



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

**Evaluación de la capacidad adsorbente de bentonita inmovilizada en perlas de
alginato de calcio para arsénico en agua sintética empleando el método de
superficie de respuesta Box Behnken para optimización**

Tesis presentada por:

Huaman Saavedra, Jaime Miguel

ORCID: 0009-0007-1658-3801

para optar por el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor:

Dr. Arenazas Rodríguez, Armando Jacinto

ORCID: 0000-0002-0940-2204

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA AMBIENTAL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 22 de Octubre del 2025

Dictamen: 012927-C-EPIA-2025

Visto el borrador del expediente 012927, presentado por:

2016801751 - HUAMAN SAAVEDRA JAIME MIGUEL

Titulado:

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE BENTONITA INMOVILIZADA EN PERLAS DE
ALGINATO DE CALCIO PARA ARSÉNICO EN AGUA SINTÉTICA EMPLEANDO EL MÉTODO DE
SUPERFICIE DE RESPUESTA BOX BEHNKEN PARA OPTIMIZACIÓN**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



**43238145 - BENEGAS LLANOS ROSARIO CAROLINA
DICTAMINADOR**



**E0085162 - COLINA ANDRADE GILBERTO DE JESUS
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE BENTONITA INMOVILIZADA EN PERLAS DE ALGINATO DE CALCIO PARA ARSÉNICO EN AGUA SINTÉTICA EMPLEANDO EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA BOX BEHNKEN PARA OPTIMIZA

INFORME DE ORIGINALIDAD

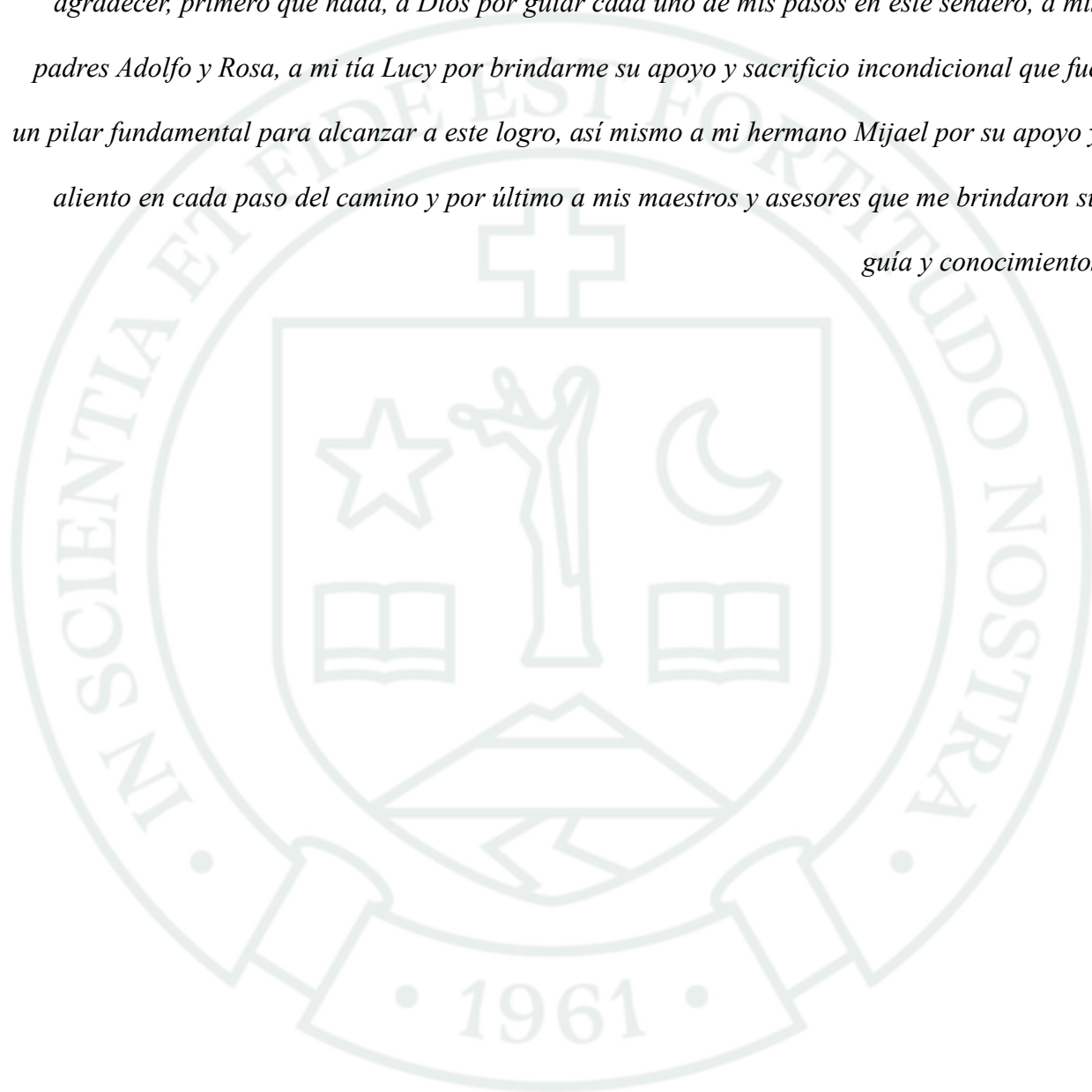
16%	14%	7%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.unaj.edu.pe:8080	1%
	Fuente de Internet	
5	www.coursehero.com	1%
	Fuente de Internet	
6	Submitted to Institute of Technology, Nirma University	<1%
	Trabajo del estudiante	
7	www.revistascca.unam.mx	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	eprints.uanl.mx	<1%
	Fuente de Internet	
10	dspace.esPOCH.edu.ec	
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todas las personas que hicieron posible para mi cumplir esta meta, esta tesis es el resultado de años de dedicación, disciplina y aprendizaje. Por ello me gustaría agradecer, primero que nada, a Dios por guiar cada uno de mis pasos en este sendero, a mis padres Adolfo y Rosa, a mi tía Lucy por brindarme su apoyo y sacrificio incondicional que fue un pilar fundamental para alcanzar a este logro, así mismo a mi hermano Mijael por su apoyo y aliento en cada paso del camino y por último a mis maestros y asesores que me brindaron su guía y conocimientos



AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a Dios y a mi familia por el apoyo incondicional
en cada etapa del proceso.*

*A la Universidad Católica de Santa María por brindar el
financiamiento con fondos internos para el desarrollo del
proyecto “Evaluación y caracterización del
comportamiento de los biocompositos elaborados a base de
alginato de calcio con algas chlorella vulgaris,
scenedesmus y la arcilla activada bentonita frente a la
adsorción del arsénico contaminante natural del río Tambo-
Islay” con Resolución No. 27684-R-2021.*

*A los investigadores del proyecto que me brindaron su
apoyo y guía.*

*A los doctores y compañeros del laboratorio que me
apoyaron brindándome su tiempo y comprensión en el
desarrollo de la investigación.*

RESUMEN

El arsénico es un contaminante presente en aguas naturales que representa un riesgo significativo para la salud pública. El presente trabajo evaluó la capacidad adsorbente de bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio para la remoción de arsénico en agua sintética, empleando la metodología de superficie de respuesta con diseño Box-Behnken para optimizar el proceso de adsorción. Se establecieron como variables independientes la dosis de adsorbente, el tiempo de contacto y la velocidad de agitación, y como variable de respuesta el porcentaje de remoción de arsénico. Según el diseño Box-Behnken, se asignaron como niveles mínimo y máximo 2 y 4 g/L de dosis de adsorbente, 30 y 90 min de tiempo de contacto, y 150 y 250 RPM de velocidad de agitación. Se realizaron 17 ensayos con muestras sintéticas de arsénico a una concentración de 2 ppm, con volúmenes de 30 mL extraídos de una solución madre de 1000 mL. Esta concentración corresponde al doble del límite permitido por la legislación peruana (0,01 mg/L). Como control, la bentonita activada sin inmovilizar alcanzó una remoción máxima de 31,29 %, mientras que las perlas de alginato con bentonita inmovilizada lograron un máximo de 99,94 %, evidenciando una mejora sustancial en la capacidad de remoción. Mediante el análisis en el software Design Expert, se determinó que la velocidad de agitación fue la variable con mayor influencia sobre el porcentaje de remoción. Con base en esto, la optimización se orientó a reducir el tiempo de contacto y la dosis de adsorbente sin afectar la eficiencia, obteniéndose las condiciones óptimas con una dosis de 2 g/L, un tiempo de contacto de 30 min y una velocidad de agitación de 195,5 RPM, alcanzando una remoción máxima de 99,94 %.

Palabras clave: *Bentonita, arsénico, diseño de superficie de respuesta.*

ABSTRACT

Arsenic is a contaminant found in natural waters that poses a significant public health risk. This study evaluated the adsorption capacity of bentonite immobilized in calcium alginate beads for arsenic removal from synthetic water, using response surface methodology with a Box-Behnken design to optimize the adsorption process. Adsorbent dosage, contact time, and agitation speed were established as independent variables, while the percentage of arsenic removal served as the response variable. Based on the Box-Behnken design, the minimum and maximum levels assigned were 2 and 4 g/L for adsorbent dosage, 30 and 90 minutes for contact time, and 150 and 250 RPM for agitation speed. Seventeen trials were conducted using synthetic arsenic samples at a concentration of 2 ppm, with 30 mL volumes taken from a 1000 mL stock solution. This concentration is double the limit permitted by Peruvian legislation (0.01 mg/L). As a control, non-immobilized activated bentonite achieved a maximum removal of 31.29 %, whereas the alginate beads containing immobilized bentonite achieved a maximum of 99.94 %, demonstrating a substantial improvement in removal capacity. Analysis using Design Expert software determined that agitation speed was the variable with the greatest influence on the removal percentage. Consequently, optimization focused on reducing contact time and adsorbent dosage without compromising efficiency; optimal conditions were found to be an adsorbent dosage of 2 g/L, a contact time of 30 minutes, and an agitation speed of 195.5 RPM, achieving a maximum removal of 99.94 %.

Keywords: *Bentonite, arsenic, response surface design.*

INDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Problemática de la Investigación 5

2. Justificación 7

 2.1. Ambiental 7

 2.2. Económica 7

 2.3. Social 8

 2.4. Tecnológica 8

3. Objetivos 9

 3.1. Objetivo General.....9

 3.2. Objetivos Específicos 9

4. Hipótesis 9

CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO

1. Antecedentes de la Investigación..... 11

2. Marco Teórico.....19

 2.1. Contaminación de Cuerpos de Agua por Metales Pesados.....19

 2.1.1. Impacto Ambiental por Arsénico en Agua: Especiación. 22

2.1.2. Impacto en la Salud por Arsénico en Agua.....	23
2.2. Tratamientos Fisicoquímicos Aplicados Para Remover Metales Pesados del Agua	27
2.2.1. Precipitación Electroquímica.....	27
2.2.2. Degradación Foto Catalítica.....	28
2.2.3. Intercambio Iónico.....	28
2.2.4. Adsorción.....	28
2.3. Materiales Adsorbentes Empleados Para la Remoción de Metales Pesados.....	30
2.3.1. Carbón Activado.....	31
2.3.2. Nanotubos de Carbono.....	31
2.3.3. Arcilla.....	31
2.3.3.1. Bentonita.....	32
2.4. Métodos de Determinación de Arsénico.....	33
2.4.1. Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS).....	33
2.4.1.1. Espectroscopia de Absorción Atómica con Generación de Hidruros (HG - AAS).....	34
2.4.1.2. Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito (GFAAS).....	35
2.4.2. ICP Masas.....	36
2.4.3. Método Espectrofotométrico Azul de Molibdeno.....	38
2.5. Diseño de Superficie de Respuesta	44
2.5.1. Diseño Central Compuesto.....	45
2.5.1.1. Puntos Factoriales, Axiales y Centrales.....	45

2.5.1.2. Flexibilidad en el número de niveles.	45
2.5.1.3. Utilidad en experimentación secuencial.	45
2.5.2. Diseño Box Behnken.	46
2.5.2.1. Niveles de Factores.	47
2.5.2.2. Puntos de Diseño.	47
2.5.2.3. Ausencia de Puntos Axiales.	47
2.5.2.4. Implicaciones Para la Zona de Operación Segura.	47
3. Marco Legal.	50
3.1. Normativa Internacional	50
3.2. Normativa Nacional	50
CAPÍTULO III METODOLOGÍA	
1. Tipo y Nivel de Investigación	56
1.1. Enfoque de Investigación	56
1.2. Tipo de Investigación	56
1.3. Nivel de Investigación	56
2. Diseño de la Investigación	56
2.1. Campo de Investigación.	56
2.2. Variables.	57
2.3. Población, Muestra y Muestreo	58
2.4. Materiales y Equipos	58
2.4.1. Material de Laboratorio.	58
2.4.2. Insumos y Reactivos.	59
2.4.3. Equipos e Instrumentos.	59

3. Métodos de Investigación	60
3.1. Acondicionamiento de la Bentonita Para la Evaluación de su Capacidad	
Adsorbente para Arsénico en Agua Sintética	60
3.1.1. Pretratamiento de Bentonita Sódica.	60
3.1.2. Activación de la Bentonita Sódica.	61
3.1.3. Formación de Perlas por Gelificación.....	61
3.2. Caracterización de los Compósitos de Bentonita Inmovilizada en Perlas de	
Alginato de Calcio Mediante la Determinación de su Estructura y	
Composición Química	63
3.2.1. Caracterización por Espectroscopía FTIR.	63
3.3. Determinación de la Capacidad Adsorbente de la Bentonita Inmovilizada	
en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico en Agua Sintética por el Método	
ICP-MS	63
3.3.1. Desarrollo de Corridas Experimentales.	63
3.4. Determinación de las Condiciones Favorables de Adsorción de la	
Bentonita Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico en Agua	
Sintética Empleando el Método de Superficie de Respuesta Box Behnken	66
3.4.1. Determinación de Condiciones Favorables por Análisis Box Behnken.	
.....	66

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

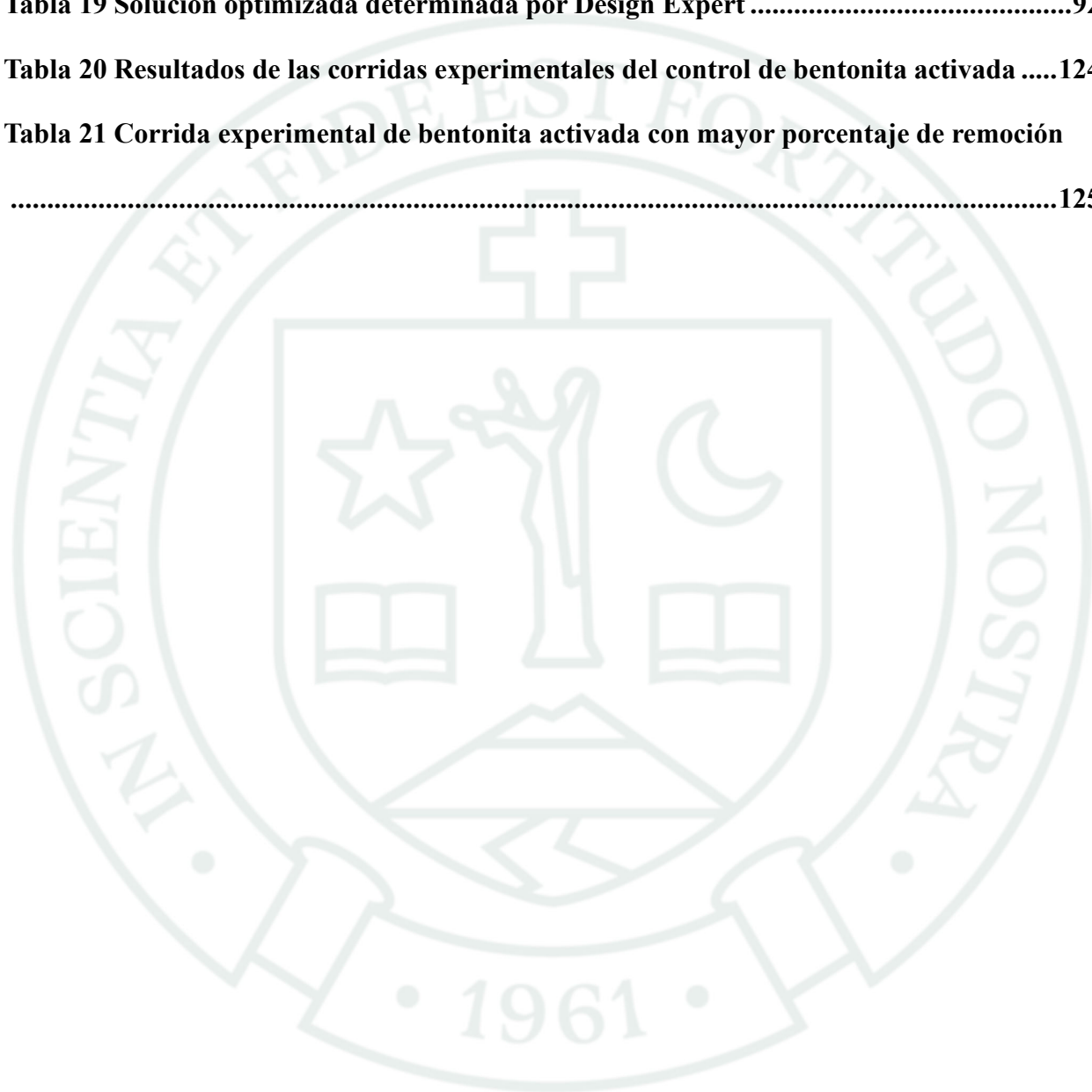
1. Caracterización de la Bentonita Activada y la Bentonita Inmovilizada en Perlas de	
Alginato de Sodio	68
1.1. FTIR de Bentonita Activada con NaCl (2 M)	68

1.1.1. Comparación de Resultados con Otras Investigaciones.....	70
1.2. FTIR de Bentonita Activada Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio	72
1.2.1. Comparación de Resultados con Otras Investigaciones.....	74
2. Evaluación de la Capacidad Adsorbente de la Bentonita Activada Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico	76
2.1. Comparación de Resultados con Otras Investigaciones	79
3. Determinación de las Condiciones Óptimas de Adsorción de la Bentonita Activada Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico	81
3.1. Análisis	81
3.2. Optimización	91
4. Potencial del material adsorbente.....	95
5. Enfoque Ambiental.....	96
CONCLUSIONES.....	97
RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Metales pesados y sus principales fuentes en el Perú.....	20
Tabla 2 Efectos en la Salud Humana por Exposición a Arsénico	23
Tabla 3 Tabla comparativa de métodos de determinación de arsénico	40
Tabla 4 Comparación de características clave entre diseños Box Behnken y Central Compuesto.....	49
Tabla 5 Límites Máximos Permisibles de Arsénico en Agua de Consumo Humano en Perú	52
Tabla 6 Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Arsénico en Agua por Categoría de Uso en Perú.....	53
Tabla 7 Variables e indicadores	57
Tabla 8 Valores mínimos, máximos y medios de las variables	57
Tabla 9 Matriz de diseño experimental	65
Tabla 10 Picos del espectro FTIR de la bentonita activada	68
Tabla 11 Picos del espectro FTIR de la bentonita activada inmovilizada en perlas de alginato	72
Tabla 12 Resultados de las corridas experimentales de la bentonita inmovilizada en perlas de alginato	77
Tabla 13 Corrida experimental de bentonita inmovilizada en perlas de alginato con mayor porcentaje de remoción	78
Tabla 14 Codificación de los valores mínimos y máximos de cada factor establecido en Design Expert	81
Tabla 15 Términos modelo determinados por Design Expert	82

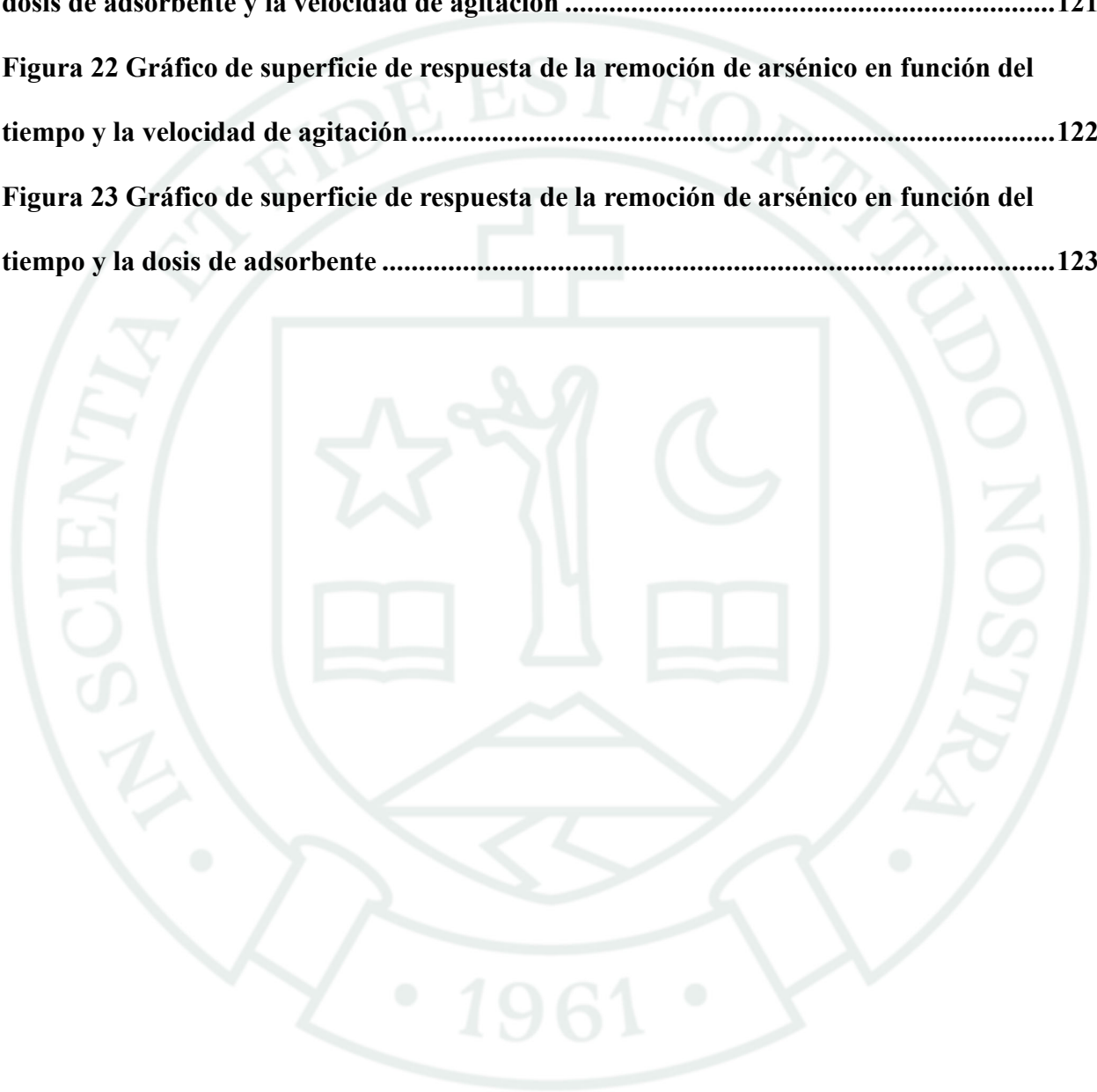
Tabla 16 Resumen del ajuste determinado por Design Expert.....	83
Tabla 17 ANOVA para el modelo cuadrático determinado por Design Expert.....	84
Tabla 18 Restricciones establecidas en Design Expert para optimización	91
Tabla 19 Solución optimizada determinada por Design Expert	92
Tabla 20 Resultados de las corridas experimentales del control de bentonita activada	124
Tabla 21 Corrida experimental de bentonita activada con mayor porcentaje de remoción	
.....	125



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de adsorción de Pb y Cd usando bentonita como adsorbente.....	30
Figura 2 Mecanismo de activación ácida de bentonita	33
Figura 3 Mecanismos de adsorción de la bentonita para el arsénico	75
Figura 4 Grafica normal de residuos.....	86
Figura 5 Grafica de valores predichos vs valores actuales	87
Figura 6 Grafica de perturbación.....	89
Figura 7 Grafica de perturbación después de la optimización	93
Figura 8 Diagrama de flujo de la síntesis de la bentonita inmovilizada en perlas	112
Figura 9 Botella de 1L de peróxido de hidrógeno al 30 % adquirido de Delta Química....	113
Figura 10 Tamiz N°100 empleado para tamizar bentonita	113
Figura 11 Solución estándar de arsénico adquirido de Merck	114
Figura 12 Medición y ajuste de pH de solución de arsénico	114
Figura 13 Bentonita activada almacenada	115
Figura 14 Bentonita purificada seca después de estar en estufa.....	115
Figura 15 Bentonita sódica cruda adquirida de Merck	116
Figura 16 Informe de análisis FTIR de bentonita activada	116
Figura 17 Informe de análisis FTIR de bentonita activada inmovilizada en perlas de alginato	117
Figura 18 Gráfica de contorno 2D de la remoción de arsénico en función de la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación	118
Figura 19 Gráfica de contorno 2D de la remoción de arsénico en función del tiempo y la velocidad de agitación	119

Figura 20 Gráfica de contorno 2D de la remoción de arsénico en función del tiempo y la velocidad de agitación	120
Figura 21 Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función de la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación	121
Figura 22 Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función del tiempo y la velocidad de agitación	122
Figura 23 Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función del tiempo y la dosis de adsorbente	123



INTRODUCCIÓN

El arsénico es un metal pesado que se puede encontrar de forma natural en el ambiente en diferentes estados de oxidación y combinado con otros elementos como oxígeno, cloro y azufre; sin embargo este también se puede encontrar como un material usado para el desarrollo de actividades antropogénicas (PubChem, 2024). La propagación de este metal se da, naturalmente en medios acuáticos como cuencas hídricas debido a la erosión de las rocas y la disolución de los minerales de estas (Baigorria et al., 2021). Por otro lado, las actividades de origen antropogénico lo propagan por medio de desechos industriales, agrícolas, animales y hospitalarios (Mutar & Saleh, 2022). La importancia del arsénico radica en lo que representa para la salud humana y los organismos vivos en general ya que, al contaminar el aire, el suelo y el agua, la exposición a este representa un riesgo importante a considerar (ATSDR, 2015).

