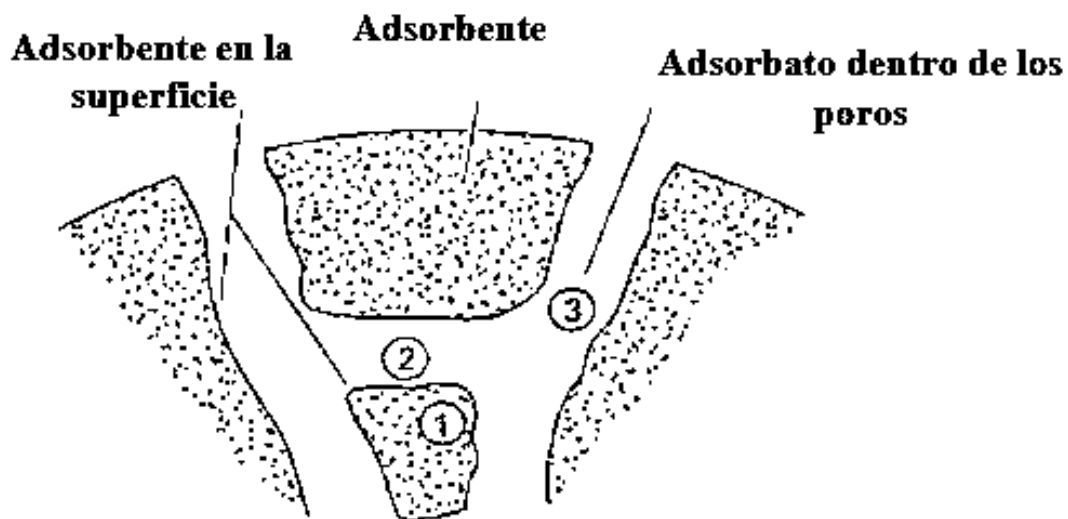


Figura 1: Características de un adsorbente.

2.4. Adsorción física:

Es cuando las fuerzas de atracción son de Van der Waals, en las cuales se lleva a cabo una fisisorción sobre la superficie del sólido, esto dando como resultado interacciones moleculares débiles entre el líquido y el sólido.

2.5. Adsorción química:

Este tipo de adsorción tiene lugar cuando se forman enlaces químicos entre las moléculas de la superficie y las del fluido. Las características de esta es que tienen lugar a temperaturas altas, son lentas e irreversibles [16].

2.6. Equilibrio de adsorción:

La forma habitual de representar el equilibrio de adsorción es mediante una relación entre la cantidad adsorbida y la presión, en caso de los gases, la concentración en la fase líquida lo que corresponde a adsorción de los líquidos, para una temperatura dada, esta relación se le conoce como isoterma de adsorción.

Estas isothermas de adsorción fueron clasificadas por Brunauer atendiendo a seis tipos (Figura 2) y es la recomendada por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) en la actualidad.

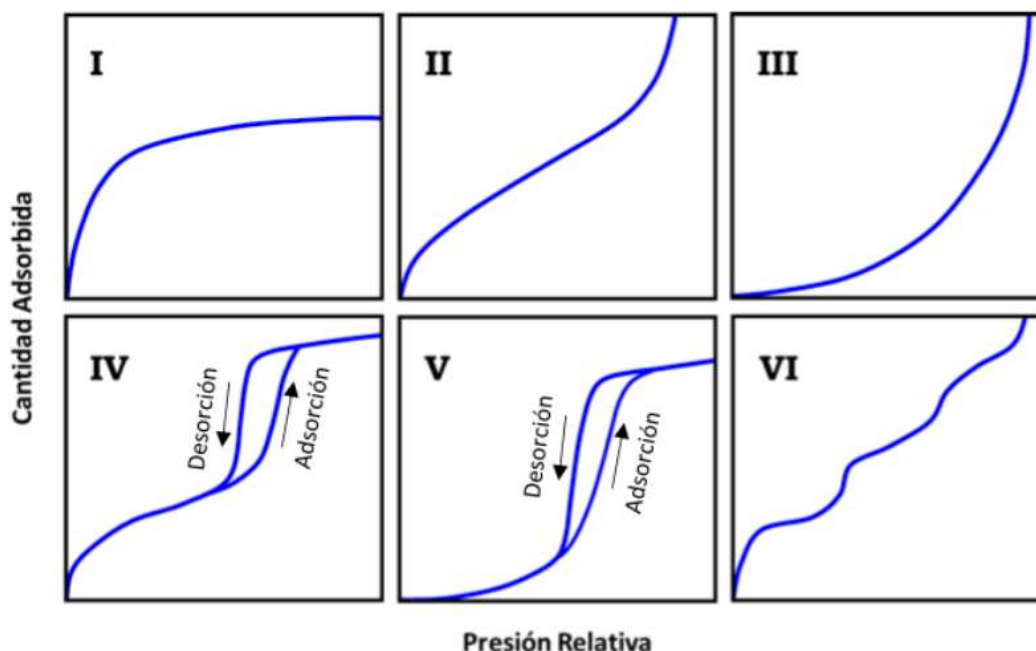


Figura 2: Tipos de representativos de isothermas de adsorción.

Fuente: (Sing et al., 1985)

2.7. Hidróxidos dobles laminares:

Los adsorbentes naturales como el carbón, las zeolitas, la arcilla y la madera se han utilizado en la eliminación de cationes, colorantes y compuestos orgánicos de las aguas residuales [17].

Las arcillas naturales son adsorbentes atractivos de bajo costo y abundantes en la tierra, con área de superficie interna muy alta y porosidad alta. La estructura de la arcilla se compone de numerosas capas tetraédricas y octaédricas de Si, Al, Mg y capas de oxígeno, grupos hidroxilo, respectivamente (Figura 3). Estas capas están separadas por bolsas de espacio entre capas con grupos superficiales colgantes cargados positivamente (exceso de Si, Al o Mg) o negativamente (exceso de oxígeno, hidroxilo)

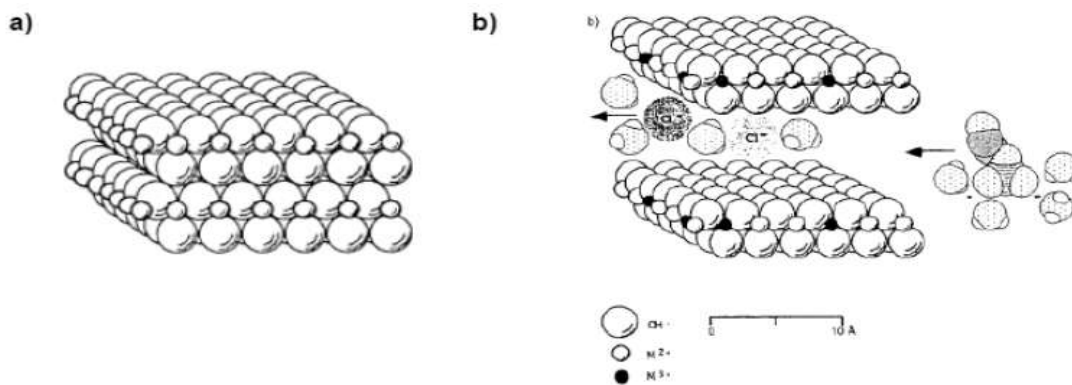


Figura 3: a) Estructura de la brucita (lamina). b) HDL.

Fuente: (Bruna 2010)

El espacio entre capas es primordial para la adsorción de cationes, aniones u otras moléculas no deseadas del agua contaminada (Figura 4). La capacidad de adsorción de la arcilla depende del grado de las cargas en la superficie de la arcilla, así como de los iones que equilibran el exceso de cargas. Las arcillas pueden adsorber una variedad de compuestos tales como pesticidas, herbicidas, patógenos e inorgánicos [18].