El aumento continuo de las concentraciones de arsénico en cuerpos de agua debido a procesos naturales y actividades antropogénicas, si bien representa un serio problema ambiental debido a las propiedades inherentes a este metal pesado, genera una preocupación mayor debido a las graves consecuencias en el mediano y largo plazo tanto en la salud humana como en el ambiente (Yee et al., 2019). Mencionando además que, las consecuencias también se verán reflejadas en las actividades económicas de las poblaciones dependientes de estos cuerpos de agua contaminados, perjudicando a estas poblaciones en aspectos fundamentales de sus vidas (Acarapi-Cartes & Cornejo-Ponce, 2023). Esto ya se pudo observar recientemente en el sur de Perú en Arequipa, cuando el COEN en el año 2021 emitió un reporte de peligro inminente, señalando que debido a la contaminación por arsénico del río Tambo, producto de los desechos mineros, la población de la provincia de Islay se había visto expuesta a este metal pesado (COEN, 2021) y en consecuencia, 3 de cada 4 niños presentan concentraciones elevadas de

arsénico (Pari, 2022). Por lo cual, con el fin de prevenir un daño mucho mayor a las poblaciones que ya se han visto afectadas y otras que se verán afectadas en un futuro de continuar con esta misma situación, se deben evaluar métodos de remediación de cuerpos de agua contaminados con arsénico.

La eliminación del arsénico de cuerpos de agua es un tema que ha llevado al desarrollo de diferentes metodologías a lo largo de los años, como oxidación, coagulación-floculación, tecnologías de membranas, adsorción, entre otros (Nicomel et al., 2016). De los métodos mencionados destaca la adsorción, siendo este un método que utiliza sólidos en un medio acuoso para la eliminación de soluciones gaseosas o líquidas, además de ser un método de bajo costo de operación y alta eficiencia (Baigorria et al., 2020).

La bentonita es un material arcilloso que ha sido considerado apto para la adsorción de arsénico, ello debido a que en su composición tiene un alto porcentaje de montmorillonita, la cual tiene la cualidad de adsorber materiales orgánicos e inorgánicos, además de ello estas propiedades se potencian mediante la activación de la bentonita, lo cual modifica su estructura y composición química permitiendo que pueda retener más moléculas, iones y contaminantes, sin embargo al ser un polvo arcilloso, la bentonita presenta complicaciones al recuperarla del agua, de modo que aumenta la turbidez representando un desafío (Pawar et al., 2020). Por ello, en esta investigación se plantea la inmovilización de la bentonita para que se facilite su recuperación y que también mejore su capacidad para adsorber arsénico, mediante la gelificación con alginato de sodio y cloruro de calcio se forman perlas que permiten esta inmovilización a la vez que brindan otras características como, alta área superficial, alta porosidad, alta afinidad en moléculas cargadas, adaptabilidad a diferentes condiciones experimentales y facilidad para biodegradarse (Cavallaro et al., 2013).

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la evaluación de la capacidad adsorbente de bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio para arsénico en agua sintética.





CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Problemática de la Investigación

El arsénico es un metal pesado cuya concentración a nivel mundial aumento de manera alarmante, representando un problema mundial grave, el origen de este incremento se debe a causas de origen natural y antropogénico, el natural es ocasionado por la disolución del arsénico proveniente de rocas volcánicas, depósitos minerales metálicos, rocas sedimentarias derivadas de zonas mineralizadas, entre otros, todo ello bajo condiciones geoquímicas y geológicas que favorecen la disolución, concentración y movilización del metal contaminante (Sanchez, 2017); Por otro lado, si bien las fuentes naturales tienen un papel en la contaminación de cuerpos de agua, la actividades humanas agravan más la situación, estas pueden ser agricultura, minería, producción de herbicidas, entre otras, que afectan gravemente el medio ambiente (Yee et al., 2019).

El arsénico es un elemento comúnmente llamado metal, este se puede encontrar en la naturaleza en sus distintos sus estados de valencia más comunes como As (III), As (V), As (o) y gas arsina, de los cuales la toxicidad relativa de estos dependerá de aspectos como su estado de valencia, solubilidad, forma inorgánica u orgánica, estado físico, pureza y su tasa de absorción y eliminación (ATSDR, 2023). El arsénico es un contaminante altamente tóxico, el cual ingresa en el organismo al este ser expuesto al contaminante, siendo de las formas más comunes de exposición el consumo de agua de bebida y de alimentos contaminados con arsénico; además de ello, de acuerdo con hallazgos de los últimos años, la exposición prolongada a este contaminante en altas concentraciones tiene graves consecuencias en la salud de las personas, ocasionando lesiones cutáneas, varios tipos de cáncer tanto internos como de piel, entre otras afecciones (Khosravi-Darani et al., 2022). Este metal reacciona con los principales componentes orgánicos de varias enzimas y proteínas distribuidas en todo el cuerpo, ocasionando la desregulación e

inhibición de estas, mencionando mecanismos de acción como la alteración del sistema de reparación del ADN, estrés oxidativo metilado del ADN y genotoxicidad (Kuivenhoven & Mason, 2023), por lo cual, es considerado altamente toxico, cancerígeno, con capacidad de afectar el sistema nervioso, riesgo cardiovascular y otros que conllevan a la muerte, mismo por lo cual, tanto la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la EPA establecieron una máxima concentración en agua potable para arsénico de 0.01 mg/L (U.S. EPA, 2023). El efecto tóxico del arsénico varía dependiendo de su estado de oxidación, de entre sus especies destacando el arsenito (As (III)) y el arseniato (As (V)), como las más nocivas para el ambiente (Dwivedi et al., 2023). Considerando también que, el As (III) es el que tiene una mayor presencia en los cuerpos de agua y su eliminación es más complicada (Buzetzký et al., 2018).

El arsénico al ser un contaminante altamente toxico para la salud humana, ha tenido que ser regulado por diferentes organismos internacionales, siendo así que la OMS la registro como una de las 10 sustancias químicas más preocupantes para la salud pública y así mismo define un valor limite recomendado para la concentración de arsénico en el agua de bebida de 0.01 mg/L (OMS, 2022a); asimismo este valor es adoptado por otras entidades y agencias ambientales como lo es la EPA, la cual en 2001 establece como estándar el mismo valor que la OMS, reemplazando el valor anterior de 0.05 mg/L con el objetivo de proteger la salud pública (U.S. EPA, 2023).

La bentonita es una arcilla que, activada, es un gran material para la adsorción de metales pesados, sin embargo también es un material que posee una gran capacidad de hinchamiento, mismo por lo cual se diluye en agua con facilidad y genera turbidez en la misma al momento de ser usado como un adsorbente de metales pesados presentes en agua (Pawar et al., 2020).

2. Justificación

2.1. Ambiental

Las altas concentraciones de arsénico en los cuerpos de agua representan un problema para poblaciones como las que se encuentran en el valle de Tambo en la provincia de Islay de Arequipa, ya que el arsénico al no poder ser eliminado de forma natural en el ambiente, es absorbido por especies animales y vegetales que se encuentran alrededor y dependen del río que recorre el valle de Tambo, representando un gran perjuicio para el ambiente, señalando que en el año 2019 se reportó en el río Tambo una concentración de arsénico de 0.2034 mg/L (García & Díaz, 2019), superando ampliamente la concentración límite de 0.01 mg/L establecida por organizaciones que velan por la salud y el ambiente como la OMS y la EPA (Environmental Protection Agency) (U.S. EPA, 2023).

2.2. Económica

Si bien la adsorción es un método de remediación de agua ampliamente usado y la bentonita se adapta, por medio de la activación, para tal propósito, los costos que implica todo este método se elevan debido a la dificultad de la recuperación de la bentonita después de la sorción (Pawar et al., 2020). Esta investigación plantea la aplicación de un método el cual inmoviliza la bentonita de modo que esta sea capaz de adsorber arsénico de cuerpos de agua y asimismo que sea fácil de preparar, recolectar y eliminar, siendo así un método que no requiera una alta inversión (Cavallaro et al., 2013). Mencionando también que el método estadístico Box Behnken permitirá optimizar el uso de recursos tanto para la realización de los experimentos, como también para la adsorción de arsénico. Por lo expuesto, el método propuesto en esta investigación permitirá realizar la adsorción de arsénico de cuerpos de agua de forma eficiente y a su vez sea económico de ejecutar.

2.3. Social

La contaminación por arsénico en cuerpos de agua que constituyen el recurso hídrico para consumo humano y el desarrollo de las actividades económicas de la población como la agricultura y ganadería, permiten la ingesta continua de este metal pesado, esto se ha podido observar en la provincia de Islay donde sus pobladores han denunciado aguas contaminadas que los afectan directamente, describiendo esta como agua de coloración amarilla y naranja en tramos del río que atraviesa el valle de Tambo, señalando por medio de informes anteriores a las actividades realizadas por la minera Aruntani como responsables de este problema (Campos, 2024). Este arsénico presente en el agua se absorbe en el organismo y puede almacenarse en órganos internos y tejidos alterando el metabolismo celular y el sistema de reparación del ADN, permitiendo que prolifere el cáncer y otras afecciones que conllevan a la muerte (Kuivenhoven & Mason, 2023).

2.4. Tecnológica

La encapsulación de materiales arcillosos potencian las propiedades y mejoran el comportamiento de estas a través de propiedades sinérgicas que surgen al formarse las perlas otorgando facilidades en la recuperación y reutilización de estos materiales, además de ello existe una gran disponibilidad de materiales idóneos para realizar esta encapsulación, como el alginato de sodio proveniente de algas pardas que en combinación con soluciones con contenido de iones metálicos divalentes como el cloruro de calcio propician una gelificación sencilla y eficaz (Pawar et al., 2020).

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar la capacidad adsorbente de bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio para arsénico en agua sintética empleando el método de superficie de respuesta Box Behnken para optimización.

3.2. Objetivos Específicos

- Acondicionar la bentonita para la evaluación de su capacidad adsorbente para arsénico en agua sintética.
- Caracterizar los compósitos de bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio mediante la determinación de su estructura y composición química.
- Determinar la capacidad adsorbente de la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio para arsénico en agua sintética por el método ICP – MS.
- Determinar las condiciones favorables de adsorción de la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio para arsénico en agua sintética empleando el método de superficie de respuesta Box Behnken.

4. Hipótesis

Dado que la bentonita es empleada como adsorbente para la remoción de metales pesados, es posible que la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio pueda adsorber de manera eficiente el arsénico presente en el agua utilizando muestras sintéticas.

CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO



1. Antecedentes de la Investigación

Los metales pesados son tóxicos para el ambiente, y si bien el principal problema se encuentra en como este se acumula y afecta a los organismos vivos, existen otros aspectos preocupantes como la facilidad que tienen para moverse tanto en medios acuosos como suelos, esto motiva diversas investigaciones que abarcan los distintos metales pesados cuya interacción con el ambiente genera problemas en los ecosistemas, de entre estos se destaca el arsénico como uno de los más tóxicos presentes en el ambiente, mencionado así por Rangel Montoya et al. (2015), quien realizó una investigación del impacto del arsénico en el ambiente y la transformación de este por microorganismos, destacando que el arsenito es el más tóxico de los estados de oxidación en los que puede ser encontrado este metal y por ende en el que más hizo énfasis en su investigación, concluyendo que el estudio de microorganismos con la capacidad de oxidar el arsenito es un área de especial interés para la remediación de medios afectados por este metal, así como también la comprensión del comportamiento del arsénico en el ambiente, para poder desarrollar nuevas tecnologías que puedan ser de utilidad en el proceso de remediación y preservación del ambiente.

El arsénico como un metal altamente tóxico, cuya presencia se extiende por todo el mundo, promueve el desarrollo de investigaciones enfocadas en la aplicación de materiales y tecnologías que sean capaces de remediar medios contaminados con este metal, haciendo énfasis en que estos sean eficientes y selectivos hacia este metal; la arcilla es un material que ha sido ampliamente usado como material adsorbente debido a su bajo costo y alta eficiencia, Dwivedi et al. (2023) emplearon materiales a base de arcilla para remediación de cuerpos de agua contaminados con arsénico, siendo estos materiales hectorita sintética mesoporosa (Zr-hectorita) y arcillas naturales modificadas con circonio (Zr-bentonita), caracterizadas mediante análisis

SEM, XRD, FTIR y un estudio de electrolitos de fondo, obteniendo como resultados capacidades máximas de adsorción de 4.608 y 2.207 mg/g para la Zr-bentonita y Zr-hectorita respectivamente, demostrando que estos son materiales capaces de remover arsénico de cuerpos de agua.

La bentonita es un material arcilloso de bajo costo y ampliamente disponible que es usado en la remediación de diferentes medios debido a propiedades y características como su alta capacidad de intercambio catiónico y su gran superficie específica, que lo debe a su composición de mayoritariamente montmorillonita, esta bentonita si bien es altamente efectiva, puede modificarse para potenciar las propiedades que hacen el material idóneo para adsorber metales pesados, Buzetzky et al. (2018) propuso la remoción de arsenito de agua potable con bentonitas modificadas La (III), Ce (III), Y (III) y Fe (III), las cuales fueron caracterizadas por análisis XRF y XRD, siendo sometidas a pruebas para evaluar la cinética de sorción, tiempo de equilibrio y desorción, mostrando resultados positivos para las bentonitas de La, Ce y Y, siendo negativo en el caso de la bentonita Fe, demostrando que los iones de arsenito pueden ser adsorbidos por las bentonitas modificadas.

La adsorción de arsénico empleando bentonita ha sido objeto de diversas investigaciones, ya que analizar el comportamiento de la bentonita al adsorber arsénico permite que se dé cabida a modificaciones que se puedan hacer a la bentonita, como también nuevos métodos para tratar este contaminante, en la investigación realizada por Barakan et al. (2020), realizaron estudios termodinámicos, cinéticos y de isotermas de equilibrio de la adsorción de arsénico por bentonita modificada por impregnación de Fe (III), realizando pruebas de adsorción se observó que la capacidad adsorbente de la bentonita aumento con la impregnación de Fe (III), los análisis XRD mostraron que las modificadas tenían formas cristalinas y amorfas en su superficie externa,

mientras que las pruebas experimentales mostraron que la capacidad máxima de adsorción fue de 10.06 mg/L y una eficiencia de adsorción del 99 %, lo cual en combinación con los modelos termodinámicos, isothermas y cinéticos, confirmaron que la sorción de arsénico es química y endotérmica.

Para emplear la bentonita como material adsorbente se debe someter a esta a pretratamiento donde se incluye purificación con el objetivo de eliminar impurezas que puedan perjudicar el proceso de adsorción y la reducción del tamaño que dependerá de la fuente de donde se obtenga la bentonita, por lo cual Sellaoui et al. (2018) en la elaboración de sus compósitos de bentonita-alginato para adsorción de iones de Pb (II) y Hg (II), somete estos a un proceso de reducción de tamaño de partícula (de 1 o 2 cm a 0.149 o 0.125 mm) y de purificación con peróxido de hidrogeno al 30 % para eliminar impurezas orgánicas previo a la activación ácida de este material, obteniendo como resultados que el compósito de alginato de bentonita si es capaz de adsorber Pb (II) y Hg (II), siendo mayor la afinidad del adsorbente por el Pb (II).

Emplear materiales arcillosos para remover metales pesados de medios acuosos es una práctica efectiva y de bajo costo, sin embargo, esta puede presentar ciertas complicaciones al momento de recuperar los compósitos, por lo cual se presenta como solución a ello la encapsulación, la cual otorga propiedades ventajosas para la adsorción de contaminantes, Pawar et al. (2020) emplean perlas compuestas de bentonita-alginato para remover iones de cobre y plomo de un ambiente acuático, mediante el uso de alginato de sodio en combinación con cloruro de sodio como agente gelificante para poder formar las perlas, estas fueron caracterizadas y sometidas a experimentos por lotes, resultando en una capacidad máxima de adsorción de 17.30 mg/g y 107.52 mg/g para cobre y plomo respectivamente, además de ello, una prueba de

reutilización que demostró que estas perlas son un material apto para la reutilización, ya que después de ser reutilizado 5 veces solo se redujo en 10 % su capacidad adsorbente.

La inmovilización de materiales para mejorar sus propiedades adsorbentes es una técnica utilizada en el tratamiento de agua contaminada con metales pesados que se posiciona como una técnica que facilita la operación y que cuenta con costos de preparación y operación relativamente bajos, por ello en la investigación desarrollada por Baigorria et al. (2020), desarrollan perlas de hidrogel de alcohol polivinílico ecológico (PVA) y alginato (ALG), siendo el material a inmovilizar bentonita adquirida de la empresa Minarmco S.A., para ello emplean bentonita inmovilizada para remover el arsénico del agua contaminada, por lo cual con el objetivo de hallar la proporción óptima de compuestos en la preparación, prepararon perlas compuestas con diferentes proporciones de PVA y ALG, siendo estas 75/25 y 50/50, estas perlas fueron caracterizadas y sometidas a análisis empleando espectroscopia electrónica de barrido y FTIR para la caracterización, y una prueba de adsorción de arsénico mediante ensayos por lotes; la caracterización del material reveló que las perlas poseen una superficie compacta y una estructura interna porosa y robusta, además de ello, los resultados de los ensayos demostraron que las perlas son capaces de remover más del 90 % del arsénico, siendo la mejor proporción que cumple esto, la conformada por PVA50, ALG50 y Bentonita30 en un periodo de 12 y 48 h, donde alcanzo el equilibrio.

La especiación del arsénico es bastante importante debido a que el arsénico se puede presentarse en formas que pueden llegar a ser más tóxicas que otras, este es el caso del arsenito (As (III)). Por lo cual, buscando lidiar con el problema de salud mundial generado por la contaminación de sistemas acuáticos con arsénico, Baigorria et al. (2021) emplearon bentonitas comerciales pretratadas y modificadas con hierro (III) para eliminar de As (III) del agua,

caracterizando esta bentonita modificada y determinando que la bentonita nacional empleada por los investigadores tiene un alto contenido de hierro, a esta bentonita se le impregno hierro (III) aumentando un 34 % su contenido de hierro y asimismo aumento el espacio entre sus capas, ello debiéndose a que las especies de hierro (III) se encuentran entre las capas intermedias de la bentonita, siendo que este aumento del contenido de hierro aumento la eficiencia de remoción de As (III) en periodos cortos, sin embargo, el rendimiento máximo de su capacidad adsorbente (0.33 mg/g) lo alcanzo después de las 24 h.

La contaminación de metales pesados es un problema de salud mundial que requiere atención debido al gran riesgo a la salud que representa, por lo cual en la investigación de Shabani et al. (2019) se buscó remover arsénico y cobre del agua empleando nanopartículas magnéticas de hierro/bentonita, estas fueron preparadas empleando un método de coprecipitación química y fueron sometidas a diferentes análisis para estudiar la influencia de parámetros como el pH, el tiempo de contacto, la cantidad de adsorbente y la temperatura, en la remoción del arsénico y el cobre del agua, de esto obtuvieron que esta nanobentonita modificada es un buen material para remover metales pesados, teniendo porcentajes de remoción por encima del 90 % en ambos metales, todo ello bajo condiciones óptimas de, dosis de adsorbente, temperatura, tiempo de reacción y pH de 5 g/L, 60C, 120 min y 6 y 4 para cobre y arsénico, respectivamente; estos resultados demostraron que modificar un material adsorbente como la bentonita, con óxidos nano magnéticos como el Fe_3O_4 que tienen antecedentes de ser empleados en la purificación de agua por su comportamiento superparamagnético, área superficial alta, biocompatibilidad y síntesis simple, brindan un nuevo material altamente eficiente en la remoción de cobre y arsénico del agua.

El agua subterránea es de las principales fuentes naturales de contaminación de agua por arsénico, ello se debe a procesos naturales como la meteorización de minerales de sulfuro de arsénico y la disolución de oxihidróxidos que contienen arsénico y óxidos de hierro en condiciones reductoras, por ello en la investigación de Yee et al. (2019) buscaron eliminar el arsenato presente en agua subterránea vía adsorción, para ello emplearon bentonita recubierta con quitosano, bajo los parámetros de concentración inicial de 50.99 µg/L, masa de adsorbente de 0.001 a 2.0 g, temperatura de 298 a 328 K y tiempo de contacto de 1 a 180 min; emplearon quitosano debido a que recientemente se ha visto usarse la combinación de arcillas con quitosano por ser de bajo costo, biodegradable, con gran capacidad adsorbente, resistente al calor y con una buena estabilidad mecánica, comparándolo con otros materiales de arcilla que se producen realizando actividades mineras, el quitosano se posiciona como un recurso renovable que se puede derivar como subproducto de la manufactura de comida marina (mariscos); en la investigación realizada, en condiciones estáticas, se evaluó la capacidad adsorbente de la bentonita recubierta con quitosano para remover arsenato de agua subterránea contaminada, donde empleando principalmente un mecanismo de fisisorción, logrando una remoción máxima del 75.09 % cuando la temperatura alcanzó los 328 K, mientras que en pruebas donde se consideró únicamente el tiempo de contacto, se alcanzó el equilibrio a los 60 min con una remoción del 57.84 %, siendo un caso similar cuando se evaluó el efecto de la masa del adsorbente llegando a un 58.55 % de remoción al emplear 2 g de adsorbente.

Los métodos para cuantificar el arsénico presente en el agua son diversos, dentro de los cuales se pueden mencionar la espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción (ICP-MS), espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado por inducción (ICP-AES), absorción atómica con horno de grafito (GFAAS) y espectrometría de absorción atómica con

generador de hidruros (HGAAS), todos ellos aprobados por la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (USEPA), los cuales si bien cumplen adecuadamente con los parámetros de calidad analítica requeridos para cuantificar el arsénico a niveles trazas, estos son voluminosos y con altos costos de operación y mantenimiento, por lo cual Corral-Escárcega et al. (2024) desarrollaron un método colorimétrico que emplea equipos económicos y sencillos para la cuantificación del arsénico, mediante la generación de un heteropoliácido de color azul son capaces de cuantificar el arsenato, mientras que para cuantificar el arsenito, toman el resultado de la diferencia del arsénico total y el arsenato identificando y cuantificando las especies arsenicales inorgánicas en el agua a concentraciones ultra traza.

La espectrofotometría es una técnica empleada en la experimentación para la detección específica de moléculas, es reconocida por su precisión y alta sensibilidad para distintas moléculas, por lo cual Okazaki et al. (2013) propusieron una adaptación de la técnica para determinar arsénico en agua subterránea que posteriormente será agua potable, esto lo lograron con azul de molibdeno, empleando un filtro de membrana soluble y una columna de CaCO_3 ; la muestra de arsénico se pasó por la columna de CaCO_3 eliminando el fosfato y el arseniato, mientras que el arsenito que no quedó en la columna, se oxidó a arseniato, asimismo este se convirtió en un anión azul de heteropolimolibdeno, el anión se recoge en un filtro de membrana para después disolverse en 2-metoxietanol, finalmente la absorbancia de la solución se midió a 810 nm frente a un blanco de reactivo, aplicando con éxito el método propuesto para aguas subterráneas y demostrando lo versátil y simple del método para su aplicación en monitoreo de agua potable y agua ambiental.

La cantidad de material a emplear y condiciones requeridas para realizar algún proceso de remediación, operación industrial u otro proceso de algún tipo es complicada de determinar, si

no es basándose en los antecedentes que se dispongan sobre el tema o en su defecto por experimentación y basándose en el empirismo, complicándose aún más la situación al querer determinar las condiciones óptimas para ello, por lo cual existen métodos estadísticos que permiten comprender el comportamiento de factores relevantes del proceso y así optimizar el mismo, esto se observa en la investigación realizada por Mutar & Saleh (2022) el cual busco optimizar la adsorción y remoción de iones de arsénico de aguas residuales de hospitales con nano-bentonita, para lo cual tomo como factores operativos a optimizar el pH, la dosis de bentonita, y el tiempo de contacto, determinando que, después de realizar 14 corridas experimentales con 3 puntos centrales, los valores óptimos son 5.5, 100 mg/L y 5 min respectivamente, siendo comprobado experimentalmente el ajuste con la isoterma de Langmuir, concluyendo que la nano-bentonita es un buen adsorbente de arsénico proveniente de aguas residuales de hospitales y asimismo confirmando la efectividad del método de superficie de respuesta para optimización de procesos de remediación.

Observando la efectividad de métodos estadísticos en el diseño de experimentos como la metodología de superficie de respuesta para optimizar distintos procesos, se explora la aplicación de ello en temas de vital importancia como la remoción de metales pesados de soluciones acuosas, por su posible aplicación para remediación de cuerpos de agua contaminados con metales pesados, por ello Yılmaz et al. (2018) optimizó y evaluó el desempeño de la bentonita tiol-funcionalizada como un nuevo adsorbente de arsénico de soluciones acuosas empleando la metodología de superficie de respuesta para tal propósito; considerando como variables más relevantes pH, temperatura, concentración inicial, dosis de adsorbente y tiempo de contacto, realizaron un total de 50 experimentos empleando un tipo diseño de superficie de respuesta denominado diseño central compuesto, en el que incluyeron 42 pruebas y 8 puntos centrales, en

donde evaluaron la influencia de estas variables en la adsorción de arsénico mediante la determinación del porcentaje de arsénico removido, obteniendo como resultado que las variables optimas son 5.98, 42.87 °C, 31.02 mg/L, 0.33 g y 127.48 min respectivamente, comparándose los datos de los modelos isotérmicos lineales con los experimentales se confirmó el ajuste a la isoterma de Langmuir y mediante los estudios termodinámicos se corroboró que la remoción de arsénico fue endotérmica, espontánea y factible.

2. Marco Teórico

2.1. Contaminación de Cuerpos de Agua por Metales Pesados

La contaminación por metales pesados en cuerpos de agua es un problema que supone un peligro que afecta directamente al medio ambiente y a la salud de las personas, esto se debe a las propiedades tóxicas del mismo, la proliferación de estos en el medio se debe a procesos naturales y a actividades antropogénicas que a través de efluentes vertidos en los cuerpos de agua, elevan la concentración de arsénico de estos, los distintos tipos de metales pesados poseen propiedades distintas, pero tienen en común que no son biodegradables, son tóxicos y bioacumulables (Hama Aziz et al., 2023).

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que destacan por tener alta densidad; sin embargo, dentro de este grupo se puede identificar aquellos como el zinc o el manganeso que en bajas dosis son esenciales para funciones orgánicas y por otro lado, están aquellos que en concentraciones mínimas como el plomo o el arsénico, son tóxicos para el ser humano y el ambiente en general, esto es debido a que pueden interferir con funciones biológicas esenciales, acumulándose y persistiendo en el tiempo por largos periodos (AGQ Labs Perú, 2025).

Tabla 1*Metales pesados y sus principales fuentes en el Perú*

Metal Pesado	Toxicidad/Relevancia	Principales Fuentes	
		Naturales	Antropogénicas en Perú
Arsénico (As)	Inorgánico (muy tóxico, carcinógeno),	Aguas subterráneas, minerales, volcanes, procesos geotérmicos, erosión de depósitos minerales.	Minería, industrias (aleaciones, pesticidas, entre otros), agricultura (pesticidas), aguas residuales domésticas.
	Orgánico (menos tóxico)		Minería, industrias (pinturas, baterías, entre otros), agricultura
Plomo (Pb)	Tóxico, se acumula en el organismo	Erosión de rocas y suelos.	agricultura (fertilizantes, plaguicidas), desechos domésticos.

		Minería aurífera,
Mercurio (Hg)	Tóxico, se biomagnifica en cadenas alimentarias.	industrias (pinturas, electrónica), desechos domésticos.
		Volcanes, erosión de rocas.
Cadmio (Cd)	Muy tóxico, subproducto de minería de Zn, Cu y Pb.	Minería, industrias (metalmecánica, pinturas, baterías, electrónica), agricultura (fertilizantes, lodos residuales), desechos domésticos.
		Se encuentra como impureza de minerales de zinc, cobre y plomo.
Cobre (Cu)	Esencial en bajas dosis, tóxico en altas.	Minería, industrias (metalmecánica, electrónica), agricultura (plaguicidas).
		Se encuentra como mineral.
Cromo (Cr)	El cromo hexavalente es carcinógeno	Industrias (curtiembres y metalmecánica).
		Se encuentra como mineral.

Hierro (Fe)	Esencial en bajas dosis, tóxico en altas.	Se encuentra como mineral.	Minería.
Manganeso (Mn)	Esencial en bajas, tóxico en altas.	Se encuentra como mineral.	Minería.
Aluminio (Al)	Tóxico en altas dosis.	Se encuentra como mineral.	Minería, industrias (aditivos en alimentos procesados).
Zinc (Zn)	Esencial en bajas dosis, tóxico en altas.	Se encuentra como mineral.	Minería, industrias (metalmecánica).

2.1.1. Impacto Ambiental por Arsénico en Agua: Especiación. El arsénico es un metal pesado que puede encontrarse en la naturaleza en forma orgánica e inorgánica y también es considerado de los más tóxicos y cancerígenos al referirse a contaminantes del agua (Song et al., 2019). Este metal puede provenir de fuentes como depósitos naturales o por actividades antropogénicas como la minería, combustión de combustibles fósiles, eliminación de desechos químicos, uso de pesticidas de arsénico, entre otras (Miljkovic et al., 2019). Debido a que el agua contaminada con arsénico ingresa en el agua potable y los suelos, la principal vía de exposición de la población a este contaminante es por medio de la ingesta de alimentos contaminados (Raza et al., 2023). La elevada exposición al arsénico puede causar serias enfermedades que pueden derivar en la muerte como, cáncer, diabetes, enfermedades mutagénicas, respiratorias y cardiovasculares, así como también problemas reproductivos y de desarrollo (Yilmaz et al., 2018). El arsénico se puede encontrar en distintas especies orgánicas e inorgánicas, las cuales son

más tóxicas dependiendo de cuál sea, siendo las especies inorgánicas arsenito (As (III)) y arseniato (As (V)) las más tóxicas, destacando que el arsenito es el más tóxico de los dos, esto se debe a que el arsenito presenta mayor movilidad en ambientes reductores, por lo que se dispersa fácilmente en el agua subterránea, el arsénico se puede bioacumular en las especies acuáticas irrumpiendo en la cadena trófica ocasionando que los depredadores que dependan de estas especies se intoxiquen con arsénico, como el caso de los humanos que ingieren a estas especies o dependen del agua contaminada; la especiación del arsénico tiene un impacto ambiental significativo, ya que presenta diferencias en sus especies en la toxicidad, movilidad y bioacumulación (Rangel Montoya et al., 2015).

2.1.2. Impacto en la Salud por Arsénico en Agua. De las principales fuentes naturales de arsénico que contaminan el agua, la que es considerada como la principal amenaza para la salud pública, es la proveniente de aguas subterráneas contaminadas, ya que a partir de aquí es que el agua contaminada se distribuye de forma que puede ser ingerido por las personas. Al presentarse una intoxicación aguda por arsénico se pueden presentar síntomas inmediatos y severos, estos pueden ser vómitos, dolor abdominal intenso, diarrea, disfagia y sed, así como también síntomas que se presentan después como entumecimiento y hormigueo en extremidades, calambres, afecciones cardíacas y en casos más extremos, la muerte (OMS, 2022b). Mientras que una exposición prolongada en dosis peligrosas pero no letales que puede darse a través del consumo de agua o alimentos contaminados, puede ocasionar riesgo carcinogénico, manifestaciones dermatológicas, problemas cardiovasculares, renales, hepáticos, endocrinos, reproductivos, hematológicos y gastrointestinales (MINSA, 2022).

Tabla 2

Efectos en la Salud Humana por Exposición a Arsénico

Tipo de exposición	Sistema afectado	Síntomas/Efectos
Aguda	Gastrointestinal	Vómitos, dolor abdominal severo, diarrea, disfagia y sed.
	Neurológico	Entumecimiento y hormigueo en extremidades y calambres musculares, neuritis, neuropatía, parálisis, temblores y trastornos de conciencia.
	Cardiovascular	Arritmias, hipotensión, insuficiencia cardíaca congestiva y pulso irregular.
	Dérmico	Dermatitis, melanosis, vesículas y líneas de Mees.
	Respiratorio	Edema pulmonar, irritación de mucosas, neumonía bronquial, perforación del tabique nasal y traqueo bronquitis.
	Renal	Hematuria, oliguria, proteinuria, leucocituria, glucosuria, uremia y

		necrosis tubular
		aguda/cortical.
		Anemia, coagulación
		intravascular diseminada,
	Hematológico	leucopenia, supresión de
		médula ósea y
		trombocitopenia.
		Cambios de pigmentación
		(melanosis,
		hipo/hipercromía), lesiones
		cutáneas, hiperqueratosis
		(palmas/plantas),
		queratodermia difusa
		palmoplantar y precursor de
		cáncer de piel.
		Cáncer de piel, cáncer de
		vejiga y cáncer de pulmón.
		Polineuritis, parálisis
		motora distal, déficits
		cognitivos, problemas de
		aprendizaje, migraña,
		neuropatía autonómica y
Crónica	Dérmico	
	Carcinogénico	
	Neurológico	

	enfermedades
	neurodegenerativas.
	Enfermedades
	cardiovasculares, infartos
Cardiovascular	de miocardio, hipertensión,
	aterosclerosis en carótidas,
	cardiopatía isquémica y
	gangrena en pie.
Renal	Daño renal y tubulopatías.
	Hígados crecidos/sensibles,
	elevación de enzimas
Hepático	hepáticas, cirrosis,
	degeneración grasa e
	hipertensión portal.
Endocrino	Diabetes mellitus.
	Desenlaces adversos del
	embarazo, mortalidad
	infantil, efectos nocivos
Reproductivo/Desarrollo	desde la concepción y
	problemas de desarrollo en
	niños.
	Abatimiento de médula
Hematológico	ósea, pancitopenia,

	leucopenia y
	trombocitopenia.
	Esofagitis, colitis, gastritis,
	mala absorción, malestar
Gastrointestinal	abdominal y pérdida de
	peso.

2.2. Tratamientos Fisicoquímicos Aplicados Para Remover Metales Pesados del Agua

Los metales pesados son altamente contaminantes para el ambiente, llegando a afectar cuerpos de agua, los cuales al entrar en contacto en la cadena trófica representan un peligro a la salud ya que estos tienden a bioacumularse perjudicando la salud humana, generando gran interés en la remoción de estos metales pesados. Por lo cual se han investigado diversas tecnologías para la remoción de estos metales, en las cuales se emplean tratamientos fisicoquímicos como precipitación electroquímica, degradación foto catalítica, intercambio iónico y adsorción (Shabani et al., 2019). De los métodos mencionados, uno de los métodos más eficientes para remoción de metales pesados en ambientes acuosos, es la adsorción, esto se debe a que es económicamente viable, de diseño sencillo, de alta selectividad, con capacidad de reutilización de adsorbentes, permite la separación de diversos contaminantes y es respetuoso con el medio ambiente (Yilmaz et al., 2018).

2.2.1. Precipitación Electroquímica. Este tratamiento se basa en las interacciones entre las reacciones químicas y la electricidad, en la electroquímica se analizan las propiedades de la disolución en la célula electroquímica basándose en las actividades y no en las concentraciones, para tratar metales pesados no requiere agregar algún producto químico, por lo cual se considera

un tratamiento selectiva y eficiente, de este tratamiento derivan técnicas como la electrocoagulación, electrodeposición, electroflotación y electrodiálisis (Ocampo et al., 2023).

2.2.2. Degradación Foto Catalítica. El fundamento de este tratamiento es la formación de especies altamente reactivas y de baja selectividad, por lo cual este tratamiento es ideal para remoción de sustancias que se encuentren en bajas concentraciones, para lo cual este tratamiento usa un fotocatalizador en estado sólido con el objetivo de reducir la energía de activación de una reacción fotoquímica, este fotocatalizador puede producir transformaciones químicas de los reactivos a la par que se regenera tras cada ciclo de interacciones que se desarrollan en la interfase sólido – líquido (Durán-Álvarez et al., 2015).

2.2.3. Intercambio Iónico. En este tratamiento se emplea una determinada resina para captar iones metálicos, estas resinas pueden emplear para su elaboración materiales como extractos de algas marinas, carbón activado, entre otros, las ventajas de aplicar este tratamiento es que la resina es reutilizable, ya que al alcanzar el punto máximo de saturación estas se pueden limpiar para volver a usar (Comisión Europea, 2005).

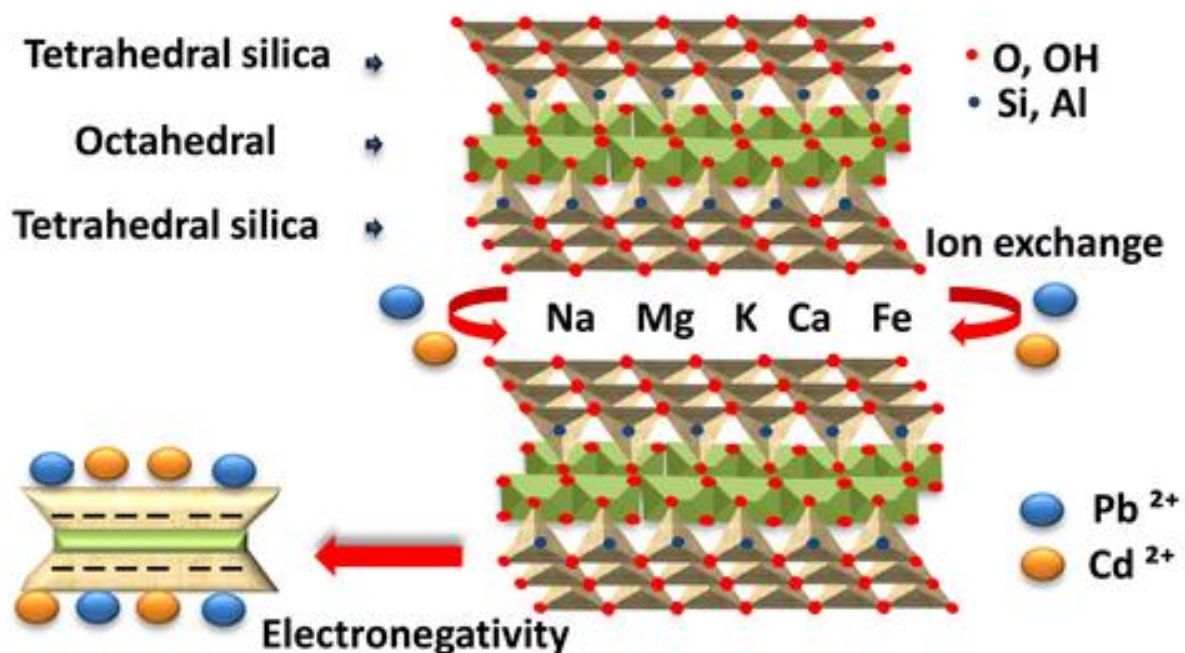
2.2.4. Adsorción. La adsorción es un proceso superficial el cual consta de una molécula, a la que se denomina adsorbato, adhiriéndose a la superficie de un sólido o en algunas ocasiones líquido, al que se le denomina adsorbente, todo ello en un compuesto líquido o gaseoso. Existen dos tipos de adsorción, la fisisorción (adsorción física) y la quimisorción (adsorción química), la primera siendo cuando se emplean fuerzas físicas para que el adsorbato se adhiera a la superficie del adsorbente y la segunda cuando el adsorbato se une químicamente a la superficie del adsorbente (Artioli, 2008). Como técnica de remoción de contaminantes del agua, es la más efectiva y de las más empleadas para ese propósito, debido a su bajo costo, versatilidad, simplicidad y alta eficiencia. Esta técnica es adaptable para distintos contaminantes, para lo cual

se aprovechan las propiedades de distintos tipos de absorbentes como zeolitas, óxidos, hidróxidos, estructuras organometálicas, entre otros (Hira et al., 2023).

Tomando como ejemplo de material adsorbente de metales pesados la bentonita, esta es una arcilla con una estructura de aluminosilicatos, esto quiere decir que este material arcilloso se encuentra compuesto de capas tetraédricas de sílice (SiO_4) y capas octaédricas de alúmina (AlO_6), además de una capa intermedia que contiene cationes intercambiables que equilibran la carga negativa de las láminas, la adsorción de los metales pesados se da principalmente por el intercambio iónico que se da cuando los metales pesados reemplazan los cationes débiles de la capa intermedia, esto se ve favorecido por la misma electronegatividad elevada que tienen los metales pesados, además de ello, la adsorción también se ve beneficiada de otros factores como un área superficial alta, pH óptimo o la presencia de otros elementos como el hierro que beneficia la formación de complejos superficiales, la bentonita es un adsorbente efectivo ya que emplea quimisorción formando enlaces químicos fuertes entre la superficie de la bentonita y el adsorbato, y así mismo también fisisorción en el intercambio iónico y la atracción electrostática (Abdelnaby et al., 2022).

Figura 1

Mecanismo de adsorción de Pb y Cd usando bentonita como adsorbente



Nota. Adaptado de *Application of Bentonite Clay, Date Pit, and Chitosan Nanoparticles as Promising Adsorbents to Sequester Toxic Lead and Cadmium from Milk*, por Abdelnaby et al., 2022 (<https://doi.org/10.1007/s12011-022-03353-w>). CC BY 4.0.

2.3. Materiales Adsorbentes Empleados Para la Remoción de Metales Pesados

La remoción de metales pesados de medios contaminados se ha vuelto una prioridad debido al peligro que estos representan para el ambiente, por lo cual se ha investigado en materia de que materiales son aptos para tal propósito, siendo la adsorción uno de los tratamientos fisicoquímicos más empleados para la remoción de metales pesados, se investiga extensamente los materiales con propiedades idóneas para este tratamiento, como buena distribución de poros, grupos funcionales, polaridad y una gran área superficial, que le permitan al material desempeñar

un papel fundamental en la remoción (Pabón et al., 2020), los materiales mayormente usados para tal propósito son:

2.3.1. Carbón Activado. El carbón activado deriva de materiales carbonosos como biomásas, lignito y carbón, este es un material con múltiples aplicaciones debido a que este posee características como alta porosidad, gran superficie específica y una gran variedad de grupos funcionales en su superficie, en la remoción de metales pesados, el carbón activado se emplea en aguas residuales, potabilización de agua y tratamiento de lixiviados para adsorber una gran variedad de metales pesados y gracias a su gran disponibilidad y facilidad de regeneración (Pabón et al., 2020).

2.3.2. Nanotubos de Carbono. Los nanotubos son descritos como un material compuesto por hojas cilíndricas de grafito doblado en una estructura con forma de tubo, se pueden clasificar en dos tipos, aquellos con una sola hoja de grafito y aquellos con múltiples hojas de grafito, estos nanotubos son ampliamente usados en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos debido a que estos al interactuar con iones metálicos presentan reacciones de atracción electrostática, sorción-precipitación e intercambio iónico (Pabón et al., 2020).

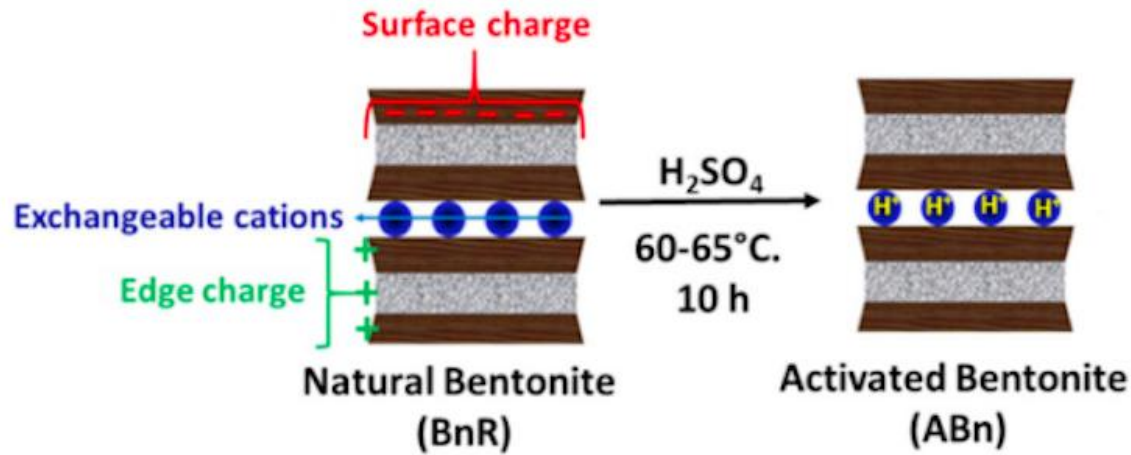
2.3.3. Arcilla. La arcilla si bien es un material que se puede encontrar fácilmente en la naturaleza constituidos por láminas moleculares con arreglos tetraédricos de sílice y octaédricos de alúmina, su aplicación en la remoción de metales pesados es bastante común debido a características como carga superficial negativa, una estructura laminar, tamaño de partícula pequeño y alta flexibilidad estructural en sus laminas, esto le ha permitido ser un material que destaca por su alta efectividad, bajo costo de operación y reutilizable (Gamba et al., 2019).

2.3.3.1. Bentonita. La bentonita es un tipo de arcilla que se compone mayoritariamente por un mineral denominado montmorillonita, este le otorga características como alta capacidad de intercambio catiónico y gran superficie específica, esto le permite adsorber cationes, pero no aniones, ya que tiene una red cristalina con cargas negativas (Buzetzky et al., 2018). Sin embargo, las deficiencias que pueda tener el material se solventan con modificaciones que se le hacen este, como la activación ácida que mejora sus capacidades para adsorber metales pesados y otros mediante mejoras en sus propiedades estructurales y texturales; además de ello, se puede facilitar su manejo al usarlo como adsorbente aplicando inmovilización, potenciando sus propiedades adsorbentes y facilitando su recuperación y reutilización, haciéndolo un material versátil e idóneo para la adsorción de metales pesados (Pawar et al., 2020).

La mejora de las propiedades adsorbentes de la bentonita por medio de la activación se fundamenta en la modificación de su estructura y propiedades superficiales, esto tiene que ver con la optimización en aspectos clave como la expansión de su espacio interlaminar, que significa un aumento del espacio entre las capas exponiendo sitios activos para adsorber metales pesados, así como también el aumento de área superficial y su porosidad mediante la eliminación de impurezas y creación de microporos y mesoporos, además de ello dependiendo de la forma de activación se pueden favorecer características específicas, siendo en el caso de la activación ácida que emplear reactivos como HCl o H₂SO₄, se generan sitios ácidos que favorecen el intercambio iónico con los metales pesados (Pawar et al., 2020).

Figura 2

Mecanismo de activación ácida de bentonita



Nota. En el ejemplo se empleó H_2SO_4 para activar la bentonita. Adaptado de *Use of activated bentonite-alginate composite beads for efficient removal of toxic Cu^{2+} and Pb^{2+} ions from aquatic environment*, por Pawar et al., 2020 (<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.130>) .

Copyright 2020 por Elsevier. Adaptado con permiso.

2.4. Métodos de Determinación de Arsénico

La contaminación por arsénico afecta diversos ecosistemas en los cuales este se encuentra, llegando ahí ya sea por causas naturales o actividades antropogénicas, este representa un peligro para la salud pública y la protección ambiental debido a su toxicidad y ubicuidad, por lo cual, se han desarrollado e implementado distintos métodos de determinación de arsénico para cuantificar la concentración de arsénico presente en aguas, asegurando que este no exceda el límite de 0.01 mg/L establecido por la OMS (Martínez & Gasquez, 2005).

2.4.1. Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS). La espectroscopia de Absorción Atómica (AAS) es un método ampliamente usado en la determinación de metales y algunos metaloides, este se basa en medir la cantidad de luz UV/visible absorbida por el analito, esta misma energía de luz absorbida es proporcional a la concentración del analito en la muestra, ya

que esta energía será necesaria para promover los electrones del analito, esta interacción en la que se absorbe o emite energía por parte de los átomos es la forma en la cual se identifican elementos y se determina la composición elemental de estos (Merck, 2024), para su uso en arsénico se han desarrollado variantes especializadas que mejoran el rendimiento de esta técnica.

2.4.1.1. Espectroscopia de Absorción Atómica con Generación de Hidruros (HG - AAS). Este es una variante de la AAS establecida para el análisis de trazas de arsénico que se basa en la conversión del arsénico presente en el analito en hidruro de arsénico (AsH_3), seguidamente para su análisis, esta especie volátil se introduce en el sistema de absorción atómica; para lograr ello, antes se debe reducir el arsénico pentavalente (As (V)) a arsénico trivalente (As (III)) empleando una mezcla de yoduro de potasio y ácido L-ascórbico, después de esta reducción, el As (III) reacciona en un generador de hidruros con borohidruro de sodio (NaBH_4), como agente reductor, en HCl a 10 M, como medio ácido, formándose los vapores de arsina, estos vapores se transportan por un gas inerte, como el argón, a una celda de cuarzo calentada donde estos vapores se descomponen y se generan átomos de arsénico libres, estos átomos de arsénico emiten la señal de absorción atómica que se mide por el espectrofotómetro (Bhat et al., 2023).

La HG - AAS es una variante que ofrece ventajas significativas en la determinación de arsénico, ya que es altamente sensible y preciso en el análisis de trazas, sus límites de detección son notablemente bajos, tiene pocas interferencias y sus costos son relativamente bajos, además de ello operar el equipo y realizar el análisis generalmente es simple en comparación a otros métodos como el ICP, lo cual permite un análisis rápido de muestras pudiendo llegar analizar hasta 120 muestras por h empleando un sistema automatizado, haciéndolo un método adecuado y fiable para cuantificar arsénico en agua potable (Jones & Garbarino, 1999).

La variante HG - AAS presenta ciertas limitaciones, una de las más evidentes está en el mismo protocolo de análisis, ya que, para la determinación de arsénico total, se requiere la formación de hidruros mediante la conversión de As (V) a As (III), esto implica un paso previo de reducción que no solo puede llegar a ser complejo sino que puede requerir un tiempo de reposo considerable (1 a 2 h) (Jianfeng, 2019); si bien la HG – AAS puede ser útil para la determinación de arsénico, este método se considera adecuado para un número limitado de elementos, ya que no todos son capaces de formar los hidruros necesarios para la medición, lo cual, en comparación con otros métodos como el ICP – MS que tiene un amplio rango analítico, representa una limitante en la determinación de metales (Wilschefski & Baxter, 2019). Además de ello, también se han reportado interferencias por metales de transición y elementos formadores de hidruros mutuos, como lo puede ser en el caso del antimonio que suprime mutuamente sus señales con el arsénico (Ümit & Emur, 2000).

2.4.1.2. Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito (GFAAS). La GFAAS o también conocida como Espectrometría de Absorción Atómica Electrotermal (ETAAS) es una variante del método AAS que permite la determinación de elementos a niveles traza y ultra traza empleando pequeños volúmenes de muestra, esto lo puede hacer al deponer un pequeño volumen de muestra en un tubo de grafito, este se calienta de manera progresiva empleando un programa de temperatura controlado, en una primera etapa, la muestra se seca y se incinera para eliminar la matriz, seguidamente se calienta hasta vaporizar el arsénico reduciéndose a su forma atómica, estos átomos de arsénico absorben la radiación monocromática por una lámpara de cátodo hueco específica para arsénico y un detector fotoeléctrico mide la intensidad de la radiación transmitida, la cantidad de radiación absorbida será directamente proporcional a la concentración de arsénico en la muestra (Eurofins Scientific, 2025).

La GFAAS es un método de detección de arsénico altamente preciso y sensible con límites de detección bajos que permite emplear pequeños volúmenes de muestra si es necesario (menos de 100 μL), respecto a la variante HG – AAS, esta variante ofrece un tiempo de preparación de muestra más corto y presenta un mayor rendimiento en análisis multi elemental simultaneo, así como también pocos problemas de interferencia (Wilschefski & Baxter, 2019); este método destaca como uno simple y de bajo costo, en comparación a otros como el ICP – MS (Ataee et al., 2020).

A pesar de que la GFAAS tenga ventajas como su alta precisión y sensibilidad, y límites de detección bajos, para poder lograr un bajo límite de detección se requieren métodos de preconcentración o separación y el equipo para realizar esto es costoso y requiere operadores calificados (Palintest, 2024), si bien es cierto que se puede evitar el pretratamiento, esto haría que el límite de detección sea demasiado alto (Bhat et al., 2023); el análisis de las muestras en comparación con otros métodos como el ICP – MS, es lento y secuencial, llegando a analizar únicamente de 1 a 6 elementos a la vez (Eurofins Scientific, 2025), además de ello se requiere una optimización de método para cada tipo de muestra (Wilschefski & Baxter, 2019).