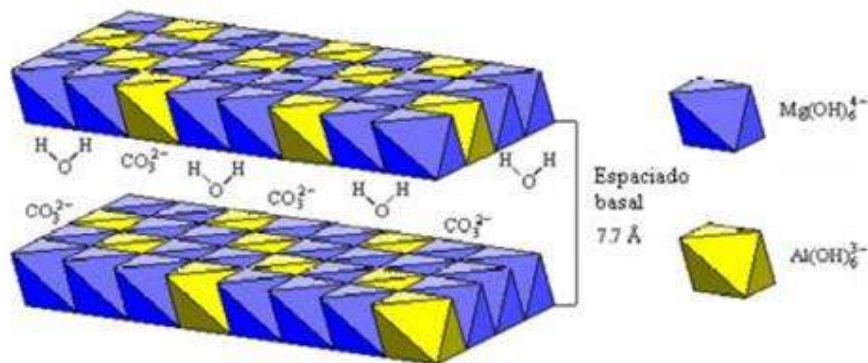


Figura 4: Esquema de la hidrotalcita.

Fuente: (Ocaña, 2005)

Con el estudio de los Hidróxidos dobles laminares y otros adsorbentes, los hidróxidos dobles laminares han sido puestos como los principales candidatos para ser utilizados en la remoción de arsénico, esto gracias a sus grandes capacidades, al obtener un buen rango de adsorción, esto es gracias a su naturaleza hidrófila y a su capa catiónica [19].

2.8. Arsénico:

El arsénico es el vigésimo metaloide natural más alto que se encuentra en la corteza terrestre (número atómico 33), y es comúnmente reconocido por la adversidad en humanos y animales [20].

El arsénico tiene un peso atómico ($74.9 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$), gravedad específica ($5.73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), punto de ebullición y fusión de 614°C y 817°C respectivamente y se presenta como un sólido cristalino duro y quebradizo con un color gris plateado [21].

La apariencia natural o geogénica del arsénico es un problema global con una amplia gama de efectos sobre la salud de los seres humanos y la vida silvestre. El arsénico inorgánico (la especie de las aguas subterráneas) puede causar trastornos de la piel y del sistema nervioso y vascular, así como cáncer porque es peligroso y en realidad no representa ninguna función metabólica beneficiosa [22].

Grandes de las consecuencias de la ingesta del Arsénico, en este caso siendo más específicos en el caso de del arseniato y arsenito los cuales al ser consumidos en concentraciones altas por medio del agua causa una serie de trastornos en la piel, así como cáncer de hígado, colon, pulmón, entre otros tantos órganos internos. [23, 24, 25].

2.9. Especiación de especies de Arsénico:

Gracias a las valencias se sabe las especies del Arsénico inorgánico es dependiente de su estado de óxido – reducción y del valor de pH del agua, en lo general el arsénico se encuentra de forma trivalente como arsenito As (III) presentes esencialmente en aguas subterráneas y por el contrario en su forma As (V) arseniato en aguas superficiales, el arseniato existe en cuatro formas diferentes en soluciones acuosas esto dependiendo del pH de la solución, estos son: H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} y AsO_4^{3-} .

En la (Figura 5) se muestra los diagramas de solubilidad para el Arseniato As (V) en donde las formas anicónicas del Arseniato son mayores a un pH de tres.

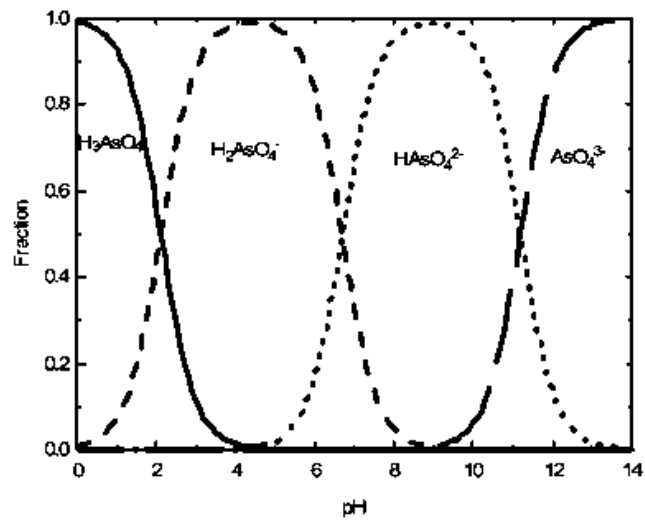


Figura 5: Distribución de especies de hidróxidos de arseniato en función del pH a 25°C.

(M. GALLEGOS-GARCIA ET AL)

3. ANTECEDENTES

En los últimos años se han realizado extensos estudios sobre técnicas de eliminación de arsénico para aumentar la absorción de arsénico del medioambiente. Estos procesos están siendo examinados por los investigadores en experimentos de laboratorio y de campo. Los métodos actualmente en uso son el intercambio iónico, la fitorremediación, adsorción, remediación fitobial, precipitación química, electrocinética métodos y electrocoagulación.

Así mismo algunas otras tecnologías como las utilizadas comercialmente como lo son la aireación, percolación y la sedimentación, tienen problemas ya que no cumplen con un máximo de remoción del Arsénico [26].

Aunque estos procesos son útiles para eliminar el arsénico del suelo y el agua, cada uno la innovación tiene sus inconvenientes importantes, en particular en lo que respecta a costos y eficiencia. Diferentes factores determinar la elección de los tratamientos de arsénico adecuados, incluidas las restricciones para tecnologías de tratamiento de suelos y aguas, locales y nacionales requisitos de las autoridades, la etapa de desarrollo de un país, y estrategias locales para los niveles de arsénico plantas de moda y sistema de agua.

En esta línea, existen diversos avances en todo el mundo. Además, la tasa de aumento de la gestión del suelo y el agua es minimizado mediante el uso de compuestos menos sintéticos y vitalidad, que cabe esperar razonablemente que reduzca los costes [27].

La eliminación de arsénico del agua se puede lograr mediante procesos de tratamiento convencionales, como la precipitación química, el intercambio iónico y la electrocoagulación. [28, 29, 30].

Entre estos posibles procesos de tratamiento, las técnicas de adsorción son ampliamente estudiadas debido a su alta eficiencia de remoción, flexibilidad, bajo costo y facilidad de operación [31].

Recientemente, los procesos de separación por membrana como: ultrafiltración (UF), no filtración (NF) y ósmosis inversa (RO), se han utilizado cada vez más para el tratamiento de arsénico para disminuir la cantidad de aguas residuales producidas [32].

La adsorción de As(V) en minerales de óxido de hierro se ha estudiado utilizando el método extendido ya que este concluye que los complejos de As(V) en forma de esferas internas binucleares bidentadas (Figura 6) son los más favorecidos termodinámicamente y, por tanto, los más abundantes.

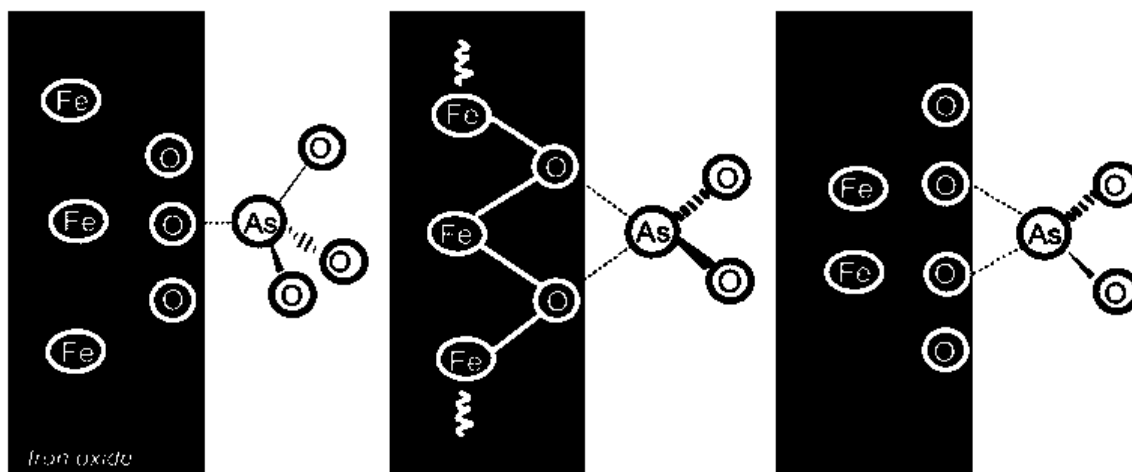


Figura 6: Representación de los complejos de arsénico formados en superficies minerales de óxido de hierro.

Las especies en superficies de óxido de hierro existen algunas contradicciones en cuanto a la formación de complejos mononucleares y monodentados, bidentados, que conducen a As(V), la adsorción en óxidos de hierro no se comprende completamente. La formación del bidentado el complejo binuclear también se ha estudiado mediante espectroscopia FTIR (infrarroja por transformada de Fourier) en muestras secas [33]. Demostró que los complejos de arsénico se formaron a través de grupos hidroxilo en superficies de óxido de hierro.

El mecanismo propuesto consta de dos pasos: formación de un complejo de superficie monodentada en la esfera interna con una alta tasa de adsorción y un lento intercambio de ligandos que conduce a la formación de complejos bidentados de esfera interna [34]. Complejos de esfera interior se definen como enlaces covalentes entre el ion adsorbido y la superficie reactiva del grupo funcional [35].

Es todo un hecho que los minerales de óxido de hierro sean buenos adsorbentes del arsénico, cuando este se encuentra en el agua, además es un método de bajo costo y de alta eficiencia en la eliminación del arsénico.

El mecanismo por el cual las especies de arsénico que se llegan a adsorber en minerales de óxido de hierro en el agua son atribuidas primordialmente a la adsorción química mediante la formación de complejos puente binucleares como lo es $\text{Fe} - \text{O} - \text{AsO}(\text{OH}) - \text{O} -$, así como la atracción electrostática y complejación superficial.

Entre las diferentes especies e óxidos de Fe, la síntesis del material de goethita ha sido la que demostró una mayor capacidad de adsorción de arsénico ya que se puede atribuir esto a que el material presenta una mayor superficie específica, sin embargo, el costo de operación es mayor que muchos otros materiales.

Desde los años 70 la aplicación de los HDL a diferentes niveles como lo es la industrial, ha ido creciendo, sobre todo como catalizadores para las reacciones de hidrogenación. [35].

A diferencia de la gran mayoría de arcillas anicónicas como lo pueden ser los silicatos, los cuales son obtenidas de manera natural, de allí su bajo costo y su accesibilidad, es por esta y otras razones por las cuales han sido sumamente investigados y por ende estos se encuentran en una amplia gama de aplicaciones como la síntesis orgánica, removedores de contaminantes del agua, degradadores de residuos, etc. [36].

Los han sido sumamente utilizados como materiales adsorbentes que tienen en común muchas características, como lo es la superficie específica, es decir su área superficial total y la masa del mismo, lo que daría como buen punto que su relación sea elevada, ya sea como una estructura porosa del material, sus características principales han sido:

- Selectividad: Es la capacidad que tiene de adsorber un componente de una mezcla.
- Capacidad de carga: Es la cantidad adsorbida que se retiene por unidad de masa del adsorbente.
- Compatibilidad: No presenta alteraciones la mezcla en el momento que el material se encuentra removiendo el contaminante.
- Regeneración: Recuperación del material para volver a reutilizarse.

La isoterma de adsorción es la ecuación o curva que, en condición de equilibrio, relaciona la concentración de metal adsorbida en la fase solida con la concentración de metal en solución para una temperatura específica, lo anterior se conoce como el equilibrio de adsorción y es uno de los aspectos más importantes a analizar en la adsorción, pues permite predecir la eficiencia del proceso y optimizar el uso del adsorbente [37, 38, 39].

Tabla 1: Modelos de equilibrio de adsorción.

ISOTERMA	ECUACION	PARAMETROS
Langmuir	$q_e = q_{max}(K_L C_e / (1 + K_L C_e))$	K_L, q_{max}
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	K_F, n
Langmuir - Freundlich	$q_e = q_{max} K_{LF} C_e^{1/nLF} / (1 + K_{LF} C_e^{1/nLF})$	K_{LF}, q_{max}, nLF
Dubinin - Radushkevich	$q_e = q_{max} \exp(-(RT \ln(C_e/C_s) / \beta E_o)^2)$	β, q_{max}
Sips	$q_{max}((K_S C_e)^{1/n_s} / (1 + (K_S C_e)^{1/n_s}))$	n_s, q_{max}, K_s
Temkin	$q_e = (RT/b_T) \ln(A_T C_e)$	b_T, A_T
Redlich - Peterson	$q_e = K_R C_e / (1 + \alpha_R C_e^{\beta_R})$	K_R, α_R, β_R

q_e : concentración en equilibrio de metal en la fase solida (mg/g)

q_{max} : capacidad máxima de adsorción (mg/g)

C_e : concentración en equilibrio de metal en la fase liquida (mg/L)

R : constante universal de gas ideal (J/molK)

T : temperatura absoluta (K)

C_s : solubilidad del soluto para una temperatura determinada

E_o : energía promedio de adsorción por mol de adsorbato (kJ/mol)

La cinética de adsorción se expresa como la velocidad de remoción de soluto que controla el tiempo de residencia del soluto en la interface sólido-solución. En los estudios de adsorción es importante identificar los mecanismos involucrados que pueden incluir difusión externa, difusión interna y reacciones químicas.

ISOTERMA	ECUACION	PARAMETROS DEL MODELO
Pseudo-Primer Orden	$q_t = q_e(1 - \exp(-k_1t))$	q_e, k_1
Pseudo-Segundo Orden	$q_t = q_e^2 k_2 t / (1 + q_e k_2 t)$	q_e, k_2
Elovich	$q_t = (1/\beta) \ln(\alpha\beta) + (1/\beta) \ln t$	α, β
Difusión Intrapar-ticular	$q_t = k_i t^{1/2} + C$	k_i

4. JUSTIFICACIÓN

Se han llevado a cabo intensos esfuerzos de investigación para eliminar la contaminación por arsénico (As) de las aguas residuales o subterráneas, pero se presta poca atención a la contaminación por arsénico en el sistema de agua natural, como ríos o lagos, que son las fuentes importantes para proporcionar suministro de agua potable a millones de personas. personas que viven en diferentes países.

A diferencia del exceso de arsénico en las aguas subterráneas, la concentración elevada de arsénico en las aguas superficiales (como ríos o lagos) fue causada principalmente por actividades antropogénicas, en las que siempre coexisten As(III) y As(V).

Por tales razones el empleo de los HDL tiene gracias a la bibliografía que estos tienen estabilidad bajo las condiciones que se van a utilizar como lo son la estabilidad térmica y cinética.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años ha aumentado la contaminación del agua, especialmente por procesos químicos en actividades industriales que generan vertimientos con altas concentraciones de metales pesados, que en ocasiones superan los valores permisibles de la norma y afectan no solo el recurso hídrico sino también la flora, la fauna y la salud del ser humano.

Los metales pesados son contaminantes tóxicos y algunos son muta génicos, que no pueden ser eliminados química ni biológicamente y además se propagan con mayor velocidad y facilidad debido al medio en el que son descargados.

El arsénico es uno de los metales pesados que se puede encontrar en los vertimientos (agua residual) generados por distintos procesos industriales. Su toxicidad obedece al estado de oxidación y a la concentración en la que se encuentre, siendo el cromo hexavalente el de mayor importancia para su eliminación debida a que es altamente cancerígeno.