2.4.2. ICP Masas. La Espectrometría de Masas por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) es un método con la capacidad de cuantificar los elementos con un potencial de ionización menor al del argón en concentraciones muy bajas, por lo cual este método se puede aplicar en la caracterización de residuos tóxicos, calidad de aguas, detección de metales, entre otras matrices que incluyen el análisis de muestras de agua (Mansilla et al., 2022); este método se basa en la introducción de la muestra, generalmente en forma de aerosol, en un plasma de argón a una temperatura aproximada de entre 6000 y 10000 K, en este plasma los elementos presentes en la muestra se disocian en átomos y se ionizan perdiendo electrones para formar

iones cargados positivamente, estos iones se extraen del plasma y se dirigen hacia un espectrómetro de masas donde son separados y detectados (Schöne & Schweizer, 2022).

La ICP – MS es un método que ofrece ventajas que la posicionan como uno de los métodos más completos y potentes para la determinación de arsénico en agua, esto debido a que posee características como una alta sensibilidad que permite la detección de elementos en el rango de sub – partes por trillón, para el caso del arsénico este método es útil ya que tiene un bajo límite regulatorio en agua potable (Schöne & Schweizer, 2022); además de ser muy sensible la ICP – MS tiene una alta capacidad multi elemental que permite medir múltiples elementos simultáneamente en una sola corrida analítica, reduciendo en gran medida el tiempo de análisis, esto es muy beneficioso en laboratorios que presentan altos volúmenes de muestras para análisis (Bhat et al., 2023); una de las características que influye y determina significativamente su corto tiempo de ejecución es una preparación simple de las muestras que a menudo se limita solo a la filtración para eliminar constituyentes no disueltos (Schöne & Schweizer, 2022), además de ello, para garantizar la precisión de los resultados, en la filtración, se requiere usar filtros de jeringas que no liberen iones metálicos relevantes para el análisis de agua potable (Wilschefski & Baxter, 2019); respecto a las interferencias, este método ofrece como una ventaja, alta resolución y un nivel muy elevado en el control de interferencias debido al uso de instrumentos de espectrometría de masas en tándem, la alta precisión en la cuantificación se da debido a la utilización de celdas de colisión/reacción con diferentes gases que permiten reducir o eliminar iones interferentes (Colman et al., 2024); para identificar y diferenciar las distintas formas de arsénico en una muestra, este método permite un análisis isotópico y de especiación, lo cual permite realizar una evaluación de riesgo precisa (Lee, 2025).

Si bien las ventajas que presenta la ICP – MS son bastante favorables haciendo que sea un método completo y robusto para distintas aplicaciones, presenta limitaciones evidentes por el lado económico, ello se debe a que presenta elevados costos que empiezan por un elevado costo inicial por la adquisición del equipo que puede llegar a ser de entre 50000 a 250000 dólares para equipos nuevos dependiendo del modelo, a eso se suman los altos costos operativos que se deben principalmente debido a la utilización del argón y la necesidad de emplear múltiples gases de alta pureza, todo ello considerando que también se deben asumir los costos del analista a cargo que realizará el análisis y que este requiere estar capacitado y tener un alto nivel de experiencia, ello debido a que el proceso debe ser realizado con pericia de forma que se eviten las interferencias, adicional a ello se deben considerar costos adicionales que derivan de la necesidad de aire acondicionado, filtros HEPA y sistemas de tuberías adecuados para reducir el polvo y mantener un ambiente controlado (Wilschefski & Baxter, 2019).

2.4.3. Método Espectrofotométrico Azul de Molibdeno. El método espectrofotométrico azul de molibdeno es un método que surge a partir del desafío de encontrar un método para cuantificar un elemento tan peligroso para salud humana como el arsénico, que no requiera equipos voluminosos de alto costo de operación y mantenimiento, que permita un monitoreo rápido y continuo que sea de apoyo tanto en investigaciones de laboratorio como de campo (Corral-Escárcega et al., 2024); este método emplea una técnica colorimétrica clásica basada en la similitud de las propiedades entre el arseniato y el fosfato para cuantificar el arsénico presente en el agua (National Academy of Sciences, 1977), el principio de este método implica la reacción entre el molibdato ácido y el arseniato (As (V)) para formar, bajo condiciones de temperatura y tiempo controladas, ácido arsenomolibdico cuya coloración es amarilla, que posteriormente se reduce a un complejo de coloración azul (Lenoble et al., 2003), donde la intensidad del color

azul es directamente proporcional a la concentración de arsénico en la muestra, permitiendo que esto pueda ser cuantificado por espectrometría; para que esta técnica tenga éxito en la determinación de arsénico, todo el arsenito (As (III)) presente en la muestra se debe oxidar completamente, comúnmente con permanganato de potasio (KMnO_4), a arseniato (As (V)) (Rajasekhar et al., 2024).

Este método ofrece varias ventajas que son especialmente beneficiosas para aplicaciones de campo y de bajo costo, ya que este método se destaca como uno simple y sensible particularmente para el arsénico, su asequibilidad lo hace accesible para la determinación de arsénico en laboratorios donde equipos de alto costo no son viables, al mismo tiempo que proporciona resultados relativamente rápidos; se ha demostrado que diversas modificaciones en el método hacen que este sea capaz de proporcionar lecturas precisas de arsénico total por debajo de 10 g/L con bajos costos operativos (Rajasekhar et al., 2024); se ha considerado que los métodos basados en azul de molibdeno ofrecen un rendimiento óptimo en términos de fiabilidad analítica y costo (Lenoble et al., 2003).

El método espectrofotométrico de azul de molibdeno presenta algunas limitaciones, siendo que si bien es un método simple, la formación del complejo y la formación de una coloración óptima puede llegar a ser de 1 h, siendo este un tiempo relativamente largo (National Academy of Sciences, 1977); respecto a las interferencias, si bien se ha mejorado la tolerancia a las interferencias, este método es más adecuado para aguas que contienen bajos niveles de fosfatos y materia orgánica, esto se debe a que hay elementos que forman complejos similares al que se forma con el arsénico (Lenoble et al., 2003); mencionando además que la efectividad de este método dependerá de la tecnología específica usada y así mismo que se hagan análisis por

triplicado y que el operador no cometa errores que comprometan los resultados (National Academy of Sciences, 1977).

La selección del método analítico más adecuado para la determinación de arsénico en muestras de agua requiere un análisis multifactorial que dependerá de las necesidades específicas del análisis, por ello se deben considerar criterios clave que se detallan en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Tabla comparativa de métodos de determinación de arsénico

Criterio / Método	ICP-MS	HG-AAS	GFAAS	MBM
Principio de Funcionamiento	Ionización en plasma de argón, separación por masa/carga, detección de iones.	Conversión a hidruro volátil (arsina), atomización en celda/llama, absorción atómica.	Atomización electrotérmica en horno de grafito, absorción de luz por átomos libres.	Reacción de arseniato con molibdato, reducción a complejo azul, medición espectrofotométrica.
Límites de Detección	Sub-ppt (µg/L), 0.1 µg/L; 27-36 pg/mL (especiación).	0.0009-1 ppb; 0.10-0.217 µg/L; 27-36 pg/mL (especiación).	40 pg, 10 ng/mL; 0.26 ppb; 0.9 µg/L.	20 µg As(V) l-1; 8 µg/L (portátil); 4.7 µg/L (As (III)), 8.3 µg/L (As(V)).
Ventajas	Alta sensibilidad	Buena sensibilidad y	Alta sensibilidad y precisión, bajo	Simple, rápido, sensible, bajo costo,

	(sub-ppt), multielemental , amplio rango dinámico, alto rendimiento, preparación simple, excelente control de interferencias (ICP-QQQ, CRC), capacidad de especiación.	precisión, bajo límite de detección, pocas interferencias, bajo costo de instalación, sistemas asequibles, rápido análisis (flujo continuo), reducción de residuos.	límite de detección, pequeños volúmenes de muestra, pocas interferencias, tiempo de preparación corto, menor costo que ICP- MS, aplicable a diversas matrices.	adecuado para campo, kits portátiles, alto rendimiento (automatizado), tolera fosfato (optimizado), óptimo en fiabilidad/riesgo/cost o.
Desventajas	Alto costo (equipo y operación), requiere alta experiencia, costos de instalación, interferencias (poliatómicas,	Preparación de muestra compleja (prereducción As(V) a As (III), tiempo de reposo), limitado a elementos	Límite de detección alto sin preconcentració n, equipo costoso, requiere operadores cualificados, un solo elemento	Desarrollo lento (30 min), requiere bajos niveles de fosfato/materia orgánica, oxidantes ineficaces (H ₂ O ₂ , MnO ₂ (s)), efectividad depende de tecnología (portátil),

	REEs	formadores de	(secuencial),	pH y salinidad
	doblemente	hidruros, bajo	bajo	pueden afectar
	cargados),	rendimiento	rendimiento,	oxidación.
	sobre	(manual), alto	rango dinámico	
	corrección con	volumen de	limitado, sin	
	correcciones	muestra,	cribado,	
	matemáticas,	interferencias	optimización por	
	efecto de	(metales de	muestra, matriz	
	mejora por	transición,	compleja.	
	carbono.	hidruros		
		mutuos,		
		cloruro).		
	Instrumento:			
	\$50,000-			
	\$250,000.	Instrumento:	Instrumento:	Bajo costo.
Costo		\$15,000-	\$20,000-	
(Instrumento y	Operación:	\$40,000.	\$60,000.	Operación: \$0.3
Operación)	\$75-\$210/h			CNY/muestra
	(instrumento),	Operación:	Operación: Bajo	(automatizado).
		Bajo.	(en general).	
	\$25-\$55/h			
	(analista).			
Tiempo de	Corto tiempo	Preparación:	Preparación:	Desarrollo de color:
Análisis (por	por muestra,	1-2 h (reposo).	Corta (GFAAS	30 min - 1 h.
			vs HG-AAS).	Portátil: 1-5 min.

Muestra y Rendimiento)	muy alto rendimiento.	Análisis: Rápido, 120 muestras/h (automatizado)	Análisis: Lento, secuencial (1-6 elementos), bajo rendimiento.	Automatizado: 4.8 muestras/h.
Capacidad de Especiación	Sí, muy alta. Diferencia As (III), As(V), MMA, DMA, etc. (con HPLC-ICP-MS/MS, CE-ICP-MS).	Sí, diferencia As (III), As(V), MMA, DMA (con HPLC-HG-AFS, pH-selectivo).	Sí, As (III)/As(V) y arsénico inorgánico total.	Sí, principalmente As(V). Puede diferenciar As (III) y As(V) con analizadores automatizados.
Preparación de Muestras	Filtración (0.45 µm), en 2-5 % HNO ₃ .	Prereducción As (V) a As (III) (KI/ácido ascórbico), digestión ácida (HNO ₃ /H ₂ SO ₄ , microondas).	Pequeño volumen directo en un tubo, digestión ácida (HNO ₃ :H ₂ O ₂ , microondas) para complejos.	Oxidación As (III) a As (V) (KMnO ₄); digestión ácida (minerales); kits portátiles: reactivos en material poroso.
Interferencias Comunes	Iones poliatómicos (ArCl ⁺ , CaCl ⁺ ,	Metales de transición, elementos	Sulfato, cloruro (con cationes), minimizadas con	Fosfato, materia orgánica (en niveles altos), silicato y

CoO ⁺ ,	formadores de	modificadores	sulfato (no influyen
CaO(H ₃ O) ⁺),	hidruros	de matriz (Mg	en concentraciones
REEs	mutuos (Sb),	(NO ₃) ₂ /Pd) y	naturales).
doblemente	cloruro.	H ₂ .	
cargados			
(Nd ²⁺ , Sm ²⁺),			
efecto de			
mejora por			
carbono.			

2.5. Diseño de Superficie de Respuesta

El Diseño de Experimentos (DOE) es un enfoque estadístico que tiene como objetivo brindar un marco estructurado que permita planificar, ejecutar y analizar experimentos, procesos o así también para desarrollar nuevos productos u optimizar estos, ello lo hace al obtener la mayor cantidad de información posible de los experimentos de modo que pueda minimizar el tiempo y los recursos empleados (Gil, 2019).

Dentro del campo del DOE, el diseño de superficie de respuesta, surge como una metodología que proporciona un conjunto de técnicas estadísticas para modelar y analizar problemas, desarrollar u optimizar procesos, así como también todo aquello en lo que se busque una o múltiples respuestas de interés las cuales se vean influenciadas por factores cuantificables; el objetivo principal del diseño de superficie de respuesta es identificar los niveles óptimos de estos factores para lograr una respuesta que cumpla con los objetivos de la investigación, este diseño se aplica en distintos campos como la ingeniería, la manufactura, química, biotecnología,

ciencia de materiales, entre otros (Minitab, 2024). El diseño de superficie de respuesta es un método que abarca varios diseños experimentales como modelos cuadráticos completos como el diseño central compuesto y diseño Box Behnken, siendo este último una alternativa eficiente y robusta para optimizar procesos (Gil, 2019).

2.5.1. Diseño Central Compuesto. Este es el diseño de superficie de respuesta comúnmente más utilizado, se puede ajustar a un modelo cuadrático completo, además de poder incluir información sobre un experimento factorial, en este diseño no únicamente se emplean los puntos centrales, sino que también un grupo de puntos axiales para poder estimar la curvatura, este tipo de diseño presenta diferentes características (Minitab, 2024).

2.5.1.1. Puntos Factoriales, Axiales y Centrales. El diseño central compuesto se construye a partir de 3 puntos, los puntos factoriales, puntos axiales y puntos centrales, esto permite modelar la curvatura de una variable de respuesta, así como también para estimar los términos de primer y segundo orden, siendo ideal para experimentos secuenciales que se beneficien de agregar puntos axiales y centrales para ampliar estos (Minitab, 2024).

2.5.1.2. Flexibilidad en el número de niveles. A diferencia de otros diseños como el Box Behnken, el diseño central compuesto puede utilizar hasta 5 niveles en lugar de 3 (Minitab, 2024).

2.5.1.3. Utilidad en experimentación secuencial. Si es que en un diseño factorial inicial se detecta curvatura, se pueden aumentar puntos axiales y centrales para convertirlo en un diseño central compuesto, esta capacidad inherente del diseño central compuesto, hace que este pueda ser empleado en la experimentación secuencial, lo cual le otorga una ventaja funcional significativa, así mismo, esta característica hace que este diseño sea ideal para estrategias

experimentales que impliquen refinación iterativa y optimización de recursos en diferentes etapas de la investigación (Minitab, 2024).

El diseño central compuesto presenta variantes cuyas denominaciones varían dependiendo de la ubicación de los puntos axiales, siendo “Circunscrito” la variante en la que los puntos axiales se sitúan a una distancia “alfa” (el valor alfa le da rotabilidad) del centro y pudiendo extenderse más allá de los límites del “cubo” del diseño factorial; mientras que en el diseño “Centrado en las caras”, los puntos axiales están en el centro de las caras del espacio factorial, considerando además que en esta variante se requieren 3 niveles por cada factor como en el caso del diseño Box Behnken (Minitab, 2024).

2.5.2. Diseño Box Behnken. El diseño Box Behnken es un tipo de diseño de superficie de respuesta que se caracteriza por no tener un diseño factorial completo o fraccionado incrustado, este tipo de diseño permite ajustar un modelo cuadrático completo (modelo de segundo orden), es capaz de capturar la curvatura en la superficie de respuesta, identificando los puntos óptimos de la variable o variables de respuesta, esto lo hace mediante un análisis y un mejor entendimiento de las variables que influyen en la respuesta, lo cual logra al agregar al análisis las interacciones entre variables y términos cuadráticos que modelan la curvatura en la respuesta, gracias a ello se pueden hallar las condiciones operativas y niveles de variables óptimos para una o varias determinadas variables de respuesta, al mismo tiempo que se modifican los niveles dependiendo de los requerimientos. Considerando que todas las variables no se establecerán en sus niveles altos al mismo tiempo, en este diseño, las variables siempre se encontrarán dentro de su zona de operación segura. Los diseños Box Behnken destacan de otros como los diseños centrales compuestos, debido a que su ejecución es más barata con el mismo número de factores, proporcionando la información necesaria para un ajuste cuadrático

empleando un reducido número de corridas experimentales, esta eficiencia es clave para experimentos con recursos limitados. Los diseños Box Behnken son capaces de estimar los coeficientes de primer y segundo orden, sin embargo, al no tener corridas de un experimento factorial, estos no son adecuados para experimentos secuenciales (Minitab, 2024).

El diseño Box Behnken presenta características distintivas que definen su estructura y determinan su aplicabilidad, siendo estas:

2.5.2.1. Niveles de Factores. Una de las características definitorias del diseño Box Behnken es que cada factor se evalúa en 3 niveles igualmente espaciados, estos se codifican como -1 para el nivel más bajo, 0 para el nivel central y +1 para el nivel alto (Minitab, 2024).

2.5.2.2. Puntos de Diseño. Los puntos experimentales del Diseño Box Behnken se sitúan en el centro de cada arista del hipercubo experimental, junto con puntos centrales replicados, siendo que en un diseño Box Behnken de 3 factores se requieren al menos 15 corridas experimentales (Delzo-Salomé et al., 2021).

2.5.2.3. Ausencia de Puntos Axiales. El diseño Box Behnken no requiere puntos axiales que se extiendan más allá de los límites definidos por los niveles mínimos y máximos de los factores (Minitab, 2024).

2.5.2.4. Implicaciones Para la Zona de Operación Segura. La estructura del diseño Box Behnken no permite que haya corridas experimentales donde todos los factores estén en sus niveles máximos o mínimos de manera simultánea, además de ello, al no existir puntos axiales en este diseño, se garantiza que todos los puntos de diseño se encuentren dentro de la zona de operación segura o de interés definida por los límites de los factores, esto es lo que se considera como una ventaja crucial cuando las condiciones extremas son costosas o imposibles de realizar,

ya que ofrecen una reducción significativa de los riesgos experimentales y los costos de pruebas en condiciones como estas (Minitab, 2024).

El diseño Box Behnken tiene ventajas inherentes que lo hacen idóneo para determinadas aplicaciones, dentro de las más evidentes se puede destacar que este diseño requiere un menor número de puntos en el diseño a comparación de un diseño central compuesto, siendo que para un mismo número de factores, por ejemplo 3, en el diseño Box Behnken se podrían realizar únicamente 15 corridas experimentales, mientras que en el diseño central compuesto serían 20, esta ventaja podría ser aprovechada en experimentos donde cada corrida experimental sea muy costosa, consuma mucho tiempo o requiera materiales con poca disponibilidad (Gil, 2019). Mencionando además que este diseño es especialmente beneficioso cuando el investigador considera y tiene buenas sospechas de que las condiciones óptimas se encontrarán dentro de los límites seguros del diseño, prefiriendo así una investigación eficiente y segura ante una investigación que requiera una exploración exhaustiva.

Los diseños de superficie de respuesta pueden emplearse en distintos experimentos y la elección entre un Diseño Box Behnken y un Diseño Central Compuesto dependerá de las características del problema a desarrollar en la investigación, así como también de sus limitaciones experimentales, comparar las características clave de ambos diseños pueden ayudar a discernir cual es el idóneo para la investigación a desarrollar.

Tabla 4*Comparación de características clave entre diseños Box Behnken y Central Compuesto*

Característica	Diseño Box Behnken	Diseño Central Compuesto
Niveles por factor	Siempre 3 niveles (-1, 0, +1).	Hasta 5 niveles (factorial, axial, central); una de sus variantes usa 3.
Tipos de puntos de diseño	Puntos medios de las aristas y puntos centrales.	Vértices del cubo, puntos axiales y puntos centrales.
Corridas experimentales en extremos	No incluye corridas experimentales con todos los factores en valores límites.	Pueden incluir puntos axiales fuera de la “zona segura”.
Número de corridas experimentales (3 factores)	15.	20.
Costo	Generalmente menos costoso.	Generalmente más costoso.
Utilidad en experimentación secuencial	No adecuado.	Ideal, ya que este diseño se puede construir a partir de un diseño factorial.
Cobertura	Siempre se mantiene dentro de los límites de la “zona segura”, no explora combinaciones de extremos.	Permite hacer una exploración exhaustiva incluyendo puntos fuera de los límites.
Precisión de predicción	Mayor en el centro, menor al acercarse a los extremos.	Es excelente en el centro y más preciso en general.

Robustez a pérdida de corridas experimentales	Menos robusto.	Mas robusto.
Rotabilidad	Casi rotatable.	Puede ser rotatable.

3. Marco Legal

La presencia del arsénico en el agua representa una problemática compleja que impacta en la salud de la población y el medio ambiente, por lo cual existen regulaciones nacionales e internacionales permiten una gestión adecuada de la calidad del agua.

3.1. Normativa Internacional

La Organización Mundial de la Salud (OMS), clasifica al arsénico como una de las 10 sustancias químicas más preocupantes para la salud pública, por lo cual teniendo en cuenta el perjuicio que es capaz de causar en la salud humana, este establece un límite recomendado de concentración de arsénico en agua potable de 0.01 mg/L (OMS, 2022b).

La EPA adopta el estándar de valor límite de arsénico para agua potable fijado en 0.01 mg/L tras el análisis de expertos independientes, en donde consideraron el costo del cumplimiento y los beneficios que traería la adopción del estándar (U.S. EPA, 2023).

3.2. Normativa Nacional

En el Perú existe un marco legal con diversas normativas que regulan la calidad del agua de consumo humano, el pilar de este marco legal es el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, el cual es aprobado mediante el Decreto Supremo N 031-2010-SA y establece 0.01 mg/L como el Límite Máximo Permisible (LMP) para arsénico presente en agua de consumo (MINSA, 2010), siendo esta cifra la misma que indican las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (OMS, 2022b). El Decreto Supremo 031-2010-SA

aprueba el reglamento de la calidad de agua para consumo humano, con el fin de garantizar la inocuidad del agua de consumo humano y así prevenir factores de riesgo sanitarios (Aprueban reglamento de la calidad de agua para consumo humano, 2010).

El LMP actual para arsénico en agua de consumo es una actualización respecto al 0.05 mg/L anterior, demostrando una clara intención política de adoptar un enfoque más protector, siguiendo las recomendaciones de la OMS. Sin embargo, al observar reportes de altos niveles de arsénico en diferentes regiones del Perú, indica que existe un marco legal que es adecuado en su formulación pero deficiente en su implementación (Espinoza, 2025).

El Ministerio de Salud (MINSA), por medio de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), es la autoridad encargada de la gestión de la calidad del agua para consumo humano, por lo mismo tiene funciones que incluyen la formulación de políticas, emisión de normas de calidad sanitaria, elaboración de guías y protocolos para el monitoreo y análisis de parámetros (MINSA, 2010). Es por ello que, en respuesta a la exposición de la población al arsénico, el MINSA aprobó la Guía Técnica para el Abordaje Integral a Personas Expuestas a Arsénico (aprobada mediante Resolución Ministerial N° 168-2022-MINSA), la cual tiene como objetivo tratar la situación actual de las personas que han sido expuestas al arsénico y de este modo pueda mejorar la salud del sector de la población afectado a nivel nacional, ello mediante el establecimiento de criterios técnicos para la identificación oportuna de la población expuesta y fortaleciendo el registro y seguimiento de los casos identificados (Resolución Ministerial N° 168-2022-MINSA, 2022). La promulgación de esta guía para un abordaje integral a la población que se encuentra expuesta a arsénico, es una forma de reconocer formalmente la magnitud del problema de salud pública que representa el arsénico en el Perú, así como también reconociendo

que las medidas preventivas son insuficientes y se requiere un mayor énfasis en la prevención primaria y remediación ambiental de modo que se eviten futuros casos de exposición a arsénico.

Tabla 5

Límites Máximos Permisibles de Arsénico en Agua de Consumo Humano en Perú

Parámetro	Unidad de Medida	LMP Actual	LMP Anterior	Fuente
Arsénico	mg/L	0.01	0.05	D.S. N° 031-2010-SA

Para la regulación de descargas residuales provenientes de efluentes industriales, existen Límites Máximos Permisibles (LMP) que buscan regular las descargas contaminantes desde fuentes específicas con el objetivo de prevenir la contaminación ambiental (Decreto Supremo N° 0037-2008-PCM, 2008), del mismo modo, las regulaciones también consideran los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) y el Drenaje Ácido de Mina (DAM) (BOSS TECH, 2020).

El Ministerio del Ambiente (MINAM) es la autoridad encargada de aprobar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, estos son los que definen los límites de arsénico en las diferentes categorías de uso del agua, asimismo, estos estándares son esenciales para la gestión ambiental y la protección de recursos hídricos (Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, 2015). El MINAM trabaja en conjunto con la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la cual es la máxima autoridad técnico – normativa del Sistema Nacional de Gestión Recursos Hídricos (SNGRH) encargada de controlar, supervisar y fiscalizar el cumplimiento de los ECA en los cuerpos naturales de agua (Resolución Jefatural N° 068-2018-ANA, 2018). Los ECAs

existentes se diferencian de acuerdo a las categorías de uso del agua, ya que existe una variabilidad en los riesgos (Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, 2015).

Tabla 6

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Arsénico en Agua por Categoría de Uso en Perú

Categoría de Uso	Subcategoría	Valor Limite (mg/L)
Poblacional y Recreacional	A1 (Potabilizable con desinfección)	0.01
	A2 (Potabilizable con tratamiento convencional)	0.01
	A3 (Potabilizable con tratamiento avanzado)	0.15
	B1 (Contacto primario para recreación)	0.01
Extracción y Cultivo Marino Costeras y Continentales	C1, C2, C3 (Aguas marinas)	0.05
	C4 (Aguas continentales)	0.1
Riego de Vegetales y Bebida de Animales	D1 (Riego de Cultivos de Tallo Alto y Bajo)	0.1
	D2 (Bebida de Animales)	0.2
Conservación del Ambiente Acuático	E1 (Lagunas y Lagos)	0.15

E2 (Ríos - Costa, Sierra, Selva)	0.15
E3 (Ecosistemas Marino Costeros - Estuarios y Marinos)	0.036

Entre otros instrumentos legales, existen la Ley General del Ambiente (N° 28611) y la Ley de Recursos Hídricos (N° 29338), que constituyen el marco legal y sustentan la gestión ambiental y los recursos hídricos del Perú (Decreto Supremo N° 031-2010-SA, 2010).



CAPÍTULO III METODOLOGÍA

1. Tipo y Nivel de Investigación

1.1. Enfoque de Investigación

El enfoque de la investigación será cuantitativo, ya que mediante los datos recolectados a través de mediciones en las muestras, se obtendrán datos que serán sometidos a análisis estadístico y se comprobará la hipótesis planteada (Fernández & Baptista, 2014).