Las arcillas aniónicas tienen una estructura cristalina hexagonal y/o octaédrica, por lo que constan de láminas de cationes metálicos cargadas positivamente, donde las superficies de las láminas están ocupadas por grupos hidroxilo, aniones y moléculas de agua. La hidrotalcita es el mineral más representativo entre ellas al igual que en la hidrotalcita, el anión carbonato es el anión que permanece predominante. Los hidróxidos dobles laminares (HDLs) son compuestos sintéticos con estructuras análogas a la hidrotalcita, con lo cual la literatura científica se les conoce también como compuestos tipo hidrotalcita, arcillas aniónicas o arcillas sintéticas. Todos estos HDLs son una de las familias de arcillas que más se llegan a emplear, gracias a su alta capacidad de adsorción, funcionalización, gran estabilidad química y térmica, de síntesis sencilla y económica, con una excelente biocompatibilidad, y por ello, con una gran gama de aplicaciones posibles en diferentes ambientes.

6. HIPÓTESIS

Es posible preparar materiales híbridos a partir de hidróxidos dobles laminares capaces de retener As (V) mediante adsorción. El híbrido obtenido conservará las propiedades físicas y estructurales.

7. OBJETIVO GENERAL

Sintetizar y caracterizar materiales híbridos y evaluar la capacidad que presentan los hidróxidos dobles laminares de Mg/Fe/Zn para remover Arseniato en soluciones acuosas empleando un proceso de adsorción aprovechando la propiedad de intercambio aniónico de estos materiales.

8. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a.** Efectuar la síntesis de los hidróxidos dobles laminares Mg/Fe/Zn de relación molar 3:1:0.4 respectivamente.
- b.** Identificar las propiedades fisicoquímicas de los sólidos mediante técnicas de caracterización como la microscopia electrónica de barrido, difracción de rayos-X, y infrarrojo por transformada de Fourier.
- c.** Determinar a qué modelo de adsorción se ajustan los valores obtenidos en la experimentación.

9.METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La síntesis de los hidróxidos dobles laminares se llevará a cabo mediante el método de precipitación a baja sobresaturación, esto a partir del óxido de magnesio [Mg O], óxido de Hierro [Fe O] y óxido de Zinc [Zn O].

En la siguiente figura se representan los pasos del proceso de la síntesis de los hidróxidos dobles laminares.

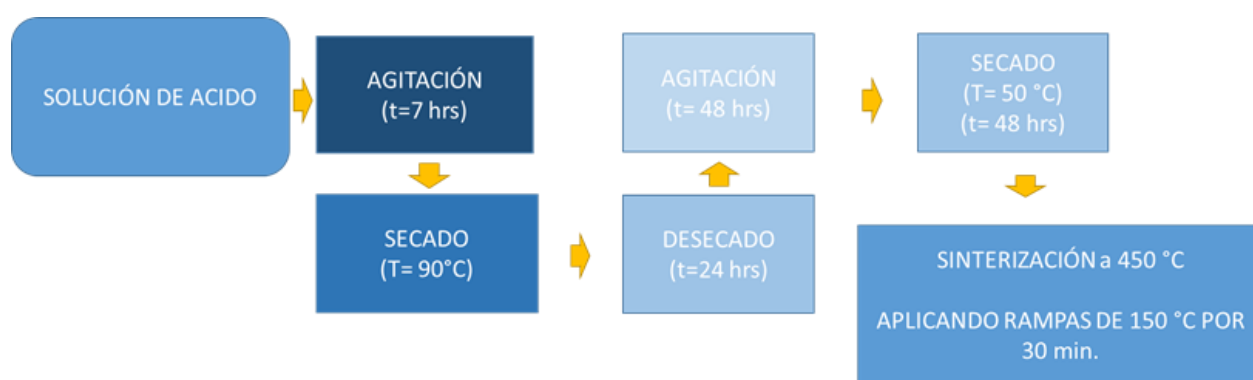


Figura 7: Etapas de síntesis.

9.1. Materiales y reactivos

Tabla 2: Reactivos de síntesis.

Compuesto	Formula	Marca	Pureza
Óxido de Magnesio	MgO	JT. BAKER	98%
Óxido de Hierro	FeO	MEYER	97%
Óxido de Zinc	ZnO	GOLDEN BELL	98%
Hidróxido de sodio	NaOH	JT. BAKER	98 %

9.2. Síntesis de los hidróxidos dobles laminares Mg/Fe/Zn

1. Se preparó una solución 0.1 N de ácido nítrico.
2. Se agregaron 100 ml de la solución previamente preparada, con una relación 2:1M con respecto al óxido, dejando en contacto durante un tiempo de 7 horas.
3. Secar a una temperatura de 90 °C.
4. Desecar durante 24 horas.
5. En una solución 0.1M de NaOH en agitación constante, se agregaron las tres sales anteriormente preparadas, en un medio con argón por un tiempo de 48 horas esto ajustando un pH de 9.
6. Secar a 50 °C durante 48 horas, teniendo el cuidado de tener la mezcla homogénea, preparando relaciones estequiometrias deseadas.
7. Sinterizar a 450 °C, con rampas de 150°C durante 30 minutos en cada una de ellas.

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM).

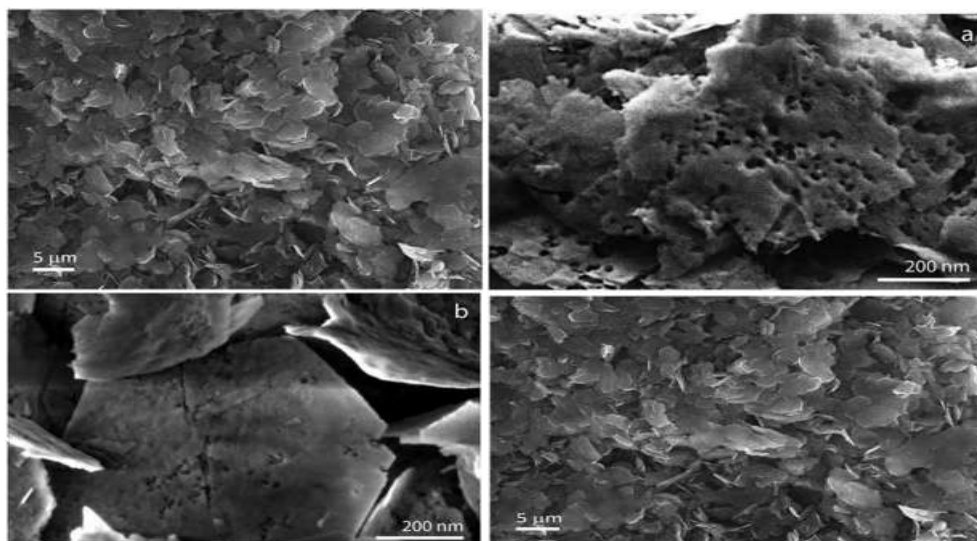


Figura 8: Microscopia electrónica de barrido (SEM) del material HDL Mg/Fe/Zn.

Representa las imágenes de la microscopia electrónica de barrido (SEM) de Mg/Fe/Zn LDH, con (Figura 8) representándolas antes de la adsorción. Como se ve en la figura, el material tiene una forma de lámina, donde su superficie es rígido, rugoso y permeable, desarrollando así una estructura porosa en algunas de estas. Esto es similar a la estructura de las LDH de Mg/Fe/Zn de referencias. No hay cambios significativos en la microestructura del material de cada uno de ellos; sin embargo, el brillo de la superficie del material disminuye significativamente.

10.2. Difracción de Rayos X (DRX).

Se realizaron los análisis de DRX del material HDL antes y después de fijar 200 mg/L de Arseniato. En la (figura 9) se muestra el difractograma obtenido del HDL. El patrón obtenido por difracción de rayos X del material calcinado a 100 °C muestra picos agudos y altos en intensidad a valores bajos de 2θ y menos intensos y más abiertos a altos valores de 2θ . En el difractograma obtenido, se puede apreciar una señal con gran cantidad de ruido, esto es debido a la fluorescencia del Fe causada por la radiación de la lámpara de Cu y también a que la muestra presenta una baja cristalinidad por las impurezas de los reactivos empleados. En el proceso de comparación, se analizaron los datos obtenidos experimentalmente con los valores de referencia establecidos por la JCPDS. Esto permite obtener información precisa y confiable sobre la estructura cristalina de la muestra. Con los valores de 2θ para los picos más significativos se compara con la tarjeta de referencia para hidrotalcita 22-0700 de la Joint Committee Powder Diffraction Standards (JCPDS). En el difractograma se pueden observar claramente las reflexiones de los planos 003, 006, 009, 015, 018, 010 y 013 que corresponden a un compuesto tipo hidrotalcita con una simetría romboédrica.

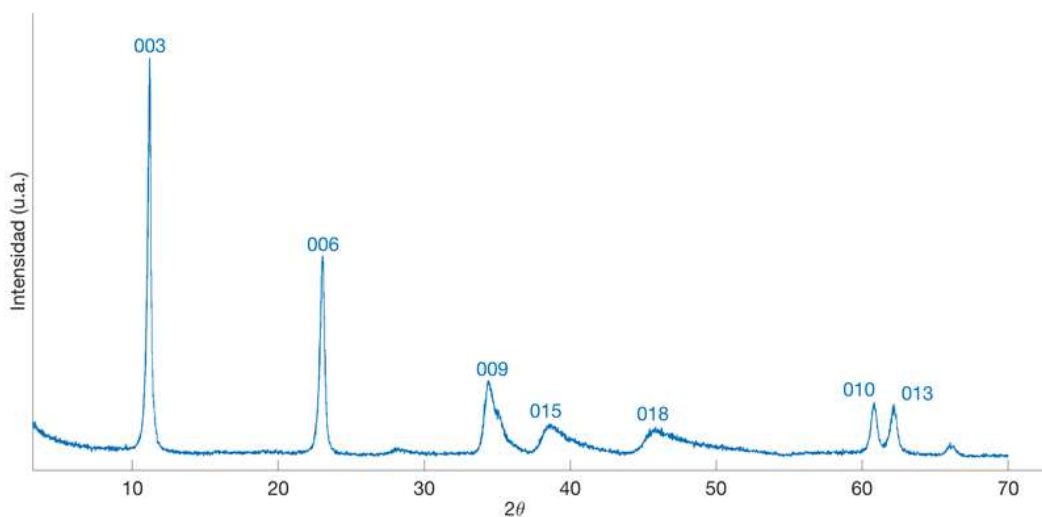


Figura 9: Difracción de rayos X (DRX) del material HDL Mg/Fe/Zn antes de la adsorción de Arseniato.

En la (figura 10) se muestra el difractograma obtenido del HDL después de remover Arseniato. La principal diferencia observada en los resultados es que el pico característico a 45 grados (escala de 2θ) asignado al plano 018 correspondiente a la fase $\text{Fe}_{0.4}\text{Mg}_{0.6}\text{O}$ ha desaparecido por completo. Esta desaparición puede deberse a dos posibles razones: la fase $\text{Fe}_{0.4}\text{Mg}_{0.6}\text{O}$ ha sufrido modificaciones estructurales en presencia de Arseniato, o se ha formado una nueva fase amorfa no identificada anteriormente. Estos hallazgos sugieren la necesidad de realizar más investigaciones para comprender mejor los cambios ocurridos en la fase $\text{Fe}_{0.4}\text{Mg}_{0.6}\text{O}$ y determinar la naturaleza exacta de la nueva fase amorfa.

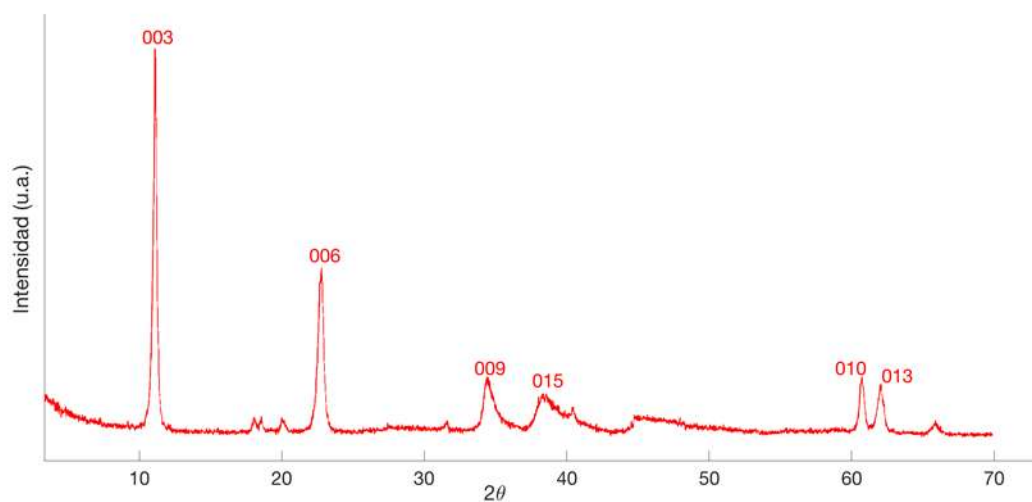


Figura 10: Difracción de rayos X (DRX) HDL Mg/Fe/Zn después de la adsorción de Arseniato.

10.3. Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).

La (Figura 11) provenientes del análisis por FTIR del sólido Mg/Fe/Zn muestran la forma característica de los espectros de los materiales tipo hidrotalcita. Los modelos vibracionales característicos de estiramiento de los grupos funcionales presentes en el HDL pueden alterarse cuando interaccionan con otras especies; por ello, se analizaron por espectroscopia IR los HDL antes y después de la remoción del Arseniato.

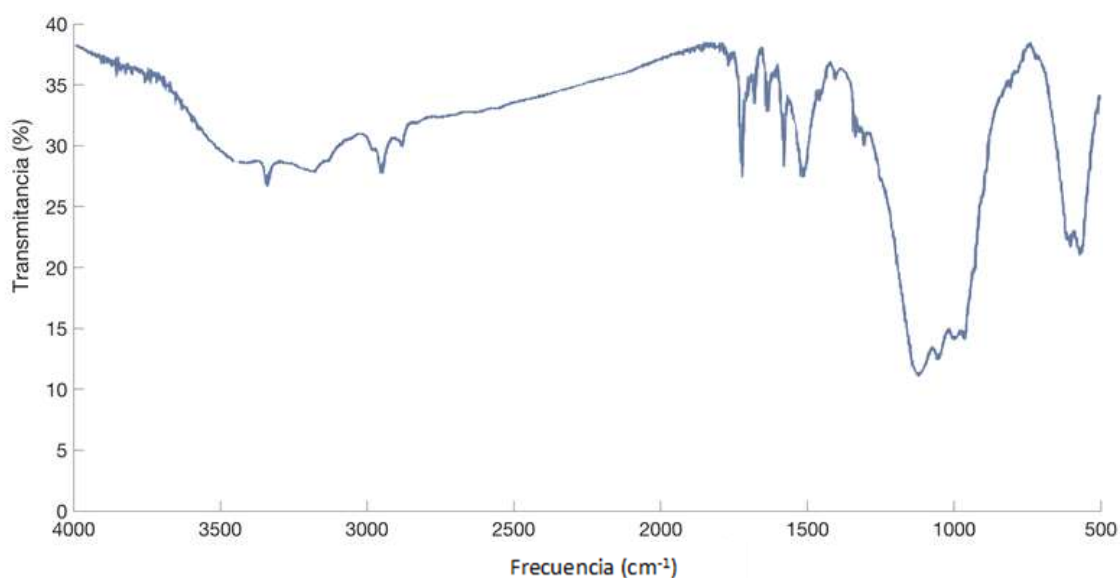


Figura 11: Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) HDL Mg/Fe/Zn antes de la adsorción de Arseniato.