1.2. Tipo de Investigación

El tipo de investigación será aplicada, ya que la investigación se desarrollará a partir de métodos probados anteriormente cuya efectividad ya se ha cuantificado, ello con el objetivo de comparar los datos teóricos con los experimentales (Duoc UC Bibliotecas, 2024).

1.3. Nivel de Investigación

El nivel de la investigación será explicativo, debido a que a través de la hipótesis planteada en la investigación se buscará evaluar los mecanismos y factores que influyen en la capacidad adsorbente del material a emplear, manipulando las variables y asegurando resultados válidos y fiables (Supo, 2023).

2. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es experimental debido a que en esta se manipularán variables vinculadas a diferentes causas con el objetivo de evaluar el efecto que estas tendrán en una variable de respuesta (Muguirra, 2018).

2.1. Campo de Investigación

El presente trabajo de investigación se llevará a cabo en los laboratorios de la Universidad Católica de Santa María, ubicada en el distrito de Arequipa, provincia de Arequipa y el departamento de Arequipa.

2.2. Variables

Las variables y sus indicadores se señalan en la **Tabla 7**.

Tabla 7

Variables e indicadores

Tipo de variable	Variable	Indicadores	Unidades
Independientes	Velocidad de Agitación	Velocidad de agitación	RPM
	Dosis de adsorbente	Concentración	g/L
	Tiempo de contacto	Tiempo de contacto	Min
Dependientes	Remoción de arsénico	Remoción de arsénico	%

Los niveles mínimos y máximos se establecen en la **Tabla 8**.

Tabla 8

Valores mínimos, máximos y medios de las variables

Variable	Unidades	Mínimo	Máximo	Medio
Velocidad de agitación	RPM	150	250	200
Dosis de adsorbente	g/L	2	6	4
Tiempo de contacto	Min	30	90	60

2.3. Población, Muestra y Muestreo

En el tema de investigación propuesto, la población representa a la solución madre de arsénico a 2 ppm (agua sintética) preparada en el laboratorio de la Universidad Católica de Santa María ubicada en el departamento de Arequipa.

La muestra se representa por la porción tomada de la solución madre de arsénico a 2 ppm (0.85 litros) para realizar los ensayos.

El muestreo de esta investigación fue del tipo aleatorio simple.

2.4. Materiales y Equipos

2.4.1. Material de Laboratorio.

- Bagueta
- Beakers de 100 mL y 250 mL
- Bureta
- Colador
- Espátula
- Frascos con tapa de 200 mL
- Filtros de jeringas de 0.22 μm
- Jeringas de 10 mL
- Matraces aforados de 10 mL, 100 mL y 250 mL
- Micropipetas de 200 μL , 1000 μL y 5000 μL
- Pastillas magnéticas
- Piseta
- Pinzas
- Viales ámbar de 5 mL

2.4.2. Insumos y Reactivos.

- Agua destilada
- Alginato de sodio 2 %
- Arsénico a concentración 2 ppm
- Bentonita sódica
- Cloruro de calcio (CaCl_2) al 2 %
- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) 2N
- Ácido Clorhídrico (HCl) concentrado y 1N
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Naranja de Metilo (0.1 g/100 mL en agua)
- Hidróxido de Amonio concentrado
- Bromato de Potasio 0.1 M
- Molibdato de amonio 0.01 M
- Sulfato de Hidracina 0.1 M

2.4.3. Equipos e Instrumentos.

- Agitador magnético con placa calefactora
- Balanza analítica
- Espectrómetro FTIR
- Estufa
- Espectrofotómetro

3. Métodos de Investigación

3.1. Acondicionamiento de la Bentonita Para la Evaluación de su Capacidad Adsorbente para Arsénico en Agua Sintética

3.1.1. Pretratamiento de Bentonita Sódica. La bentonita sódica fue adquirida de Merck, esto con el objetivo de obtener una bentonita que tenga una pureza aceptable y emplear menos tiempo en la purificación. Una vez adquirida, la bentonita fue tamizada con un tamiz N°100 para obtener partículas de un tamaño inferior a 149 μm , además de ello también se eliminaron partículas ajenas a la bentonita de coloración oscura y de tamaño superior a 150 μm , con esto se redujo el tiempo de la purificación que se realizó posteriormente y se obtuvo 20 g de bentonita tamizada.

Para la purificación de la bentonita, se adquirió peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 30 % de Delta Química S.R.L., empleando esto se tuvo como objetivo eliminar los restos de materia orgánica que pudieron estar en la bentonita, para lograrlo se calentaron 200 mL de peróxido de hidrogeno a 30 °C en un beaker en una placa calefactora con agitador magnético, esto se realizó con el objetivo de acelerar la reacción con la bentonita sin llegar al punto en el que el peróxido se descomponga rápidamente y no reaccione adecuadamente con la bentonita, cuando se alcanzaron los 30 °C, se procedió a insertar una pastilla magnética en el beaker y se agitó a 300 RPM por un periodo de 6 h observando que no rebalse por un burbujeo intenso, esto con el objetivo de que todas las impurezas se eliminaran, se comprobó visualmente que la reacción había terminado al pasar el periodo cuando ya no se observaba burbujeo.

Después de terminar la reacción se elevó la temperatura del peróxido de hidrogeno hasta los 50°C hasta que se eliminara el peróxido de hidrogeno por descomposición; después de eliminar el peróxido, para eliminar los posibles rastros de peróxido de hidrogeno que quedasen

entre la bentonita, esta se lavó empleando 200 mL de agua destilada, después se decantó y filtró la suspensión para terminar con el secado en la estufa a 110 °C durante 24 h (Sellaoui et al., 2018). Para una mayor efectividad en el secado se controló el peso y su variación, cuando las 24 h estuvieron por terminar se realizó la revisión en lapsos de 1 h, de este modo asegurando que la bentonita se encontraba seca y apta para proceder con la activación.

3.1.2. Activación de la Bentonita Sódica. Para la activación de la bentonita, se adquirió cloruro de sodio (NaCl) de Delta Química S.R.L., de la cual para preparar una solución de 100 mL a 2 M, se pesaron 11.69 g para seguidamente colocarlos en un matraz aforado de 100 mL agregándose agua ultrapura y finalmente agitando hasta homogeneizar, después de ello, la solución de 100 mL de NaCl a 2 M y los 20 g de bentonita tamizada se vertieron en un beaker de 250 mL y este beaker se colocó en un agitador magnético donde se agito a 200 RPM por un periodo de 24 h.

Después de la activación se lavó la bentonita repetidamente con agua destilada hasta que el sobrenadante se encontró a un pH neutro, esto es muy importante debido a que si la bentonita se encuentra a un pH muy ácido no se formarán adecuadamente las perlas; siguiendo con el secado, la bentonita se colocó en una estufa a 60 °C por un periodo de 24 h (Rosas et al., 2014).

3.1.3. Formación de Perlas por Gelificación. Para formar las perlas por gelificación, primero se preparó una solución de alginato de sodio al 2 %, esto se realizó pesando 2 g de alginato de sodio y seguidamente se añadió a un matraz aforado de 100 mL donde se añadió agua ultrapura hasta completar los 100 mL, esta se agito vigorosamente hasta que la solución se homogeneizo, para después dejar la solución reservada en un refrigerador hasta el día siguiente con el objetivo de que el alginato se hidrate completamente y que cualquier burbuja de aire atrapada se disipe, ya preparada la solución de alginato, se procedió a verter está en un beaker de

100 mL y a su vez se colocó este en una placa calefactora con agitador magnético con el objetivo de calentar la solución de alginato hasta los 50 °C, mientras se alcanzaba esta temperatura, se pesó 2 g de bentonita activada y los 18 g restantes se reservaron en un desecador para su posterior uso; cuando la solución alcanzó los 50 °C se insertó una pastilla magnética y se agitó a 300 RPM, seguidamente se añadieron los 2 g de bentonita en plena agitación y se dejó en este estado por 3 h hasta que se homogeneice, mientras esto sucedía, se iba preparando una solución de cloruro de calcio (CaCl_2) al 2 % para gelificar la suspensión de alginato – bentonita, esta se preparó pesando 2 g de cloruro de calcio y vertiendo esto en un matraz aforado de 250 mL, seguidamente se añadió agua ultra pura hasta completar los 250 mL y se agitó vigorosamente hasta homogeneizar la solución, terminado esto se vertió la solución de cloruro de calcio en un beaker de 250 mL y se reservó; cuando la suspensión alginato – bentonita ya se encontraba homogénea, esta se vertió en un bureta y se dejó caer el contenido gota a gota en el beaker que contenía los 250 mL de cloruro de calcio, mencionando además que esta se encontraba en un agitador magnético donde se sometió a una agitación suave de 200 RPM con el objetivo de que las perlas no se peguen entre sí, mientras se encuentran en el baño de gelificación; después de vaciarse el contenido de la bureta, se procedió a dejar las perlas recién formadas en un baño de gelificación en la solución de cloruro de calcio, esto por un periodo de 3 h, esto con el objetivo de que las perlas se formen adecuadamente y no se deshagan al usarlas en los análisis; terminado el baño de gelificación, las perlas se filtraron empleando un colador y desechando la solución de cloruro de calcio, seguidamente empleando agua destilada, se procedió con el lavado de las perlas en un beaker de 250 mL para eliminar los rastros de cloruro de calcio y finalmente las perlas fueron secadas en una estufa a 50 °C por un periodo de 48 h (Pawar et al., 2020); después

de secar las perlas, estas fueron sometidas a evaluación de su capacidad adsorbente, caracterización por FTIR y el resto se reservaron en un desecador para su posterior uso.

3.2. Caracterización de los Compósitos de Bentonita Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Mediante la Determinación de su Estructura y Composición Química

3.2.1. Caracterización por Espectroscopía FTIR. La caracterización por espectroscopía FTIR permitió obtener información sobre la estructura molecular y composición química de la bentonita activada y la bentonita inmovilizada en perlas, permitiendo identificar los grupos funcionales, enlaces químicos y permitiendo observar los cambios estructurales que existe en la superficie de la bentonita, después de ser inmovilizada en perlas. Esta se realizó siguiendo un procedimiento basado en la formación de la pastilla de bromuro de potasio (KBr), este consto de primero tener KBr previamente secado en un horno o almacenado en un desecador, asimismo la muestras a analizar, tanto la bentonita activada como las perlas, fueron secadas en una estufa a 70 °C por 1 h, seguidamente la bentonita y las perlas fueron trituradas y mezcladas con KBr y se prensaron en cada caso, después del prensado que se realizó por menos de 1 min, se procedió a extraer la pastilla formada, mencionando además que previo a esto se realizó un blanco que consto de únicamente KBr, las pastillas formadas en cada caso fueron llevadas al espectrómetro FTIR y fueron analizadas.

3.3. Determinación de la Capacidad Adsorbente de la Bentonita Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico en Agua Sintética por el Método ICP-MS

3.3.1. Desarrollo de Corridas Experimentales. De acuerdo con el diseño experimental, se preparó una solución madre de arsénico a 2 ppm, seguidamente en beakers se prepararon 17 soluciones de 30 mL para analizar considerando los valores de dosis de adsorbente, tiempo de contacto y velocidad de agitación de 2, 4 y 6 g/L; 30, 60 y 90 min; 150, 200 y 250 RPM

respectivamente, esto teniendo en consideración que se estableció como parámetro inicial el pH de 5 (Mutar & Saleh, 2022), preparadas las muestras y siguiendo la matriz de diseño experimental detallada en la Tabla 9 se procedió con la determinación de arsénico empleando el método ICP – MS para conocer la cantidad de arsénico removido, el cual por tema de disponibilidad no se realizó en la Universidad Católica Santa María, sino que se mandó a analizar. El análisis de las muestras determinó el nivel de arsénico en la solución antes y después del tratamiento.

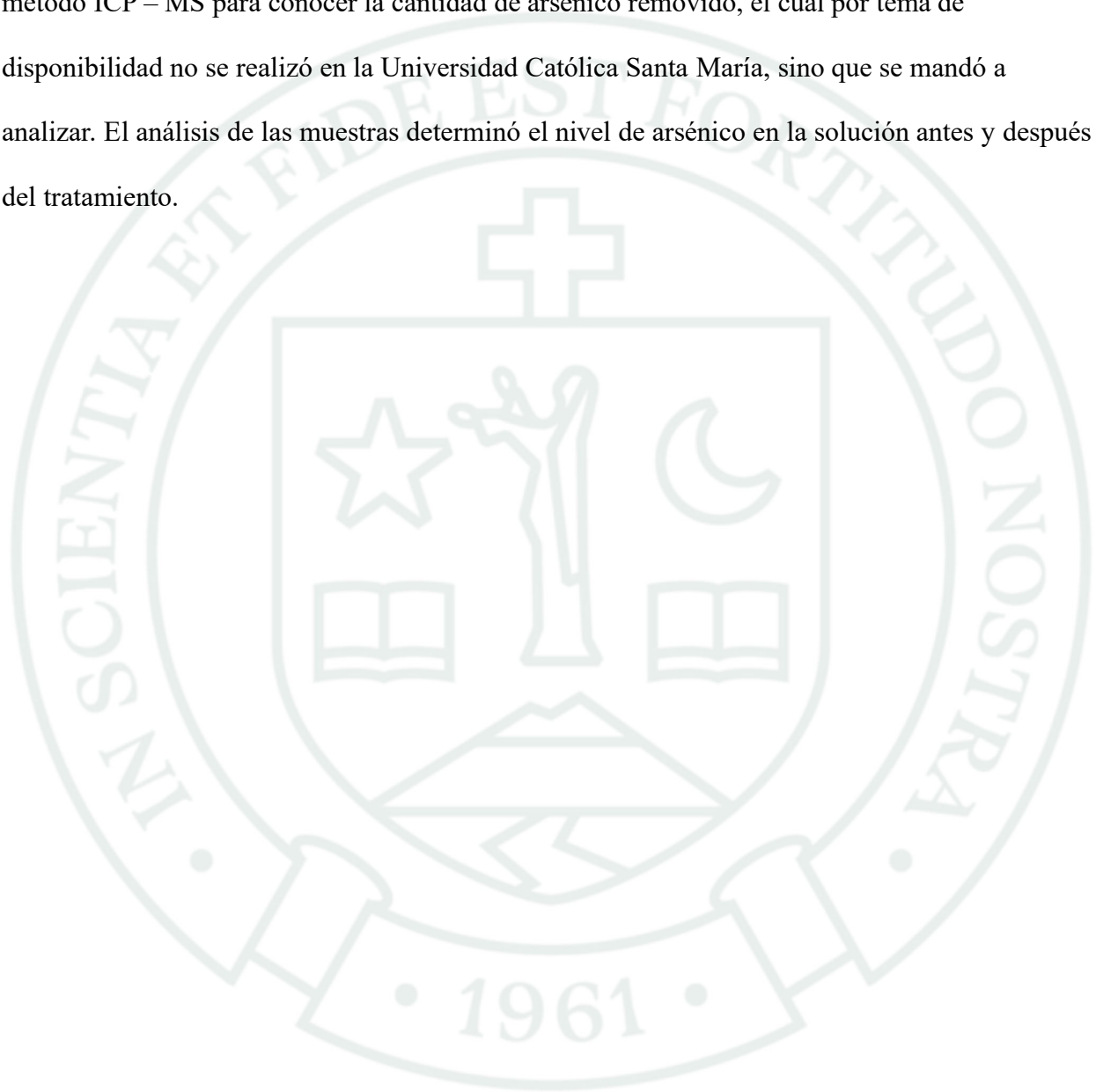


Tabla 9*Matriz de diseño experimental*

N° de pruebas	Variables Naturales			Variable de respuesta
	Dosis de adsorbente (g/L)	Tiempo de contacto (min)	Velocidad de agitación (RPM)	Porcentaje de remoción (%)
1	2	90	200	R1
2	6	90	200	R2
3	4	60	200	R3
4	4	60	200	R4
5	4	90	150	R5
6	4	60	200	R6
7	6	60	250	R7
8	2	60	250	R8
9	4	30	150	R9
10	4	90	250	R10
11	4	30	250	R11
12	2	30	200	R12
13	2	60	150	R13
14	6	30	200	R14
15	6	60	150	R15
16	4	60	200	R16
17	4	60	200	R17

3.4. Determinación de las Condiciones Favorables de Adsorción de la Bentonita Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico en Agua Sintética Empleando el Método de Superficie de Respuesta Box Behnken

3.4.1. Determinación de Condiciones Favorables por Análisis Box Behnken. Para realizar la optimización del modelo se deberán ingresar los resultados de las corridas experimentales en el software Design Expert 12, en este mismo se ejecutaron los análisis para poder establecer la ecuación y el modelo que más se adecua a los resultados, después de analizar los datos, se procedió con la optimización, donde se buscó que se maximizara la variable de respuesta (porcentaje de remoción) al mismo tiempo que se minimizan factores como la dosis de adsorbente y el tiempo de contacto.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN



1. Caracterización de la Bentonita Activada y la Bentonita Inmovilizada en Perlas de Alginato de Sodio

En la caracterización de la bentonita activada y la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de sodio se empleó el método FTIR, del cual se obtuvo como resultados.

1.1. FTIR de Bentonita Activada con NaCl (2 M)

Al analizar la bentonita activada con NaCl a concentración 2 M se identificaron las siguientes bandas con picos característicos detallados en la **Tabla 10**.

Tabla 10

Picos del espectro FTIR de la bentonita activada

Posición	Intensidad
417.859	31.211
602.891	21.601
669.938	18.835
712.417	29.378
875.078	8.065
1139.152	0.518
1428.579	0.698
1620.895	10.589
1685.242	28.639
1798.460	43.797
2512.493	65.890
2874.034	73.867
2982.410	75.015

3404.428	6.636
3548.319	11.055

En estos resultados se puede observar que el espectro que se registra en la región que se comprende entre 4000 y 400 cm^{-1} existen bandas características propias de vibraciones que generan los enlaces químicos de una estructura mineral.

Las bandas con picos significativos se presentaron en:

Bandas anchas en 3404 y 3548 cm^{-1} ; estiramiento del grupo –OH que es asociado al agua interlaminar.

Banda en 1620 cm^{-1} ; flexión del agua que confirma la humedad superficial.

Picos en 2874 y 2982 cm^{-1} ; estiramiento de grupos C–H que indica que hay pequeñas cantidades de materia orgánica.

Bandas intensas en 602, 669 y 712 cm^{-1} ; la región de silicatos cuyas bandas se asocian con vibraciones de flexión de los enlaces Al–O–Si y Si–O–Si y que indican una estructura laminar preservada.

Pico en 1428 y banda 875 cm^{-1} ; indican la presencia de residuos de carbonato e impurezas remanentes del material.

Las bandas características presentadas en el análisis FTIR de la bentonita activada con NaCl (2M) indican que, en el procedimiento de activación, este material no se modificó drásticamente, tanto en el pretratamiento como en la activación como tal, ello se evidencia en la presencia de humedad interlaminar, materia orgánica residual e impurezas propias de la bentonita, mencionando también que se preservó parcialmente el marco estructural del silicato.

1.1.1. Comparación de Resultados con Otras Investigaciones. La aplicación de una activación (sódica) que no genere cambios tan drásticos en la estructura de la bentonita, si bien no permite la identificación directa del cloruro de sodio (NaCl) en la caracterización por FTIR, si se pueden observar algunas características como el hecho que no exista una alteración de la red cristalina principal, ya que se pueden apreciar enlaces Si – O o Al – O de la estructura laminar de la bentonita; la activación con una sal, a diferencia de otros tipos de activaciones como la ácida o la térmica, no se centra en la modificación drástica de la estructura cristalina o química superficial de la bentonita , sino que esta se enfoca más en el intercambio iónico, la dispersión y desagregación de esta, ya que al mejorar estas características es capaz de aumentar indirectamente el área superficial accesible, mismo por lo cual se considera un tipo de activación más sencilla y efectiva que otorga estabilidad y dispersión de la bentonita en el agua (Giannini et al., 2011).

Comparando los hallazgos de Rosas et al. (2014) con los de esta investigación, se pueden validar los resultados favorables de la activación sódica de la bentonita de esta investigación, ya que al usar cloruro de sodio (NaCl) a concentración 2 M como activador, los investigadores obtuvieron un aumento significativo de la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla natural que le permitió a esta aumentar su capacidad de remoción y consecuencia, aumentar su porcentaje de remoción de níquel (II), alcanzando el 91.9 % de remoción; los resultados de la activación sódica puede compararse también con otros como los de la activación ácida, la cual si bien ha demostrado resultados favorables en la remoción de metales pesados de agua contaminada mediante la modificación de propiedades estructurales y texturales de materiales arcillosos, como lo demostraron Pawar et al. (2020) en su investigación en la cual mediante la activación ácida de la bentonita y su posterior inmovilización en perlas de alginato lograron

remover hasta el 96 % de plomo, los reactivos necesarios en comparación con los necesarios para la activación sódica, son mucho más costosos, siendo también que al ser reactivos controlados el acceso a estos puede llegar a ser un factor limitante, además de ello, en la investigación mencionada los resultados del FTIR de la bentonita activada con ácido mostro que algunos de los grupos funcionales presentes en la bentonita cruda, seguían estando en la bentonita activada, lo cual demostró que esta activación no destruye completamente la estructura original.



1.2. FTIR de Bentonita Activada Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio

Al analizar la bentonita activada inmovilizada en perlas de alginato de calcio se identificaron las siguientes bandas con picos característicos detallados en la **Tabla 11**

Tabla 11

Picos del espectro FTIR de la bentonita activada inmovilizada en perlas de alginato

Posición	Intensidad
402.703	70.006
417.129	75.215
424.356	73.331
464.385	76.439
616.645	76.234
712.760	77.081
875.797	66.263
1024.210	72.999
1427.752	44.464
1589.040	74.721
3223.673	83.061

En este análisis de FTIR se identificó un espectro en la región comprendida por 4000 – 400 cm^{-1} , el cual presenta bandas características propias que reflejan la presencia de bentonita y las perlas en las que fueron inmovilizadas, identificando grupos funcionales presentes en una matriz adsorbente y los cuales se relacionan directamente con la capacidad de interacción y retención de contaminantes como el arsénico.

Las bandas con picos significativos se identificaron en:

Banda ancha en 3223 cm^{-1} ; estiramiento en el grupo –OH presente en la bentonita y los grupos funcionales del alginato, esto indica una alta capacidad de formar puentes de hidrogeno.

Banda en 1590 cm^{-1} ; vibraciones asimétricas del grupo –COO⁻ que confirma la incorporación del alginato en la matriz.

Pico en 1024 cm^{-1} ; estiramiento característico de Si–O–Si que indica que la estructura mineralógica de la bentonita se ha preservado.

Picos en 616 y 712 cm^{-1} ; flexión en los enlaces Al–O–Si y Si–O–Si que indican y confirman la preservación de la estructura inorgánica de la bentonita activada.

Picos en 402 y 464 cm^{-1} ; corresponden a modos de vibración de enlaces metálicos que indican la capacidad del material de participar en mecanismos de adsorción por intercambio iónico.

Las bandas características identificadas y sus picos significan que la inmovilización se realizó satisfactoriamente y el alginato se integró adecuadamente a la bentonita activada, preservando la estructura de esta; esta integración juega un papel fundamental en la aplicación de las perlas debido a que el alginato permite que las perlas tengan una superficie compacta que preserve la estructura interna porosa y robusta de la bentonita (Baigorria et al., 2020). Además, la presencia de grupos funcionales como –OH, –COO⁻ y Si–O–Si, implica que en el material existe

un sistema adsorbente con múltiples mecanismos de interacción, como intercambio iónico, complejación superficial o asimismo adsorción física mediante los enlaces de hidrogeno o fuerzas de Van der Waals, estos mecanismos posicionan a la bentonita activada inmovilizada en perlas de alginato, como un material con gran capacidad para retener especies arsenicales, en medios acuosos con pHs ligeramente ácidos (Pawar et al., 2020).

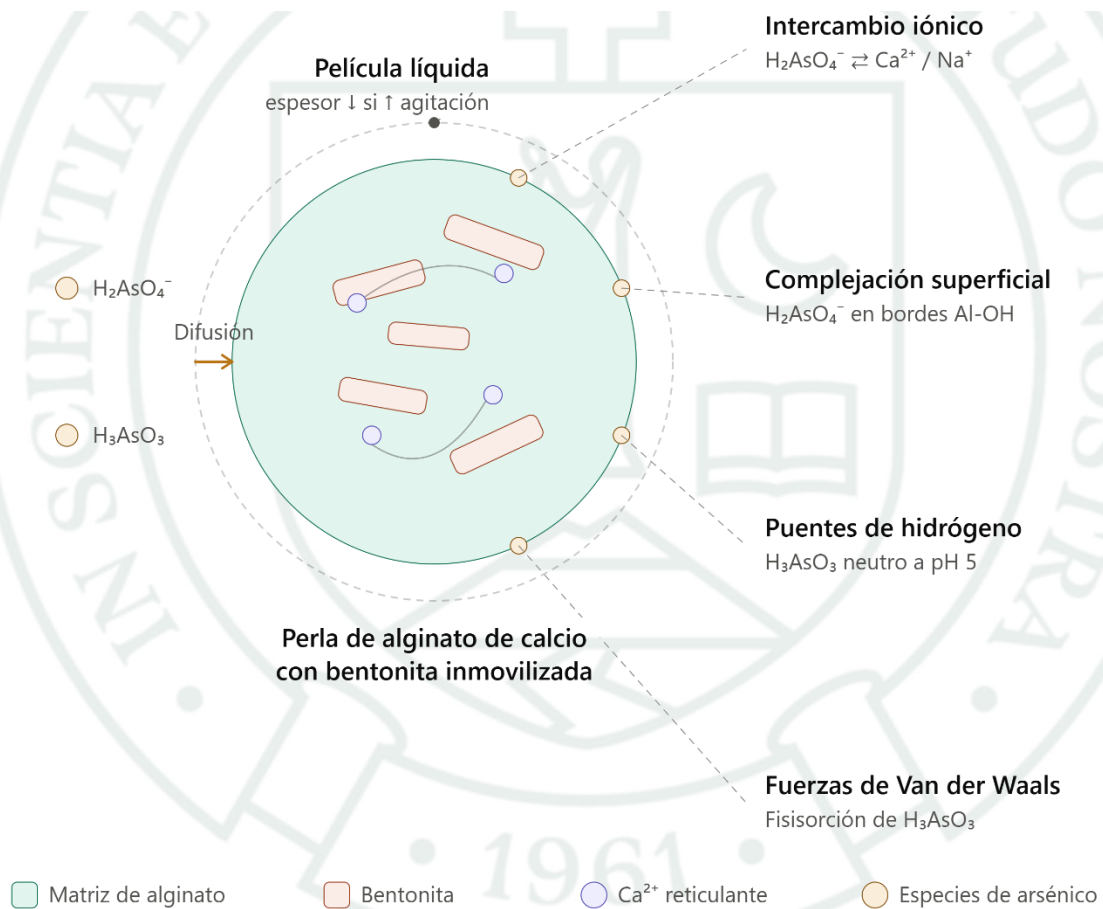
1.2.1. Comparación de Resultados con Otras Investigaciones. La inmovilización de la bentonita se puede observar en la integración del alginato, en el FTIR los picos de las bandas típicas identificadas se asemejan a lo reportado en otras investigaciones en las cuales también se utilizó la inmovilización en perlas de alginato, como en la investigación desarrollada por Baigorria et al. (2020) ya que las bandas presentadas en el FTIR de esta investigación como la banda ancha en 3223 y 1590 cm^{-1} se asemejan a los 3300 y 1600 cm^{-1} que representan el estiramiento del grupo $-\text{OH}$ presente en la bentonita y los grupos funcionales del alginato; mostrando también que la inmovilización de la bentonita es capaz de mejorar las capacidades adsorbentes del material, logrando una remoción de arsénico superior al 90 %.