En la (Figura 12) se observa que la intensidad de las bandas en 780 y 480 cm^{-1} (características de las vibraciones del Fe_2O_3) disminuye después de haber expuesto los HDL a la solución con Arseniato, lo cual indica que hubo interacción entre el Arseniato y el hierro del material. Se han reportado en la literatura complejos de esfera interna entre arseniato y oxihidróxidos de hierro a través de enlaces covalentes.

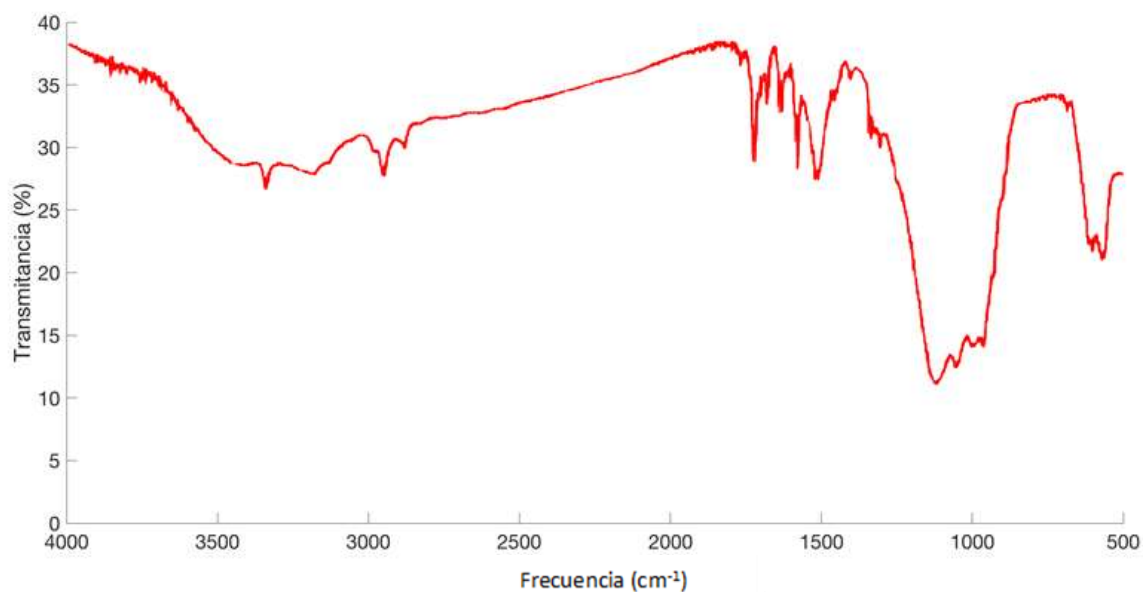


Figura 12: Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) HDL Mg/Fe/Zn después de la adsorción de Arseniato.

10.4. Pruebas de adsorción (Isotermas de Langmuir y Freundlich).

Para el estudio de la cinética de adsorción las pruebas que se realizaron en el HDL de Mg/Fe/Zn, se llevaron a cabo a diferentes concentraciones como la fueron de 0, 0.005, 0.002, 0.0015, 0.001, 0.0005, 0.0004, 0.0003, 0.0002, 0.0001 mg/L que fueron mezclados con 1.75 g del material Mg/Fe/Zn/ como adsorbente en diferentes matraces durante 3 horas a 25°C y en agitación a 120 rpm.

Las concentraciones de Arseniato en las diferentes soluciones se determinaron a través de espectrofotometría ultravioleta basadas en el cambio que tienen de concentración (mg g^{-1}), de acuerdo con la ecuación (1).

Lo descrito antes apoyándonos en la ecuación siguiente:

$$q_e = \frac{v (C_o - C_e)}{m} \quad (\text{Ecuación. 1})$$

Donde:

q_e = Cantidad adsorbida.

v = Volumen de la solución de arsénico utilizada (L).

C_o = Concentración inicial ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

C_e = Concentración final ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

m = Masa del material utilizado (g).

La interacción del material y el contaminante en el equilibrio y la máxima capacidad de adsorción del material se ajustaron a los modelos de Langmuir, ecuación (2), y Freundlich, ecuación (3).

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{Ecuación. 2})$$

$$q_e = K_F C_e^{1/2} \quad (\text{Ecuación.3})$$

Donde:

q_e = es la capacidad de adsorción en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

q_m = es la capacidad de adsorción máxima teórica ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

C_e = es la concentración de As (v) en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

K_L = es la constante de adsorción de equilibrio ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)

K_F = es el indicador de aproximado de la capacidad de adsorción

n = es el factor heterogéneo

Los parámetros para los modelos de las isothermas de adsorción se muestran en la siguiente gráfica.

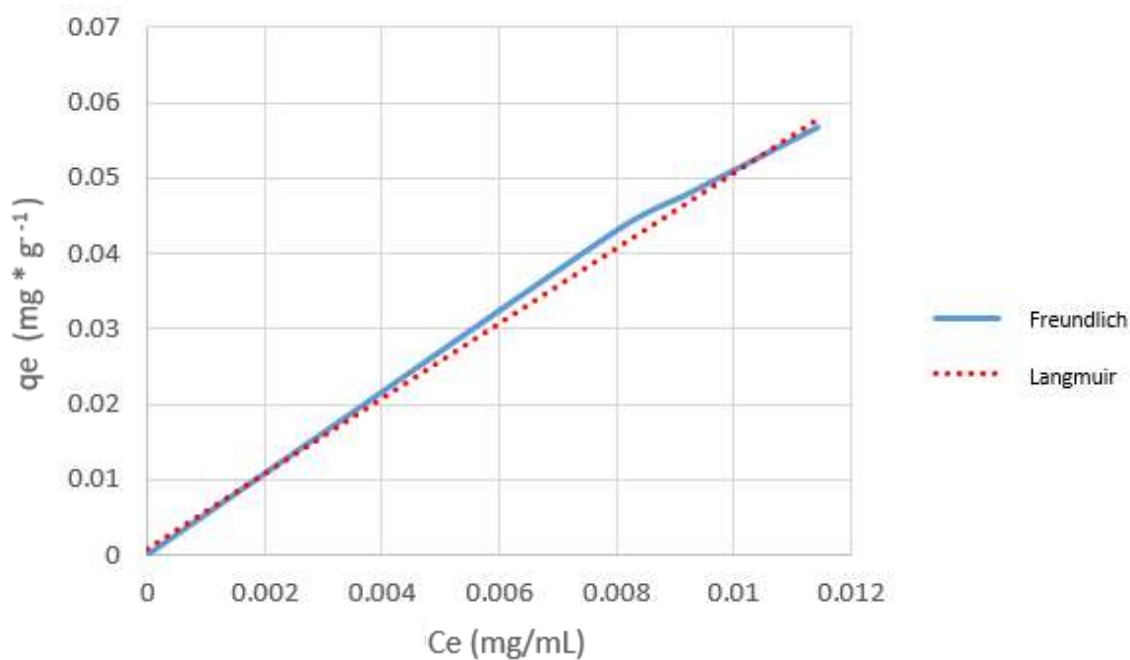


Figura 13: Isothermas de Langmuir y Freundlich.

En la (figura 13) se encuentran los resultados de los parámetros que se obtuvieron de las isotermas de adsorción, que se ajustaron de mejor forma al modelo de Langmuir, correspondiente a la ecuación (2). Con los resultados se comprueba un mejor mecanismo de adsorción, el coeficiente de correlación del modelo de Langmuir es significativo, alcanzando una $R^2 = 0.9961$, teniendo en cuenta tanto los valores de este parámetro (R^2) con la cantidad de Arseniato adsorbido en el equilibrio, específicamente su valor experimental y el dicho por el modelo, es posible definir el proceso de adsorción sigue el modelo cinético de pseudo – segundo orden.

La representación de los datos experimentales de acuerdo a los modelos de adsorción (Figura 13) de acuerdo con el modelo linealizado de la Isoterma de Langmuir, esta muestra una mejor tendencia lineal en altas concentraciones de Arseniato y dado a los resultados de la misma (Tabla 3) lo cual apoya en que tuvo una adsorción en todo momento. Se observa así mismo que el material HDL Mg/Fe/Zn muestran también una buena aproximación a la forma lineal de la ecuación de Freundlich en los primeros puntos.

Para este material HDL Mg/Fe/Zn los aspectos que se pueden discutir como lo es la tendencia lineal es muy pronunciada debido a la cantidad de adsorbente la cual puede ser menor que la cantidad de adsorbato y al mismo tiempo se fortalece la idea de que los iones orgánicos están formando sitios de adsorción específica en los espacios interlaminares y a mayor separación entre estos centros de adsorción mejor es la adsorción producida.

Tabla 3: Parámetros de las isotermas de equilibrio para la adsorción de Arseniato en los HDL de Mg/Fe/Zn.

Adsorbente.	Langmuir		
	q_m (mg * g⁻¹)	K_L	R^2
Mg/Fe/Zn	4.9811	0.0009	0.9961
Adsorbente.	Freundlich		
	K_F	$1/n$	R^2
Mg/Fe/Zn	0.2017	0.0091	0.9834

En la (Figura 14) se muestra el comportamiento de la adsorción a diferentes tiempos, en donde se puede apreciar que en los primeros 40 minutos la adsorción fue mucho mejor, esto atribuido a que la superficie interlaminar se encuentra con grandes espacios y por ende tiene una mayor capacidad de retención, por otra parte, a los 60 minutos de exposición alcanza el equilibrio de adsorción, lo cual es de suma importancia, a partir de los 90 minutos tenemos una mínima adsorción debido a los espacios ya ocupados por el adsorbato.

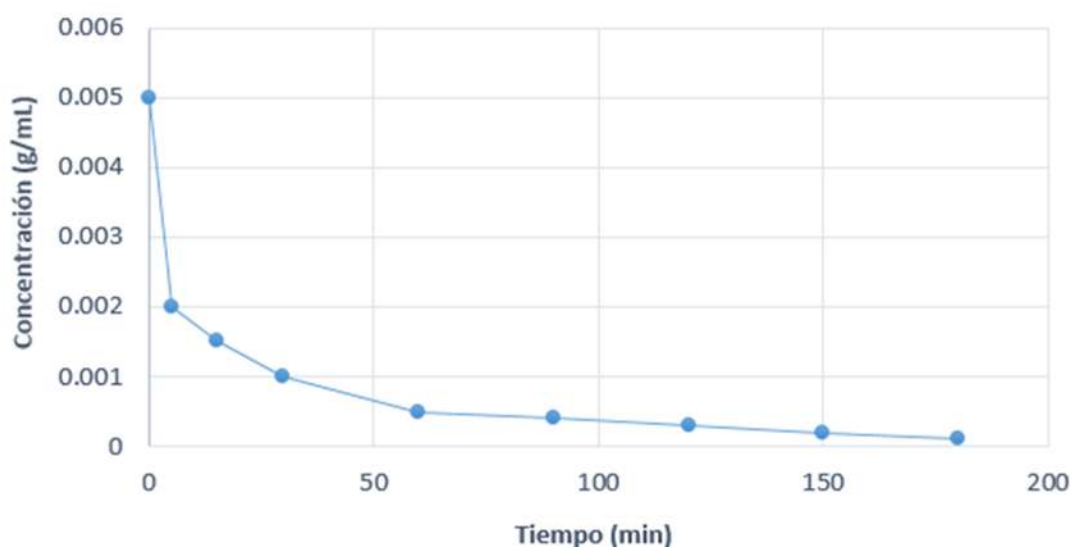


Figura 14: Comportamiento de la concentración de Arseniato en la solución al transcurrir el tiempo de contacto con el material HDL Mg/Fe/Zn.

11. CONCLUSIONES

Al realizar este trabajo podemos decir que y concluir que obtuvimos una serie de resultados que nos permiten afirmar que:

- Se lograron sintetizar materiales de HDL de Mg/Fe/Zn los cuales presentan capacidades como adsorbentes del Arseniato, presentes en el agua.
- El método de síntesis precipitación a abaja sobresaturación permitió obtener un HDL con intercalaciones de ion Arseniato, los cuales nos confirma su presencia con los datos de la difracción de rayos X DRX y el Infrarrojo por transformada de Fourier FTIR.
- Los resultados de acuerdo con las isothermas tuvieron una mejor correlación con la isoterma de Langmuir, con los resultados se comprueba un mejor mecanismo de adsorción, el coeficiente de correlación del modelo de Langmuir es significativo.
- Por el lado económico el proceso de adsorción que se empleó con los materiales de HDL de Mg/Fe/Zn, para la remoción del Arseniato en el agua, presenta una gran ventaja al ser de bajo costo y fácil de sintetizar, además de lo antes mencionado se puede reutilizar.

12. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.

Con la finalidad de poder favorecer trabajos futuros hemos planteado el estudio de las diferentes propiedades que un quedan por determinar, como lo pueden ser:

- Su propiedad ácido – básica, el área específica, el tamaño de la porosidad del material (textura del material).
- Estudiar las propiedades como adsorbentes de otras especies metálicas con características semejantes al Arseniato, variando el anión de intercambio.
- Hacer pruebas con los materiales sintetizados en muestras de agua con diferentes contaminantes (metales pesados) para medir la selectividad de remoción del mismo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.L. Goncalves, J.C.M. Pires, M. Simoes, A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment, *Algal Res.* (2016). doi:10.1016/j.algal.2016.11.008 (Article in press)
- [2] N. Renuka, A. Sood, S.K. Ratha, R. Prasanna, A.S. Ahluwalia, Evaluation of microalgal consortia for treatment of primary treated sewage effluent and biomass production, *J. Appl. Phycol.* 25 (2013) 1529–1537.
- [3] J. Lee, B. Dhar, Bio-processing of solid wastes and secondary resources for metal extraction – A review, *Waste Manag.* 32 (2012) 3–18.
- [4] N.K. Srivastava, C.B. Majumder, Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater, *J. Hazard. Mater.* 151 (2008) 1–8.
- [5] F.R. Peligro, I. Pavlovic, R. Rojas, C. Barriga, Removal of heavy metals from simulated wastewater by in situ formation of layered double hydroxides, *Chem. Eng. J.* 306 (2016) 1035–1040.
- [6] N.P. Raval, P.U. Shah, N.K. Shah, Adsorptive removal of nickel(II) ions from aqueous environment: A review, *J. Environ. Manage.* 179 (2016) 1–20.
- [7] W. Han, F. Fu, Z. Cheng, B. Tang, S. Wu, Studies on the optimum conditions using acidwashed zero-valent iron/aluminum mixtures in permeable reactive barriers for the removal of different heavy metal ions from wastewater, *J. Hazard. Mater.* (2016) 437–446.
- [8] P. Koedrith, H.L. Kim, J. Il Weon, Y.R. Seo, Toxicogenomic approaches for understanding molecular mechanisms of heavy metal mutagenicity and carcinogenicity, *Int. J. Hyg. Environ. Health.* (2013) 216, 587–598.
- [9] Tchounwou, P.B.; Wilson, B.; Ishaque, A. Important Considerations in the Development of Public Health Advisories for Arsenic and Arsenic-Containing Compounds in Drinking Water. *Rev. Environ. Health.* (1999), 14, 211–229.
- [10] Morales, K.H.; Ryan, L.; Kuo, T.L.; Wu, M.M.; Chen, C.J. Risk of Internal Cancers from Arsenic in Drinking Water. *Environ. Health. Perspect.* (2000), 108, 655–661.
- [11] Buchet, J.; Lison, D. Clues and Uncertainties in the Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water. *Food. Chem. Toxicol.* (2000), 38(1 Suppl), S81–85.
- [12] Chetia, M.; Goswamee, R.; Banerjee, S.; Chatterjee, S.; Singh, L.; Srivastava, R.; Sarma, H. (2012) Arsenic removal from water using calcined Mg–Al layered double hydroxide. *Clean. Technol. Environ. Policy*, 14(1): 21–27.
- [13] F. Zhang et al. Mechano-hydrothermal preparation of Li-Al-OH layered double hydroxides *Solid State Sci.* (2018).