Los mecanismos que favorecen la adsorción de arsénico mediante las perlas sintetizadas involucran interacciones físicas y químicas, estas interacciones entre las perlas y el arsénico inician con el desplazamiento de los aniones de arsénico hacia la fina capa líquida que rodea la perla, atravesando esta barrera por difusión molecular gracias a una óptima velocidad de agitación, después, por las fuerzas de Van der Waals, las moléculas hidratadas de arsénico son atraídas y atraviesan los macro y mesoporos del gel que rodea la bentonita donde se forman los enlaces de hidrógeno actuando como puntos de anclaje temporales, manteniendo así una fracción del arsénico en la matriz polimérica antes que llegue a la bentonita, cuando alcanza la superficie de la bentonita, en los bordes de esta, las moléculas de arsénico se acercan y desplazan

electrostáticamente a iones competidores o hidroxilos débiles por el intercambio iónico, finalmente al romper por completo su capa de hidratación, el arsénico, reacciona directamente con la bentonita, por medio de la complejación superficial, el arsénico desplaza químicamente a los grupos hidroxilo o moléculas de agua estructurales de la bentonita formándose los enlaces covalentes.

Figura 3

Mecanismos de adsorción de la bentonita para el arsénico



2. Evaluación de la Capacidad Adsorbente de la Bentonita Activada Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico

Siguiendo el diseño Box Behnken propuesto y habiéndose realizado las corridas experimentales, se obtuvieron los resultados representados en la **Tabla 12**.

De las corridas experimentales se obtuvo:

Remoción máxima; 99.94 % de remoción en muestra empleando bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio bajo una dosis de adsorbente de 4g/L, tiempo de contacto de 90min y velocidad de agitación de 150RPM (**Tabla 13**).

Control; en la muestra control se alcanzó un 31.29 % de remoción empleando bentonita activada con NaCl bajo una dosis de adsorbente de 2g/L, tiempo de contacto de 60min y velocidad de agitación de 250RPM (**Tabla 21**).

Disminución de eficiencia; se observó una diferencia del 82 % en la remoción en los casos en los que se empleó una dosis de adsorbente de 6g/L y una agitación superior a los 200RPM.

Tabla 12*Resultados de las corridas experimentales de la bentonita inmovilizada en perlas de alginato*

N° de pruebas	Variables Naturales			Variable de respuesta
	Dosis de adsorbente (g/L)	Tiempo de contacto (min)	Agitación (RPM)	Porcentaje de remoción (%)
1	2	90	200	99.88
2	6	90	200	73.7
3	4	60	200	96.21
4	4	60	200	99.3
5	4	90	150	99.94
6	4	60	200	98.5
7	6	60	250	0.7
8	2	60	250	7.85
9	4	30	150	96.73
10	4	90	250	1.87
11	4	30	250	0.06
12	2	30	200	99.85
13	2	60	150	99.91
14	6	30	200	66.58
15	6	60	150	81.17
16	4	60	200	96.35
17	4	60	200	98.3

Tabla 13

Corrida experimental de bentonita inmovilizada en perlas de alginato con mayor porcentaje de remoción

Dosis de adsorbente (g/L)	Tiempo de contacto (min)	Agitación (RPM)	Porcentaje de remoción (%)
4	90	150	99.94

Los resultados indican que se logró un porcentaje de remoción máximo del 99.94 % con la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio bajo condiciones de dosis de adsorbente, tiempo de contacto y agitación de 4g/L, 90min y 150RPM respectivamente, además de un pH de 5, lo cual al comparar con el control (bentonita activada) que logró un porcentaje máximo de remoción del 31.29 % bajo condiciones de cantidad de adsorbente de 2g/L, tiempo de 60 min y velocidad de agitación de 250RPM, demuestra que la inmovilización es capaz de mejorar las capacidades adsorbentes de la bentonita activada.

En los resultados también se puede observar una clara variación en la remoción al variar la velocidad de agitación, esto se puede explicar por la cinética de adsorción y la transferencia de masa, ya que en la fase en la que el ion de arsénico se mueve desde la solución hasta la capa que rodea la superficie de la perla, la velocidad de agitación se destaca como un factor determinante, ya que un incremento moderado en la velocidad de agitación reduce el espesor de la película líquida que rodea las perlas y favorece el transporte de iones de arsénico hacia los sitios activos evitando que estos se saturen; por otro lado, la reducción de la eficiencia al aumentar la velocidad de agitación se explica debido a que velocidades excesivas generan turbulencia que puede afectar la integridad de las perlas provocando una desorción parcial, lo cual significa que,

una velocidad de agitación moderada minimiza la resistencia de la película líquida, evita daños en las perlas y mantiene una suspensión adecuada que permita el contacto y difusión de los iones, mientras que una velocidad de agitación excesiva tiene el efecto contrario y provoca una desorción parcial que se traduce en bajos porcentajes de remoción (Matus et al., 2011).

Considerando que los resultados se vieron favorecidos por la variación de la velocidad de agitación y la preservación de la integridad de las perlas, se pueden identificar limitantes claras, como la de su aplicación en entornos reales, mismo por lo cual se debería evaluar su desempeño en un entorno real fuera del laboratorio, además de ello también se debería estudiar la estabilidad mecánica de las perlas y su comportamiento con diferentes especies de arsénico a pHs diferentes donde se podría evaluar también como es la interacción con otras especies que podrían existir en esas muestras reales de agua contaminada.

2.1. Comparación de Resultados con Otras Investigaciones

Los resultados obtenidos al evaluar la capacidad adsorbente de la bentonita modificada para mejorar sus propiedades adsorbentes y remover arsénico del agua, posiciona a este tipo de arcilla como un material eficiente y económico capaz de abordar la contaminación del agua con metales pesados; comparando los resultados de esta investigación con los de otras, podemos identificar que existen distintas modificaciones de la bentonita que le permiten a esta adaptarse a otros contaminantes obteniendo resultados favorables, como en la investigación desarrollada por Barakan et al. (2020) en la que modificaron bentonita, impregnándola con Fe(III) para remover arsénico pentavalente logrando una eficiencia de adsorción de hasta el 99 % empleando una dosis de adsorbente de 2g/L, un pH óptimo entre 6 – 8 y una concentración de As(V) de 10mg/L, Baigorria et al., (2020) realizaron otra modificación en la cual emplearon perlas de hidrogel de alcohol polivinílico ecológico y alginato para inmovilizar bentonita y remover arsénico de agua

contaminada, logrando porcentajes de remoción por encima del 90 % en un periodo largo de más de 12 h; por otro lado, además de resultados favorables respecto a la capacidad adsorbente de la bentonita modificada, también existen resultados que demuestran que estos materiales son aptos para su recuperación y posterior reutilización, en la investigación desarrollada por (Pawar et al., 2020) demostraron la viabilidad operativa de las perlas de bentonita – alginato, reutilizándolas y encontrando que la reducción de su capacidad adsorbente fue de solo un 10 % después de 5 ciclos, confirmando la ventaja crucial que ofrece la inmovilización de la bentonita. La comparativa establecida, demuestra que la inmovilización de material adsorbente, como la bentonita, en perlas de alginato es capaz de lograr una remoción cercana al 100 %, siendo este un material que puede ser insertado y recuperado con relativa facilidad; sin embargo, aun contando con las ventajas mencionadas anteriormente, se deben realizar más pruebas para su aplicación en campo, por lo cual este material se posiciona como un material adsorbente de bajo costo con el potencial de contribuir a la remediación de medios acuáticos contaminados con metales pesados como el arsénico.

3. Determinación de las Condiciones Óptimas de Adsorción de la Bentonita Activada Inmovilizada en Perlas de Alginato de Calcio Para Arsénico

3.1. Análisis

En la optimización se empleó el diseño Box Behnken, en el software estadístico Design Expert 12, en el cual se tomaron en cuenta las variables y los niveles máximos y mínimos establecidos para la investigación presentados en la **Tabla 14**.

Tabla 14

Codificación de los valores mínimos y máximos de cada factor establecido en Design Expert

Factor	Nombre	Unidades	Tipo	Mínimo	Máximo	Medio
A	Dosis de adsorbente	g/L	Numérico	2	6	4
B	Tiempo	min	Numérico	30	90	60
C	Agitación	RPM	Numérico	150	250	200

Siguiendo con la evaluación, después de obtener los resultados, se realizó el análisis donde primero se analizó los términos del modelo estadístico, en esta se evaluaron los efectos del modelo (lineal, interacción y cuadrático).

Tabla 15

Términos modelo determinados por Design Expert

Termino	Error Estándar	VIF	R ²	Poder
A	0.3536	1	0	68.1 %
B	0.3536	1	0	68.1 %
C	0.3536	1	0	68.1 %
AB	0.5000	1	0	40.8 %
AC	0.5000	1	0	40.8 %
BC	0.5000	1	0	40.8 %
A ²	0.4873	1.00588	0.0058	93.8 %
B ²	0.4873	1.00588	0.0058	93.8 %
C ²	0.4873	1.00588	0.0058	93.8 %

Se evaluaron los efectos de los modelos lineal, interacción y cuadrático (**Tabla 15**) basándose en los resultados obtenidos en las corridas experimentales, obteniendo que los términos cuadráticos (A², B² y C²) presentan una mayor potencia estadística (93.8 %), indicando que un enfoque centrado en términos cuadráticos describe con mayor precisión el comportamiento del sistema, además de no existir problemas por colinealidad (VIF).

Tabla 16*Resumen del ajuste determinado por Design Expert*

Source	p-valor Secuencial	p-valor Falta de ajuste	R ² Ajustado	R ² Predicho
Linear	0.0018	< 0.0001	0.5971	0.4397
2FI	0.9965	< 0.0001	0.4790	-0.1535
Quadratic	< 0.0001	0.0024	0.9818	0.8767
Cubic	0.0024		0.9989	

Confirmando lo mencionado anteriormente con el enfoque centrado en términos cuadráticos, lo que se muestra en la **Tabla 16**, indica que el modelo más adecuado es el modelo cuadrático debido a que presenta un p-valor secuencial extremadamente bajo de < 0.0001, esto indica que la adición de términos cuadráticos mejora drásticamente la capacidad predictiva del modelo, además de ello presenta un R² ajustado muy alto de 0.9818 indicando que este modelo es capaz de explicar la variabilidad, asimismo con un R² predicho aceptable de 0.8767, indica que este modelo es capaz de predecir nuevas observaciones o resultados de las corridas experimentales.

Si bien este modelo presenta un p-valor de falta de ajuste significativamente alto (0.0024), la combinación de los otros indicadores y la inviabilidad del resto de modelos, lo hacen la mejor opción para la optimización del proceso de remoción.

Teniendo en consideración la elección del modelo cuadrático, se realizó el ANOVA para este modelo, que se observa en la **Tabla 17**.

Tabla 17

ANOVA para el modelo cuadrático determinado por Design Expert

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F-valor	p-valor
Modelo	2.62	9	0.2915	96.90	< 0.0001
A-Dosis de adsorbente	0.0910	1	0.0910	30.26	0.0009
B-Tiempo	0.0019	1	0.0019	0.6153	0.4585
C-Agitación	1.69	1	1.69	560.40	< 0.0001
AB	0.0013	1	0.0013	0.4177	0.5387
AC	0.0034	1	0.0034	1.12	0.3258
BC	0	1	0	0.0163	0.9020
A ²	0.0236	1	0.0236	7.84	0.0265
B ²	0.0116	1	0.0116	3.85	0.0906
C ²	0.7727	1	0.7727	256.82	< 0.0001
Residual	0.0211	7	0.0030		
Falta de ajuste	0.0203	3	0.0068	35.63	0.0024
Error Puro	0.0008	4	0.0002		
Cor Total	2.64	16			

El análisis del ANOVA nos indica que:

El modelo cuadrático con p-valor de <0.0001; este modelo es estadísticamente significativo para predecir el porcentaje de remoción de arsénico.

A, C, A^2 y C^2 con p-valor <0.05 ; indica que la dosis de adsorbente (A) y la velocidad de agitación (C) influyen significativamente en la remoción de arsénico tanto en sus efectos lineales como los cuadráticos.

Interacciones con p-valor <0.05 ; indican que las interacciones en los factores AB, AC y BC no influyen significativamente en la remoción de arsénico.

Si bien existe una ligera falta de ajuste, la robustez general del modelo y la significancia de los factores clave respaldan su validez para que el modelo sea empleado para la optimización.



Para la validación del modelo estadístico de regresión obtenido en el diseño Box Behnken, se realizaron la gráfica de probabilidad normal de los residuos (**Figura 4** *Grafica normal de residuos*) y la de valores predichos vs actuales (**Figura 5** *Grafica de valores predichos vs valores actuales*).

Figura 4

Grafica normal de residuos

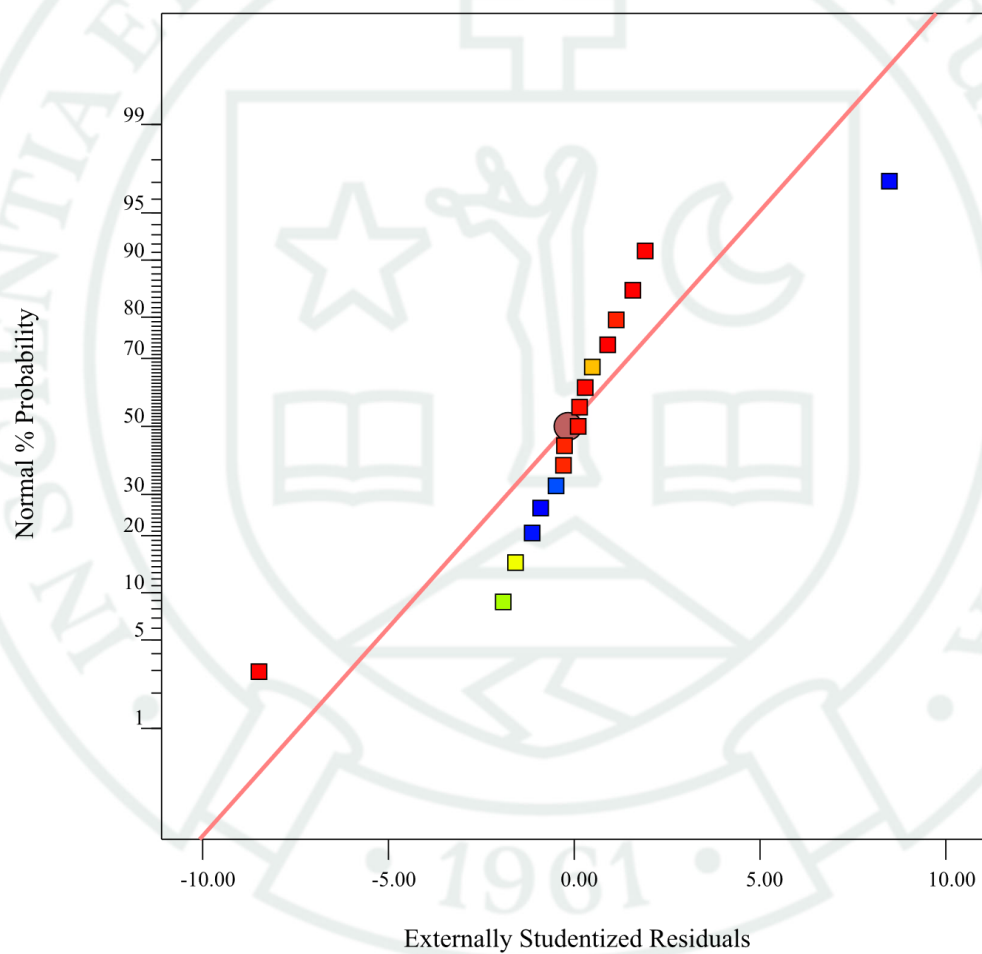
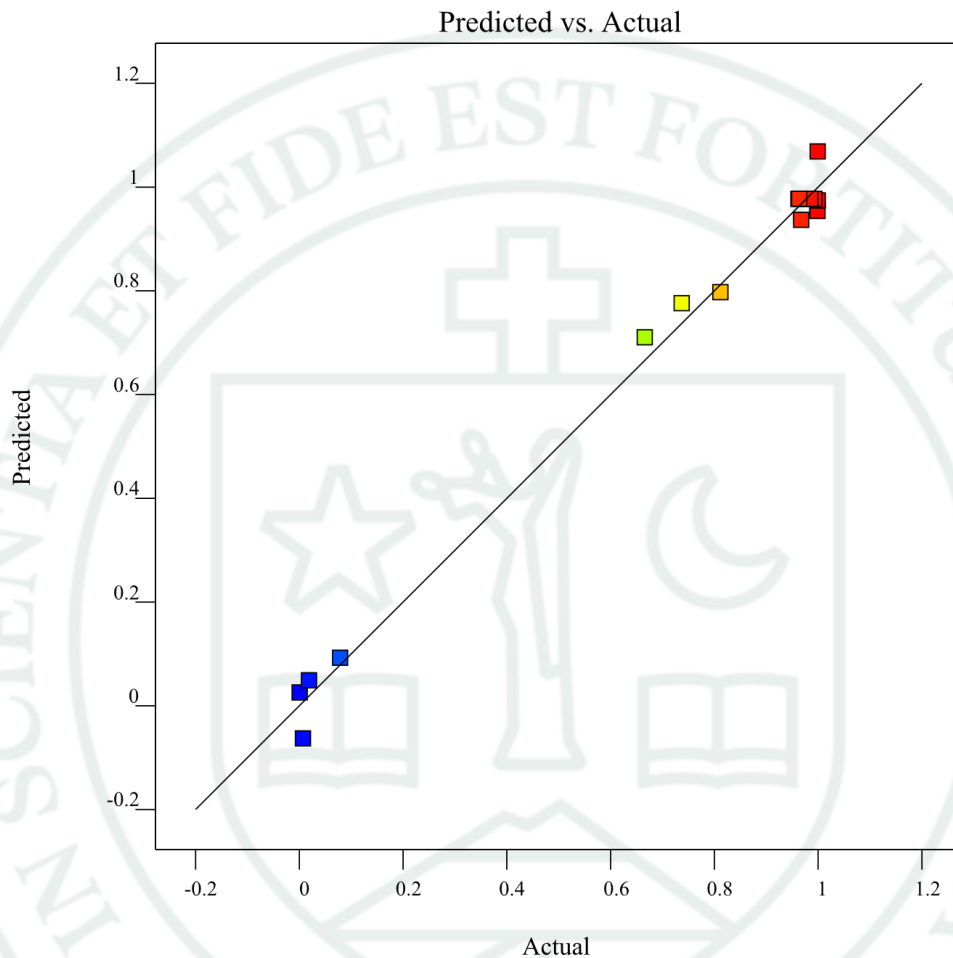


Figura 5

Grafica de valores predichos vs valores actuales



En la gráfica normal de residuos (**Figura 4**

Grafica normal de residuos) se muestra que la mayoría de los puntos, se alinean de manera cercana a la recta diagonal, indicando que los residuos del modelo se distribuyen aproximadamente de manera normal, si bien se pueden apreciar ligeras desviaciones en los extremos de la línea, estas no son lo suficientemente pronunciadas como para invalidar por completo el modelo y su cumplimiento de la normalidad. Los colores que van desde el rojo hasta

el azul representan los valores reales del porcentaje de remoción de arsénico, siendo que los rojos y cercanos a este color serían los que presentaron una mayor remoción, mientras que los más cercanos al azul son los que presentaron los menores valores. El cumplimiento de este supuesto es fundamental, ya que valida la fiabilidad de las pruebas de significancia estadística obtenidas en el análisis de varianza (ANOVA).

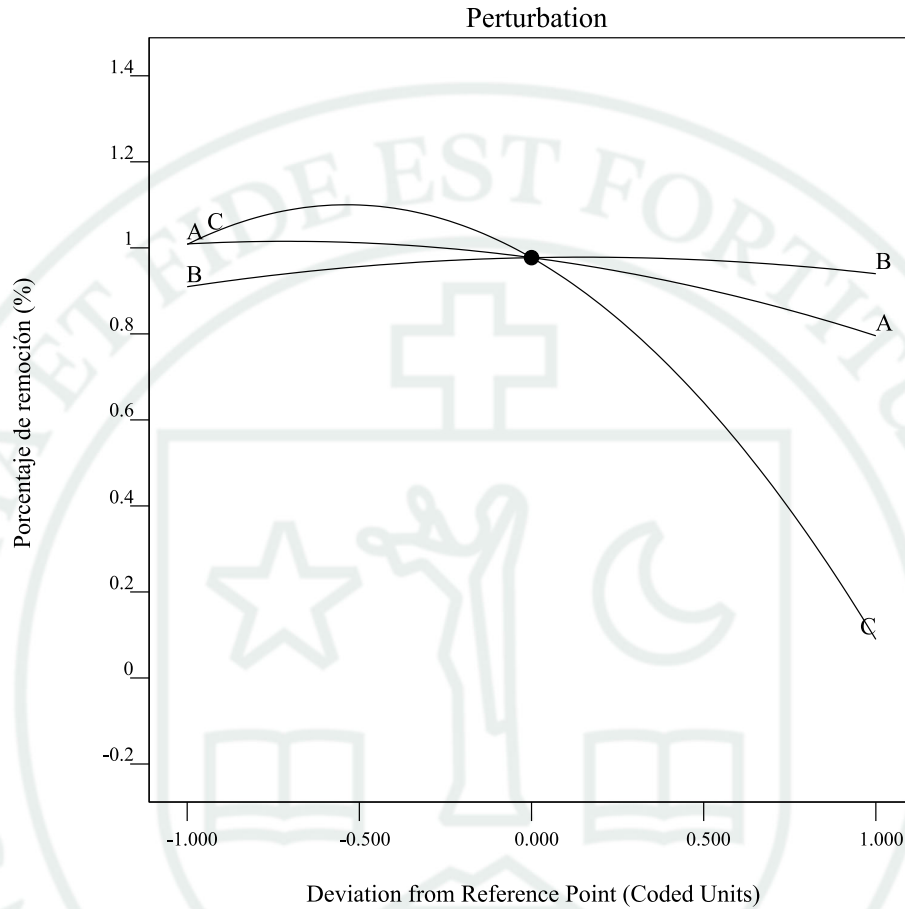
La grafica de valores predichos vs actuales (**Figura 5**

Grafica de valores predichos vs valores actuales), complementa lo mencionado anteriormente, ya que muestra la relación entre los valores de porcentaje de remoción predichos por el modelo y los valores que se obtuvieron experimentalmente, en esta grafica se observa que los puntos se agrupan alrededor de la línea de 45 grados, reforzando con la premisa de que este modelo cuadrático posee una excelente capacidad predictiva.

El análisis de ambas graficas valida de manera robusta la fiabilidad del modelo cuadrático para la variable de respuesta (% de remoción), ya que al tener una normalidad aceptable que asegure la solidez estadística de los análisis y una estrecha correlación entre los valores predichos y reales, confirma la alta capacidad del modelo para predecir con precisión la variable de respuesta.

Figura 6

Grafica de perturbación



De acuerdo con el ANOVA, los factores lineales (A y C) tienen influencia sobre la variable de respuesta (% de remoción), por lo cual con el objetivo de estudiar a profundidad esto y validar ello, se analizó la gráfica de perturbación (**Figura 6** *Grafica de perturbación*).

La gráfica de perturbación muestra como el porcentaje de remoción se ve significativamente afectado al alterar el valor del factor C (velocidad de agitación) desde su punto de referencia (centro del diseño), mientras que en el caso del factor A (dosis de adsorbente)

presenta una ligera alteración y en factor B (tiempo de contacto) se mantiene casi sin alteraciones.

El factor C (agitación), presenta una curva con la pendiente más pronunciada, la cual aumenta a medida que este factor llega a su nivel más alto (+1), mostrando una reducción en el porcentaje de remoción, esto indica que la agitación es el factor que tiene el efecto más significativo sobre el porcentaje de remoción, mientras que en el caso del factor A (dosis de adsorbente) al tener una curva menos pronunciada, esto indica que si bien la variación de la dosis de adsorbente tiene influencia en el porcentaje de remoción, este no es tan significativo como lo es la velocidad de agitación; por otro lado, el factor B (tiempo de contacto), al ser la más plana de las 3 indica que su alteración no tiene un impacto realmente significativo en el porcentaje de remoción, lo cual coincide con lo señalado en el ANOVA

La grafica de perturbación (**Figura 6** *Grafica de perturbación*) reveló que la agitación es el factor dominante en el porcentaje de remoción, por lo cual, para maximizar este porcentaje, teniendo en consideración que el modelo cuadrático es el que mejor responde en la predicción de los resultados, la velocidad de agitación debe ser manipulada con cuidado.

3.2. Optimización

Al identificar el factor dominante (velocidad de agitación) en la variable de respuesta (porcentaje de remoción), se puede hacer la optimización. Ya que los factores A y B tienen una influencia inferior a la del factor C, se buscó reducir los valores de estos 2 factores en el software.

Tabla 18

Restricciones establecidas en Design Expert para optimización

Nombre	Unidades	Meta	Límite	Límite	Importancia
			Inferior	Superior	
A: Dosis de adsorbente	g/L	Minimizar	2	6	3
B: Tiempo	min	Minimizar	30	90	3
C: Agitación	RPM	Estar en rango	150	250	3
Porcentaje de remoción	%	Llegar a = 99.94	0.06	99.94	3

En la **Tabla 18** se muestran las restricciones que se asignaron en el design expert siendo que para el caso de los factores A y B, se buscó reducirlos, mientras que el porcentaje de remoción se estableció como el máximo dentro del límite establecido.

Tabla 19*Solución optimizada determinada por Design Expert*

Número	Dosis de adsorbente (g/L)	Tiempo (min)	Agitación (RPM)	Porcentaje de remoción estimado (%)	Deseabilidad
1	2	30	195.495	99.94	1

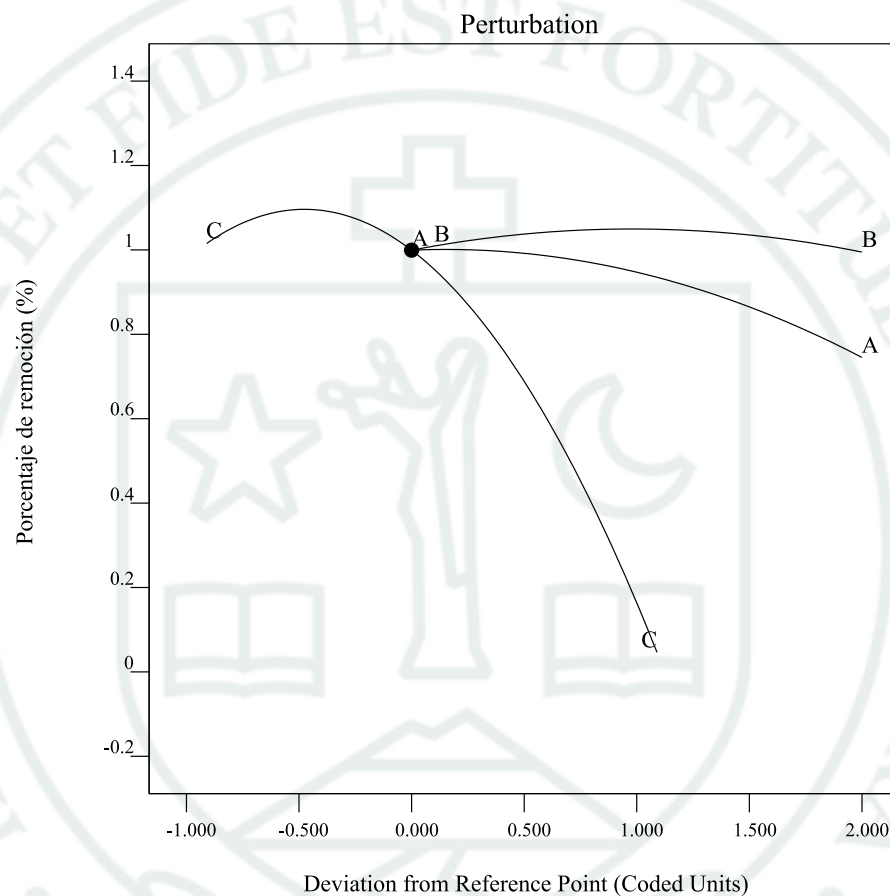
El software determinó que la combinación de los valores de dosis de adsorbente, tiempo y agitación que se observa en la **Tabla 19** es la que más se acercaba al 100 % de remoción minimizando la dosis de adsorbente y tiempo de contacto, presentando un 100 % de deseabilidad.

En esta se puede observar que el software estableció los valores mínimos para dosis de adsorbente y tiempo, mientras que para el caso de agitación que fue considerado como el factor más influyente en el porcentaje de remoción, tomo uno muy cercano al valor del medio (200).

Se observó el comportamiento de los factores después de la optimización analizando la gráfica de perturbación nuevamente.

Figura 7

Gráfica de perturbación después de la optimización



En la gráfica de perturbación posterior a la optimización (**Figura 7** *Gráfica de perturbación después de la optimización*) se observa que, teniendo el punto de referencia en el lugar que representa las condiciones óptimas (**Tabla 19**), el porcentaje de remoción varía de forma muy marcada cuando el factor C (velocidad de agitación) varía, indicando y remarcando que este factor es el más sensible y crítico para el porcentaje de remoción.

Además, los puntos óptimos para los factores A y B han sido seleccionados adecuadamente, ya que un aumento en estos factores más allá de los valores óptimos seleccionados no mejora el porcentaje de manera significativa, inclusive llegan a reducirlo, demostrando así que las condiciones óptimas establecidas permiten alcanzar un alto porcentaje de remoción con un uso eficiente y minimizado de la dosis de adsorbente y el tiempo.

Si bien el diseño Box-Behnken generalmente se desarrolla y representa mediante graficas 2D y 3D como las de contorno y las de superficie de respuesta que muestran visualmente como dos factores interactúan e influyen en la variable de respuesta, permitiendo visualizar el cambio que sufre la variable de respuesta (% de remoción de arsénico) en función de dos factores a la vez y su vez identificar las zonas de mayor o menor eficiencia, tanto en 2 como en 3 dimensiones (Yilmaz et al., 2018), en esta investigación en particular, como se pudo apreciar en el ANOVA (**Tabla 17**), las interacciones entre los factores no son estadísticamente significativas, ello se puede apreciar en la gráfica de contorno (**Figura 18**

Gráfica de contorno 2D de la remoción de arsénico en función de la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación) y la gráfica de superficie de respuesta (**Figura 21**

Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función de la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación), ya que para el caso de la gráfica de contorno que se basa en la interacción entre la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación, se muestran curvaturas concéntricas en los contornos que se deben principalmente a los términos cuadráticos de estos factores (A^2 y C^2) más no a sus interacciones, siendo que la velocidad de agitación tiene un mayor efecto en comparación a la dosis de adsorbente; del mismo modo, la gráfica de superficie de respuesta que se basa en la interacción entre la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación, evidencia que las interacciones no tienen un efecto significativo sobre la variable de

respuesta (% de remoción de arsénico) ya que si bien se aprecian curvaturas en el espacio tridimensional, estas se dan en gran parte por la modificación de la velocidad de agitación, mientras que la dosis de adsorbente presenta un efecto bastante inferior, siendo aún más evidente en la **Figura 22**

Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función del tiempo y la velocidad de agitación donde al incluir el tiempo de contacto en lugar de la dosis de adsorbente, la figura formada en el espacio tridimensional presenta una forma paraboloides ascendente, lo cual muestra un incremento progresivo del porcentaje de remoción de arsénico a medida que aumenta la velocidad de agitación llegando a un punto máximo cercano al 99.99 % en la zona roja de la gráfica, esta morfología confirma la existencia de un punto óptimo de las variables y que este se ve fuertemente influenciado por el efecto cuadrático de la velocidad de agitación.

El porcentaje máximo logrado del 99.94 % empleando el mínimo de dosis de adsorbente y tiempo de contacto con la optimización indica que la bentonita activada inmovilizada en perlas de alginato de calcio es un adsorbente con gran potencial para remover arsénico de medios acuosos que dependerá en gran medida de cómo se pueda impregnar este material con el adsorbente empleando una velocidad de agitación adecuada.

4. Potencial del material adsorbente

El material adsorbente evaluado en esta investigación presenta un alto potencial técnico para el tratamiento de agua de consumo. Por un lado, la bentonita como un biomaterial abundante, de bajo costo y con excelente afinidad por metales pesados y por otro lado, el alginato, un biopolímero, que, en combinación con el cloruro de calcio, potencia significativamente la capacidad adsorbente para arsénico. La principal ventaja de este material radica en su conformación en perlas, la cual supera la limitación operativa de usar bentonita en

polvo, previniendo la sobresaturación de filtros industriales y facilitando ampliamente la separación sólido-líquido tras el tratamiento. Esta configuración perfila a la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio como una potencial alternativa sostenible, eco-amigable y económicamente competitiva, considerando que se tiene como pendiente estudios de cinética y de propiedades mecánicas que permitan evaluar y validar el material en el mundo real.

5. Enfoque Ambiental

La remoción de arsénico a través de las perlas de bentonita-alginato representa una intervención directa para interrumpir el ciclo de exposición toxicológica en cuerpos de agua. Desde una perspectiva ecosistémica, el arsénico inorgánico disuelto presenta un alto riesgo de bioacumulación en el fitoplancton y biomagnificación a través de la red trófica acuática, afectando negativamente la biodiversidad y la calidad de los suelos agrícolas cuando el agua es utilizada para riego. Al inmovilizar el contaminante en la matriz polimérica, se mitiga de manera directa este riesgo ambiental. En cuanto a la salud pública, la alta eficiencia de remoción lograda (99.94 %) previene los graves cuadros de toxicidad crónica asociados a su ingesta continuada, tales como queratodermia, neuropatías y el desarrollo de patologías carcinogénicas (cáncer de piel, vejiga y pulmón), garantizando la protección de poblaciones vulnerables dependientes de estas fuentes hídricas.

No obstante, bajo un enfoque ambiental integral, es imperativo reconocer que el proceso de adsorción no destruye el contaminante, sino que supone una transferencia del contaminante, el arsénico pasa del medio líquido a concentrarse en la matriz sólida de la perla. Una vez que el material adsorbente alcanza su capacidad máxima y se satura, las perlas se transforman en un residuo sólido con características de peligrosidad debido a su alta concentración de toxicidad. La disposición inadecuada de estas perlas agotadas en vertederos comunes supondría un riesgo

inminente de lixiviación, donde el arsénico podría reincorporarse al suelo y percolar hacia aguas subterráneas bajo condiciones cambiantes de pH o degradación bacteriana del alginato.



CONCLUSIONES

Se acondicionó la bentonita mediante su activación con NaCl, obteniendo un material adsorbente con estructura laminar preservada y grupos funcionales activos, que a su vez es apto para la evaluación de su capacidad adsorbente de arsénico en agua sintética.

La caracterización confirmó la presencia de grupos -OH y -COO^- en la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio, así como también la preservación de su estructura mineral, evidenciando que el alginato se integró exitosamente y asimismo revelando que este material presenta múltiples mecanismos de adsorción (intercambio iónico, complejación superficial, enlaces de hidrogeno o. fuerzas de Van der Waals) que permitieron lograr los altos porcentajes de remoción obtenidos.

La bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio logró una remoción máxima de arsénico del 99.94 %, representando un aumento del 68.65 % de eficiencia respecto al 31.29 % de remoción máxima que se logró usando bentonita activada, de acuerdo con las mediciones por ICP-MS, además de ello la inmovilización también facilitó su recuperación.

El diseño de superficie de respuesta Box-Behnken determinó que la velocidad de agitación es la variable más influyente en la eficiencia de la remoción de arsénico, alcanzando el 99.94 % de remoción bajo condiciones óptimas de dosis de adsorbente de 2g/L, tiempo de contacto de 30 min y velocidad de agitación de 195.5RPM.

El método propuesto en la investigación es de bajo costo, con materiales accesibles cuya preparación es de baja dificultad y con potencial de aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico.

RECOMENDACIONES

En el proceso de síntesis de la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio, en la purificación de la bentonita cruda se deben considerar periodos más largos de reacción entre el peróxido de hidrogeno y la bentonita para obtener resultados que sean más precisos.

Para la activación de la bentonita, emplear otros métodos de activación como activación térmica o ácida y probar la efectividad de estos antes de la gelificación en perlas, ya que su desempeño podría variar en gran medida debido a los cambios drásticos que estos tienen en la estructura de la bentonita.

Caracterizar la bentonita empleando métodos más diversos que permitan estudiar en profundidad sus propiedades y predecir su rendimiento para diversas aplicaciones, estas pueden ser caracterizaciones morfológicas y estructurales como microscopia electrónica de barrido (SEM) o difracción de rayos X (DRX), así como también caracterizaciones químicas y superficiales que evalúen su capacidad de intercambio catiónico (CIC) o análisis elemental.

Realizar isotermas de adsorción para determinar el comportamiento del material y obtener la cantidad máxima de arsénico que el material puede retener en equilibrio, su afinidad, entender la homogeneidad de su superficie y también saber cuál es su mecanismo de adsorción, para que de este modo se pueda determinar, matemáticamente, la capacidad máxima de adsorción ($q_{m\acute{a}x}$) de la bentonita inmovilizada en perlas de alginato de calcio, ya que conocer este valor es fundamental para evaluar la viabilidad de escalar el proceso, permitiendo comparar la eficiencia del material sintetizado con otros adsorbentes que ya son comerciales y estandarizados.

Adaptar métodos de análisis más sencillos y baratos para analizar el arsénico presente en las muestras y reducir los costos de la investigación de modo que se puedan emplear más recursos en otros enfoques y variantes del método.

Para considerar una implementación de la técnica en condiciones reales, los análisis deben ser mejorados, considerando evaluar el desempeño de las perlas en muestras de agua real contaminada por arsénico, estudiar el efecto del pH y la influencia de las especies de arsénico, evaluar la regeneración y reutilización, realizar un análisis costo – beneficio y estudiar la estabilidad mecánica de las perlas, considerando que la resistencia de las perlas debe ser mejorada, considerando inclusive la combinación con otros materiales que provean de estas características a las perlas sin la necesidad de perder sus propiedades adsorbentes.

Se recomienda evaluar la viabilidad técnica de integrar este sistema de tratamiento en un modelo de economía circular mediante estudios de desorción. Aplicando soluciones eluyentes, es posible liberar el arsénico retenido y regenerar las perlas de bentonita-alginato para múltiples ciclos de uso, prolongando su vida útil. A su vez, el arsénico concentrado y recuperado del eluyente debe ser purificado para explorar su potencial reúso industrial. El arsénico recuperado tiene aplicaciones comerciales de alto valor en la fabricación de semiconductores, en la industria del vidrio comercial como agente decolorante, y en la formulación de aleaciones especiales, transformando un residuo peligroso en una materia prima secundaria.

Para los escenarios donde la desorción o el reúso industrial del arsénico no sean técnica o económicamente factibles, se recomienda desarrollar protocolos de inmovilización del material agotado antes de su disposición final. Es crucial someter las perlas saturadas a pruebas de lixiviación para cuantificar su estabilidad química, posteriormente, se sugiere investigar técnicas de estabilización/solidificación, tales como la incorporación de las perlas con arsénico en

matrices de cemento, asfaltos o cerámicas para la industria de la construcción, esto garantizaría el encapsulamiento permanente del contaminante, anulando su movilidad hacia el medio ambiente y asegurando un cierre de ciclo seguro y responsable.



REFERENCIAS

- Abdelnaby, A., Abdelaleem, N. M., Elshewy, E., Mansour, A. H., & Ibrahim, S. saber. (2022). Application of Bentonite Clay, Date Pit, and Chitosan Nanoparticles as Promising Adsorbents to Sequester Toxic Lead and Cadmium from Milk. ResearchGate. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03353-w>
- Acarapi-Cartes, J., & Cornejo-Ponce, L. (2023). BENFEP Spheres: New Porous Adsorbent Material for Arsenic Removal from Natural Waters. Water, 15(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/w15162887>
- AGQ Labs Perú. (2025). Análisis de metales pesados. AGQ Labs Perú. <https://agqlabs.pe/analisis-de-metales-pesados/>
- Aprueban reglamento de la calidad de agua para consumo humano, DS-031-2010-SA, 29 (2010). <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/244805-031-2010-sa>
- Artioli, Y. (2008). Adsorption. En S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Eds.), Encyclopedia of Ecology (pp. 60-65). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00252-4>
- Ataee, M., Ahmadi-Jouibari, T., Noori, N., & Fattahi, N. (2020). The speciation of inorganic arsenic in soil and vegetables irrigated with treated municipal wastewater. RSC Advances, 10(3), 1514-1521. <https://doi.org/10.1039/C9RA08031G>
- ATSDR. (2015, marzo 12). Public Health Statement for Arsenic. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/PHS/PHS.aspx?phsid=18&toxid=3>
- ATSDR. (2023, mayo 19). Arsenic Toxicity.
- Baigorria, E., Cano, L. A., Sanchez, L. M., Alvarez, V. A., & Ollier, R. P. (2020). Bentonite-composite polyvinyl alcohol/alginate hydrogel beads: Preparation, characterization and their use as arsenic removal devices. Environmental Nanotechnology, Monitoring &

- Management, 14, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100364>
- Baigorria, E., Cano, L., Sapag, K., & Alvarez, V. (2021). Removal efficiency of As(III) from aqueous solutions using natural and Fe(III) modified bentonites. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 43(24), 3728-3741. Scopus.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1934559>
- Barakan, S., Aghazadeh, V., Samiee Beyragh, A., & Mohammadi, S. (2020). Thermodynamic, kinetic and equilibrium isotherm studies of As(V) adsorption by Fe(III)-impregnated bentonite. *Environment, Development and Sustainability*, 22(6), 5273-5295. Scopus.
<https://doi.org/10.1007/s10668-019-00424-2>
- Bhat, A., O Hara, T., Tian, F., & Singh, B. (2023). Review of analytical techniques for arsenic detection and determination in drinking water. *Environmental Science: Advances*, 2(2), 171-195. <https://doi.org/10.1039/D2VA00218C>
- BOSS TECH. (2020). Conoce cómo reducir la contaminación de agua por minería.
<https://bosstech.pe/blog/como-reducir-contaminacion-agua-mineria/>
- Buzetzký, D., Tóth, N. C., Nagy, N. M., & Kónya, J. (2018). Application of Modified Bentonites for Arsenite (III) Removal from Drinking Water. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 63(1), Article 1. <https://doi.org/10.3311/PPch.12197>
- Campos, L. (2024, junio 26). Arequipa: Arsénico, boro y manganeso superan límites en río Tambo, exigen investigación. *El Búho*. <https://elbuhu.pe/2024/06/arequipa-arsenico-boro-y-manganeso-superan-limites-en-rio-tambo-exigen-investigacion/>
- Cavallaro, G., Gianguzza, A., Lazzara, G., Milioto, S., & Piazzese, D. (2013). Alginate gel beads filled with halloysite nanotubes. *Applied Clay Science*, 72, 132-137.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.12.001>

- COEN. (2021). Por contaminación de la cuenca de los ríos Tambo y Coralaque en la región Moquegua y Arequipa (Reporte de peligro inminente 192-11/10/2021; p. 57). INDECI. [https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2021/10/REPORTE-DE-PELIGRO-INMINENTE-N %C2 %BA-192-11OCT2021-POR-CONTAMINACI %C3 %93N-DE-LA-CUENCA-DE-LOS-R %C3 %8DOS-TAMBO-Y-CORALAAQUE-EN-LA-REGI %C3 %93N-MOQUEGUA-Y-AREQUIPA-40.pdf](https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2021/10/REPORTE-DE-PELIGRO-INMINENTE-N%C2%BA-192-11OCT2021-POR-CONTAMINACI%C3%93N-DE-LA-CUENCA-DE-LOS-R%C3%8DOS-TAMBO-Y-CORALAAQUE-EN-LA-REGI%C3%93N-MOQUEGUA-Y-AREQUIPA-40.pdf)
- Colman, B., White, D., Young, M., & Lima, R. F. de. (2024). Accurate and Precise Quantification of Arsenic and Selenium in Water and Biological Samples Through the Removal of Doubly Charged Rare Earth Element Interferences by ICP-MS. 39, 14-21.
- Comisión Europea. (2005, septiembre 18). Eliminación de los metales tóxicos de las aguas residuales con el tratamiento de intercambio de iones. CORDIS | European Commission. <https://cordis.europa.eu/article/id/81506-removing-toxic-metals-from-wastewater-with-ion-exchange-treatment/es>
- Corral-Escárcega, M., Rodríguez de San Miguel-Guerrero, E., De Gyves Marsiniak, J., González Sánchez, G., & Ballinas-Casarrubias, M. de L. (2024). DETERMINACIÓN ESPECTROFOTOMÉTRICA DE ESPECIES INORGÁNICAS ARSENICALES (III) Y (V) EN AGUA USANDO EL MÉTODO DEL AZUL DE MOLIBDENO. ResearchGate. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp03.09>
- Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, Pub. L. No. D.S. N° 015-2015-MINAM (2015).
- Decreto Supremo N° 031-2010-SA, Pub. L. No. D.S. N° 031-2010-SA (2010).
- Decreto Supremo N° 0037-2008-PCM, Pub. L. No. D.S. N° 0037-2008-PCM (2008).
- Delzo-Salomé, A., Huari-Vila, O., Salazar-Mercado, J., Delzo-Salomé, A., Huari-Vila, O., & Salazar-Mercado, J. (2021). Diseño Box—Behnken para optimizar el rendimiento de un

- pico sistema solar fotovoltaico. *Tecnia*, 31(2), 97-101.
- <https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i2.1018>
- Duoc UC Bibliotecas. (2024, junio 14). Investigación Aplicada, Innovación y Transferencia: Definición y propósito de la Investigación Aplicada.
- <https://bibliotecas.duoc.cl/investigacion-aplicada/definicion-proposito-investigacion-aplicada>
- Durán-Álvarez, J. C., Avella, E., Zanella, R., Durán-Álvarez, J. C., Avella, E., & Zanella, R. (2015). Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 8(14), 17-39.
- <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.14.52510>
- Dwivedi, A., Tiwari, D., & Lee, S. M. (2023). Arsenic Contamination of Groundwater a Grave Concern: Novel Clay-based Materials for Decontamination of Arsenic (V). *Applied Chemistry for Engineering*, 34(2), 199-205. Scopus.
- <https://doi.org/10.14478/ace.2023.1008>
- Espinoza, A. (2025, mayo 18). Tenía plomo y arsénico en la sangre: Zoe murió a los 12 años tras ser envenenada por la minería en Cerro de Pasco. *infobae*.
- <https://www.infobae.com/peru/2025/05/18/tenia-plomo-y-arsenico-en-la-sangre-zoe-murio-a-los-12-anos-tras-ser-envenenada-por-la-mineria-en-cerro-de-pasco/>
- Eurofins Scientific. (2025). Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry. EAG Laboratories. <https://www.eag.com/techniques/gfaas/>
- Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6a edición). Mc Graw Hill Education.
- Gamba, M., Flores, M., Fernández, C., Yarza, F., Zelaya, E., Barraqué, F., Fernández, M.,

- Montes, L., & Torres, R. (2019, junio 26). Estudian propiedades de la arcilla para remover contaminantes del agua. Universidad Nacional de la Plata.
<https://unlp.edu.ar/investigacion/estudian-propiedades-de-la-arcilla-para-remover-contaminantes-del-agua-16346-21346/>
- Garcia, B., & Díaz, J. (2019). Contaminación del agua por metales pesados As, B, Cu, Pb, Cd y CN- en las cuencas de los Ríos Tambo, Quilca, Camaná y Ocoña de la región Arequipa [Doctoral, Universidad Nacional de San Agustín].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10764>
- Giannini, L., Citterio, A., Galimberti, M., & Cozzi, D. (2011). Rubber-Clay Nanocomposites: Science, Technology, and Applications (pp. 127-144).
<https://doi.org/10.1002/9781118092866.ch5>
- Gil, M. (2019, septiembre). METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (RSM). RPubS. https://rpubs.com/Cristina_Gil/RSM
- Hama Aziz, K. H., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., & Rahman, K. O. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: Efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review. RSC Advances, 13(26), 17595-17610.
<https://doi.org/10.1039/d3ra00723e>
- Hira, N. e, Lock, S. S. M., Shoparwe, N. F., Lock, I. S. M., Lim, L. G., Yiin, C. L., Chan, Y. H., & Hassam, M. (2023). Review of Adsorption Studies for Contaminant Removal from Wastewater Using Molecular Simulation. Sustainability, 15(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/su15021510>
- Jianfeng, C. (2019). Accurate analysis of arsenic by atomic absorption spectrometry.
- Jones, S. R., & Garbarino, J. R. (1999). Methods of analysis by the U.S. Geological Survey

- National Water Quality Laboratory-Determination of arsenic and selenium in water and sediment by graphite furnace atomic absorption spectrometry. En Open-File Report (98-639). U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey : Branch of Information Services [distributor],. <https://doi.org/10.3133/ofr98639>
- Khosravi-Darani, K., Rehman, Y., Katsoyiannis, I. A., Kokkinos, E., & Zouboulis, A. I. (2022). Arsenic Exposure via Contaminated Water and Food Sources. *Water*, 14(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/w14121884>
- Kuivenhoven, M., & Mason, K. (2023). Arsenic Toxicity. En StatPearls. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK541125/>
- Lee, S. (2025, junio 10). The Ultimate Guide to Arsenic Speciation Analysis. <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-arsenic-speciation-analysis>
- Lenoble, V., Deluchat, V., Serpaud, B., & Bollinger, J.-C. (2003). Arsenite oxidation and arsenate determination by the molybdene blue method. *Talanta*, 61(3), 267-276. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(03\)00274-1](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(03)00274-1)
- Mansilla, M., Castroviejo, P., & Delgado, J. (2022, marzo 11). Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS) | Universidad de Burgos. <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>
- Martinez, L. D., & Gasquez, J. A. (2005). DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS: DIFERENTES TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS.
- Matus, I., Paniagua, L., & Benavente, M. (2011). Estudio de la cinética de adsorción de Cu y Hg a partir de soluciones binarias usando quitosano. *Nexo Revista Científica*, 24(1), 20-32.
- Merck. (2024). Espectroscopia atómica.