- [14] X. Yue et al. Simultaneous removal of Cu(II) and Cr(VI) by Mg-Al-Cl layered double hydroxide and mechanism insight. *J. Environ. Sci. China* (2017).
- [15] H. Zhang et al. Highly efficient removal of Cr(VI) from wastewater via adsorption with novel magnetic Fe₃O₄@C@MgAl-layered double-hydroxide. *Chin. Chem. Lett.* (2015).
- [16] María Fernández Béjar, Síntesis de hidróxidos dobles laminares (HDL) y su aplicación a la eliminación de colorantes aniónicos en disolución acuosa, (2016) 9.
- [17] Bhatnagar, A. y Minocha, Adsorbentes convencionales y no convencionales para la eliminación de contaminantes del agua. *Revista india de tecnología química*, (2006) 13, 203-217.
- [18] Savic, I., Stojiljkovic, SISI y Gajic, Aplicación industrial de arcillas y minerales arcillosos. En: *Arcillas y minerales arcillosos: origen geológico, origen geológico, origen geológico, propiedades mecánicas y aplicaciones industriales*, Nova Science Publishres, Nueva York, (2006) 379-402.
- [19] Goh, K.-H.; Lim, T.-T.; Dong, Z. Application of layered double hydroxides for removal of oxyanions: a review. *Water. Res.*, (2008) 42(6–7): 1343-1368.
- [20] Yin, H., Kong, M., Gu, X., Chen, H. Removal of arsenic from water by porous charred granulated attapulgite-supported hydrated iron oxide in batch and column modes. *J. Clean. Prod.* 166, 88e97. (2017).
- [21] Zakhar, R., Derco, J., Cacho, F. An overview of main arsenic removal technologies. *Acta Chim. Slovaca* (2018) 11 (2), 107e113.
- [22] Podgorski, J., Berg, M. Global threat of arsenic in groundwater. (2020) *Science* 368 (6493), 845e850.
- [23] Steinmaus, C.; Moore, L.; Hopenhayn, R.C.; Smith, A.H. Arsenic in Drinking Water and Bladder Cancer. *Cancer. Invest.* (2000), 18, 174–182.
- [24] Ferreccio, C.; Gonzalez, C.; Milosavljevic, V. Lung Cancer and Arsenic Concentrations in Drinking Water in Chile. *Epidemiology* (2000), 11, 673–679.
- [25] Smith, A.H.; Lingas, E.O.; Rahman, M. Contamination of Drinking-Water by Arsenic in Bangladesh: A Public Health Emergency. *Bull. World. Health. Organ.* (2000), 78, 1093–1103.
- [26] Kim, Y., Kim, C., Choi, I., Rengaraj, S., and Yi, J. “Arsenic removal using mesoporous alumina prepared via a templating method.” *Environmental Science and Technology*, (2004) 38, pp. 924–931.
- [27] Sadiya Alka, Shafinaz Shahir, Norahim Ibrahim, Mohammed Jibrin Ndejiko, Dai-Viet N. Fazilah Abd Manan. Arsenic removal technologies and future trends: (2020) A mini review.

- [28] Hering J. G., Katsoyiannis I. A., Theoduloz G. A., et al. Arsenic Removal from Drinking Water: Experiences with Technologies and Constraints in Practice. *J. Environ. Eng.* (2017) 143, 1- 9.
- [29] Nidheesh P. V., Singh T. S. A. Arsenic removal by electrocoagulation process: Recent trends and removal mechanism. *Chemosphere* (2017) 181, 418-432.
- [30] Smith K., Li Z., Chen B., et al. Comparison of sand-based water filters for point-of-use arsenic removal in China. *Chemosphere* (2017) 168, 155-162.
- [31] Yu C., Peltola P., Nystrand M. I., et al. Arsenic removal from contaminated brackish sea water by sorption onto Al hydroxides and Fe phases mobilized by land-use. *Sci. Total Environ.* (2016) 542, 923-934.
- [32] Sánchez J., Butter B., Chavez S., et al. Quaternized hydroxyethyl cellulose ethoxylate and membrane separation techniques for arsenic removal. *Desalin. Water Treat.* (2016) 57, 25161- 25169.
- [33] Sun, X. and Doner, H. E., “An investigation of arsenate and arsenite bonding structures on goethite by FTIR.” *Soil Science*, (1996) 12, pp. 865–872.
- [34] Carabante, I., Grahn, M., Holmgren, A., Kumpiene, A., and Hedlund, J, “Adsorption of As(V) on oxide nanoparticle films studied by in situ ATR-FTIR spectroscopy.” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, (2009) 346, pp. 106–113.
- [35] Manning, B. A., Fendorf, S. E., and Goldberg, S. “Surface structure and stability of arsenic(III) on goethite: spectroscopic evidence for inner-sphere complexes.” *Environmental Science and Technology*, (1998) 32, pp. 2383–2388.
- [36] S. Malamis and E. Katsou, “A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process param kinetics and isotherms”. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 252-253, pp. (2013) 428-46eters, 1.
- [37] S. Ismadji, F. Soetaredjo and A. Ayucitra, *Clay Materials for Environmental Remediation*. Londres: Springer Cham, (2015).
- [38] Hao L., ZhengT., Wang P., et al. Removal of As(III) and As(V) from 450 water using iron doped amino functionalized sawdust: Characterization, adsorptive performance and UF membrane separation. *Chem. Eng. J.* (2016) 292, 163-173.
- [39] S Miyata. Anion exchange properties of hydrotalcite-like compounds. *Clays Clay Miner.*, (1983) 31, 305- 311.

NOMBRE DEL TRABAJO

Adsorción de arseniato en agua empleando Hidróxidos Dobles Laminares

AUTOR

Alexis Calderón Herrera

RECuento DE PALABRAS

7548 Words

RECuento DE CARACTERES

43590 Characters

RECuento DE PÁGINAS

39 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.5MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 30, 2024 11:00 AM CST

FECHA DEL INFORME

Aug 30, 2024 11:01 AM CST

● 43% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 42% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 18% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental.	
Título del trabajo	Adsorción de arseniato en agua empleando Hidróxidos Dobles Laminares	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Alexis Calderón Herrera	1414314k@umich.mx
Director	Roberto Guerra González	roberto.guerra@umich.mx
Codirector	Sayra Lissette Orozco Cerros	sorozcoco@umich.mx
Coordinador del programa	Hugo Luis Chávez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

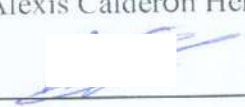
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	no	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante		
Nombre y firma		Alexis Calderón Herrera 
Lugar y fecha		Morelia Michoacán a 04 de septiembre del 2024