- <https://www.sigmaaldrich.com/PE/es/applications/analytical-chemistry/atomic-spectroscopy>
- Miljkovic, M. V., Momcilovic, M., Stankovic, M., Cirkovic, B., Laketic, D., Nikolic, G., & Vujovic, M. (2019). Remediation of arsenic contaminated water by a novel carboxymethyl cellulose bentonite adsorbent. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 733-744. Scopus. https://doi.org/10.15666/aeer/1701_733744
- Minitab. (2024). ¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken? [Mtbconcept]. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>
- MINSA. (2010). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- MINSA. (2022). Guía Técnica para el Abordaje Integral a Personas Expuestas a Arsénico.
- Mugira, A. (2018, octubre 17). Diseño de investigación. Elementos y características. QuestionPro. <https://www.questionpro.com/blog/es/disenio-de-investigacion/>
- Mutar, R. F., & Saleh, M. A. (2022). Optimization of arsenic ions adsorption and removal from hospitals wastewater by nano-bentonite using central composite design. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1248-1256. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.213>
- National Academy of Sciences. (1977). Determining Traces of Arsenic in Natural Materials. En *Arsenic: Medical and Biologic Effects of Environmental Pollutants*. National Academies Press (US). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK231017/>
- Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., & Du Laing, G. (2016). Technologies for Arsenic Removal from Water: Current Status and Future Perspectives. *International*

- Journal of Environmental Research and Public Health, 13(1), 62.
<https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>
- Ocampo, D. E. M., Bahena, A. P., Pérez, J. A. H., Castañeda, S. I., & Martínez, S. S. (2023). La electroquímica como alternativa en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. *Inventio*, 19(47), Article 47. <https://doi.org/10.30973/inventio/2023.19.47/5>
- Okazaki, T., Wang, W., Kuramitz, H., & Hata, N. (2013). Molybdenum Blue Spectrophotometry for Trace Arsenic in Ground Water Using a Soluble Membrane Filter and Calcium Carbonate Column. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.2116/analsci.29.67>
- OMS. (2022a, diciembre 7). Arsénico. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- OMS. (2022b, diciembre 7). Arsénico. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Pabón, S. E. P., Benítez, R. B., Sarria, R. A. S., & Gallo, J. A. G. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), Article 27. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>
- Palintest. (2024, diciembre 9). Measuring Arsenic Contamination in Water – Challenges And Solutions. *Palintest*. <https://www.palintest.com/measuring-arsenic-contamination-in-water-challenges-and-solutions/>
- Pari, D. (2022, noviembre 25). Arequipa | Río Tambo está contaminado de arsénico y plantean limpiarlo con cáscara de granadilla y lloque lrsd | Sociedad | La República. <https://larepublica.pe/sociedad/2022/11/25/arequipa-rio-tambo-esta-contaminado-de-arsenico-y-plantean-limpiarlo-con-cascara-de-granadilla-y-lloque-lrsd>
- Pawar, R. R., Lalhmunsiam, Ingole, P. G., & Lee, S.-M. (2020). Use of activated bentonite-

- alginate composite beads for efficient removal of toxic Cu^{2+} and Pb^{2+} ions from aquatic environment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 3145-3154.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.130>
- PubChem. (2024, julio 6). Arsenic. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5359596>
- Rajasekhar, R., Mandal, T., Daware, G., & Rajesh, Y. (2024). Onsite arsenic detection with a low cost portable microvolume kit. *Indian Journal of Chemical Technology (IJCT)*, 31(6), Article 6. <https://doi.org/10.56042/ijct.v31i6.11679>
- Rangel Montoya, E. A., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P., Balagurusamy, N., Rangel Montoya, E. A., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P., & Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118.
- Raza, M. B., Datta, S. P., Golui, D., Barman, M., Das, T. K., Sahoo, R. N., Upadhyay, D., Rahman, M. M., Behera, B., & Naveenkumar, A. (2023). Synthesis and Performance Evaluation of Novel Bentonite-Supported Nanoscale Zero Valent Iron for Remediation of Arsenic Contaminated Water and Soil. *Molecules*, 28(5). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/molecules28052168>
- Resolución Jefatural N° 068-2018-ANA, RJ-068-2018-ANA (2018).
- Resolución Ministerial N° 168-2022-MINSA, RM-168-2022-MINSA (2022).
- Rosas, N., Guerrero, V., & Cañar, F. (2014). Activación química de nanoarcillas y su aplicación en la remoción de metales pesados. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 9(1), 117-122. <https://doi.org/10.24133/cctespe.v9i1.92>
- Sanchez, A. (2017). Arsenic in Groundwater Poses Ongoing Challenge | Water Resources Research Center | The University of Arizona. The University of Arizona.

- <https://wrrc.arizona.edu/arsenic-groundwater-poses-ongoing-challenge>
- Schöne, K., & Schweizer, S. (2022). Analyzing Drinking Water by ICP-MS for Heavy Metal Detection.
- Sellaoui, L., Soetaredjo, F. E., Ismadji, S., Benguerba, Y., Dotto, G. L., Bonilla-Petriciolet, A., Rodrigues, A. E., Lamine, A. B., & Erto, A. (2018). Equilibrium study of single and binary adsorption of lead and mercury on bentonite-alginate composite: Experiments and application of two theoretical approaches. *Journal of Molecular Liquids*, 253, 160-168.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.056>
- Shabani, E., Salimi, F., & Jahangiri, A. (2019). Removal of Arsenic and Copper from Water Solution Using Magnetic Iron/Bentonite Nanoparticles (Fe₃O₄/Bentonite). *Silicon*, 11(2), 961-971. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9895-z>
- Song, Y., Wang, S., Yang, L.-Y., Yu, D., Wang, Y.-G., & Ouyang, X. (2019). Facile fabrication of core-shell/bead-like ethylenediamine-functionalized Al-pillared montmorillonite/calcium alginate for As(V) ion adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 971-979.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.172>
- Supo, J. (2023, abril 2). Niveles de investigación. BIOESTADISTICO.
<https://bioestadistico.com/niveles-de-investigacion>
- Ümit, A., & Emur, H. (2000). Interferences in the quartz tube atomizer during arsenic and antimony determination by hydride generation atomic absorption spectrometry. ResearchGate. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(00\)00219-6](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(00)00219-6)
- U.S. EPA. (2023, noviembre 7). Drinking Water Arsenic Rule History [Collections and Lists].
<https://www.epa.gov/dwreginfo/drinking-water-arsenic-rule-history>

- Wilschefski, S. C., & Baxter, M. R. (2019). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects. *The Clinical Biochemist Reviews*, 40(3), 115-133. <https://doi.org/10.33176/AACB-19-00024>
- Yee, J.-J., Arida, C. V. J., Futralan, C. M., De Luna, M. D. G., & Wan, M.-W. (2019). Treatment of contaminated groundwater via arsenate removal using chitosan-coated bentonite. *Molecules*, 24(13). Scopus. <https://doi.org/10.3390/molecules24132464>
- Yılmaz, Ş., Ecer, Ü., & Şahan, T. (2018). Modelling and Optimization of As(III) Adsorption onto Thiol-Functionalized Bentonite from Aqueous Solutions Using Response Surface Methodology Approach. *ChemistrySelect*, 3(32), 9326-9335. Scopus. <https://doi.org/10.1002/slct.201801037>

ANEXOS

Figura 8

Diagrama de flujo de la síntesis de la bentonita inmovilizada en perlas

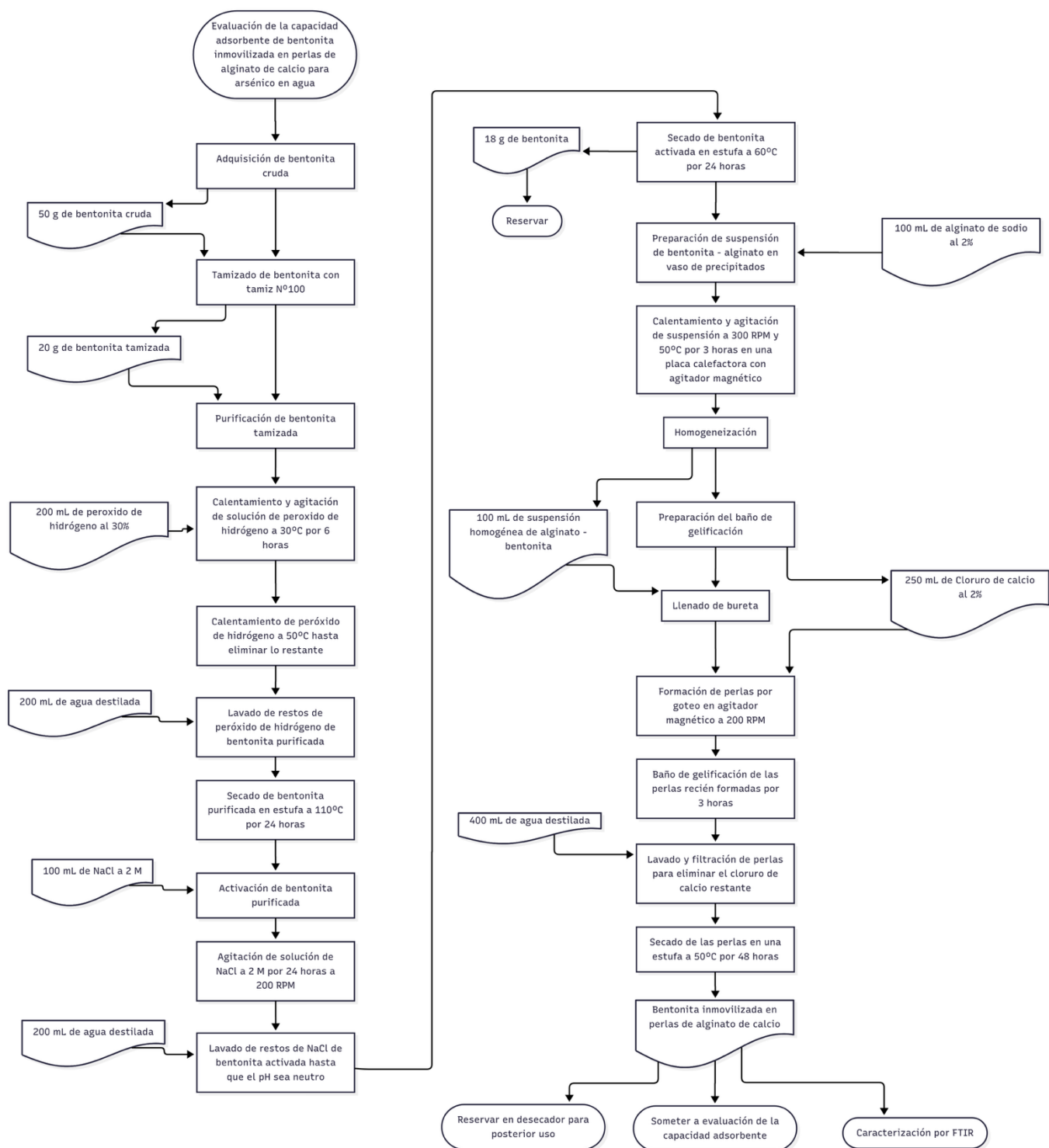


Figura 9

Botella de 1L de peróxido de hidrógeno al 30 % adquirido de Delta



Figura 10

Tamiz N°100 empleado para tamizar bentonita



Figura 11

Solución estándar de arsénico adquirido de Merck

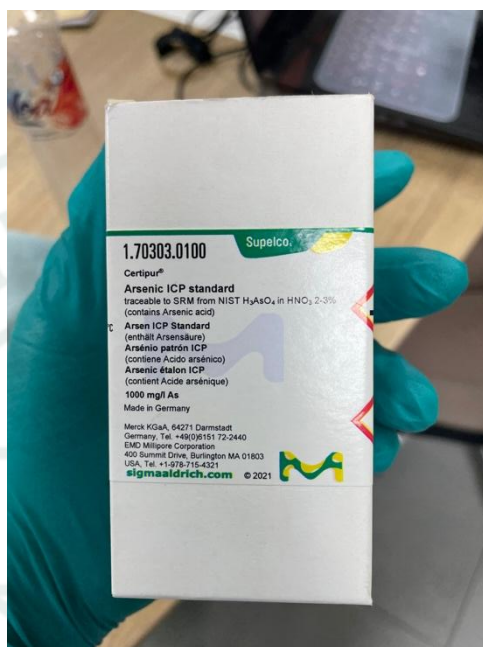


Figura 12

Medición y ajuste de pH de solución de arsénico



Figura 13

Bentonita activada almacenada

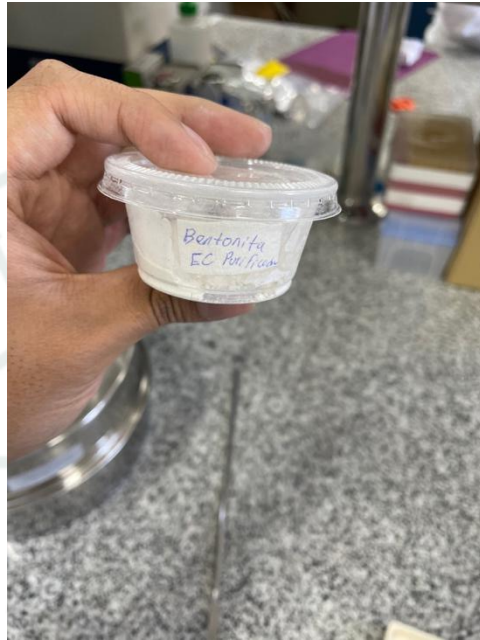


Figura 14

Bentonita purificada seca después de estar en estufa

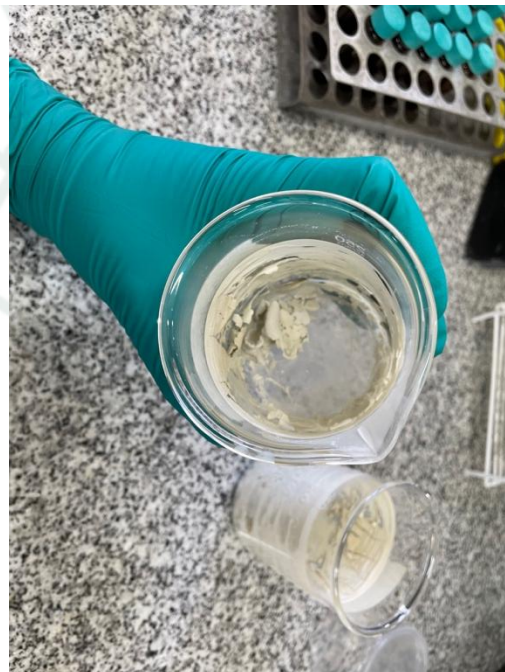


Figura 15

Bentonita sódica cruda adquirida de Merck

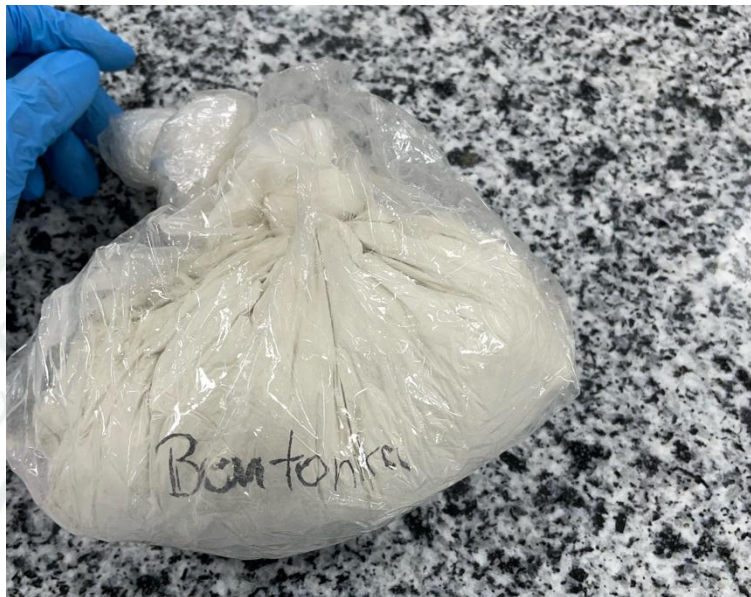


Figura 16

Informe de análisis FTIR de bentonita activada

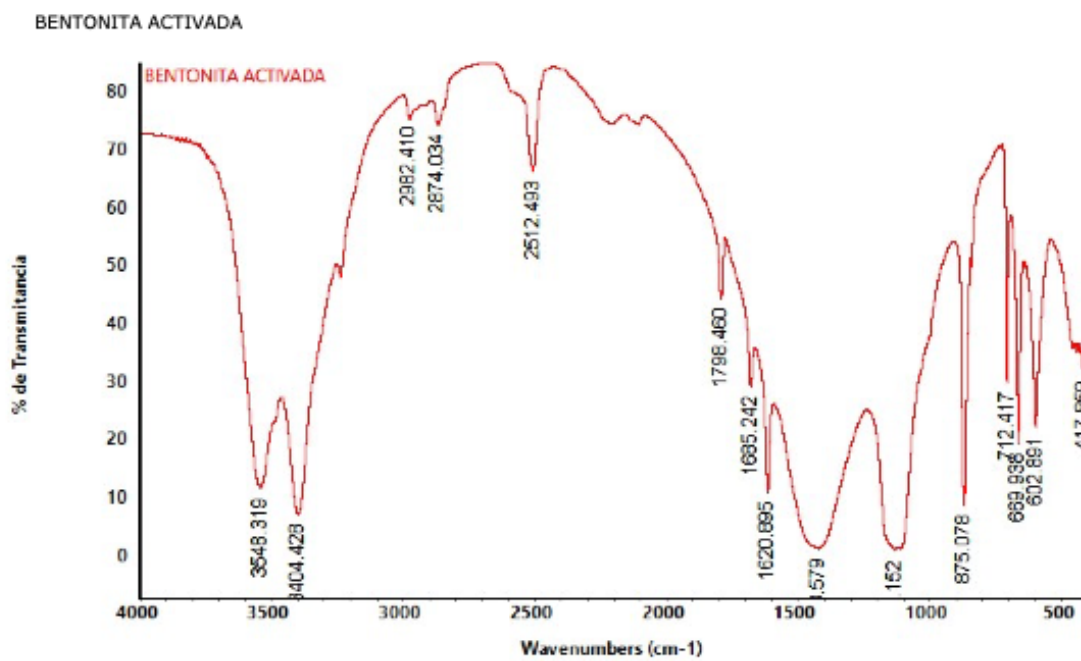


Figura 17

Informe de análisis FTIR de bentonita activada inmovilizada en perlas de alginato

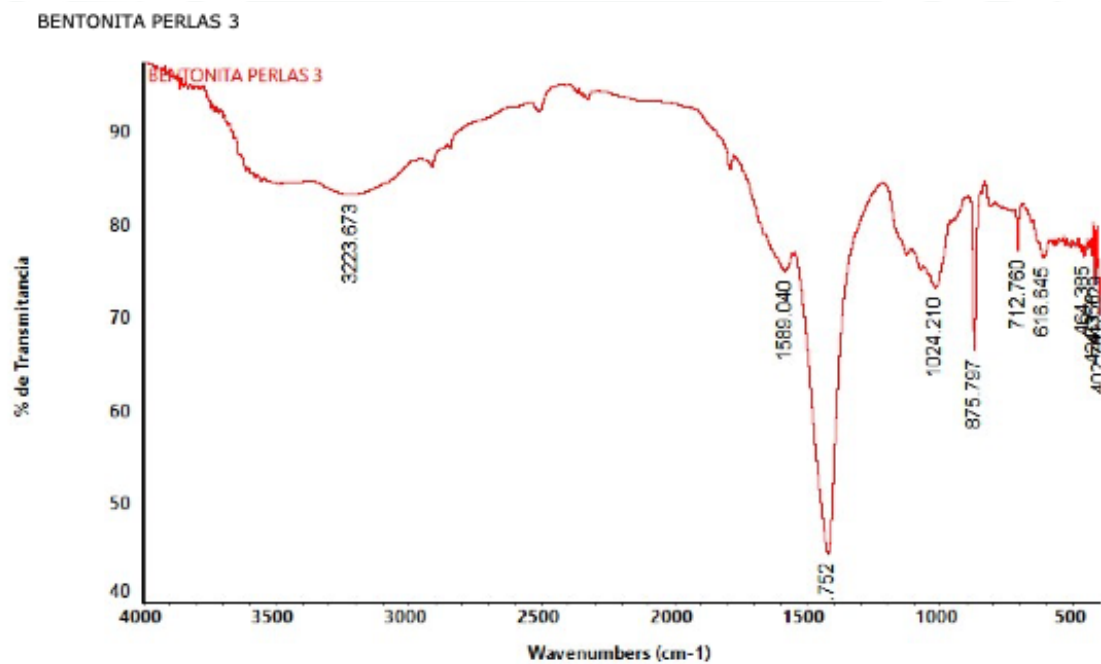


Figura 18

Gráfica de contorno 2D de la remoción de arsénico en función de la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación

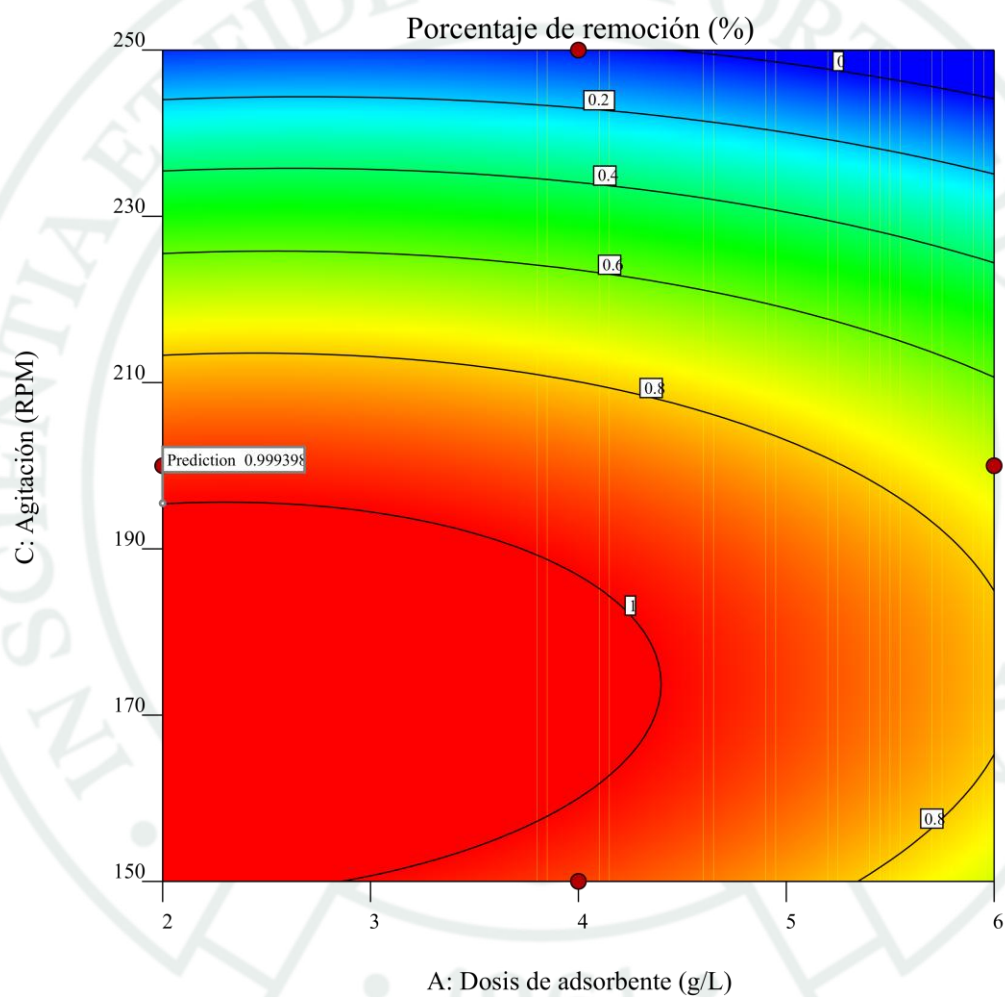


Figura 19

Gráfica de contorno 2D de la remoción de arsénico en función del tiempo y la velocidad de agitación

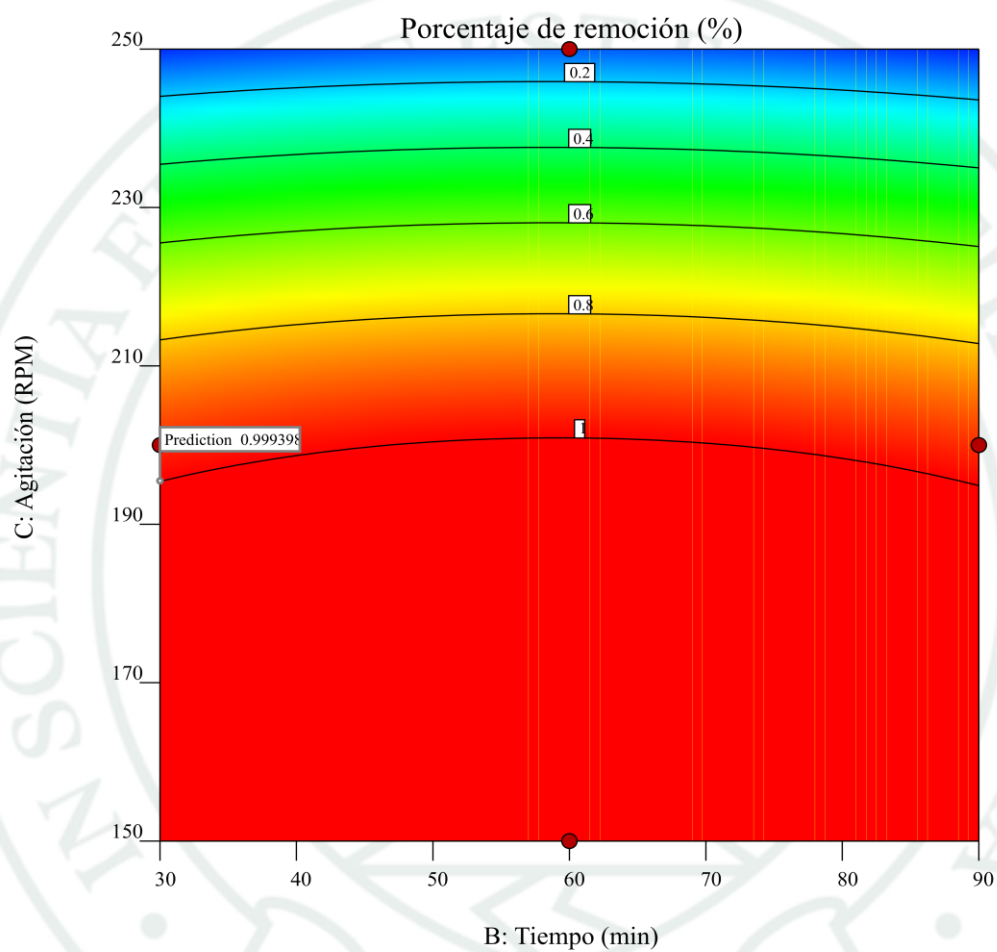


Figura 20

Gráfica de contorno 2D de la remoción de arsénico en función del tiempo y la velocidad de agitación

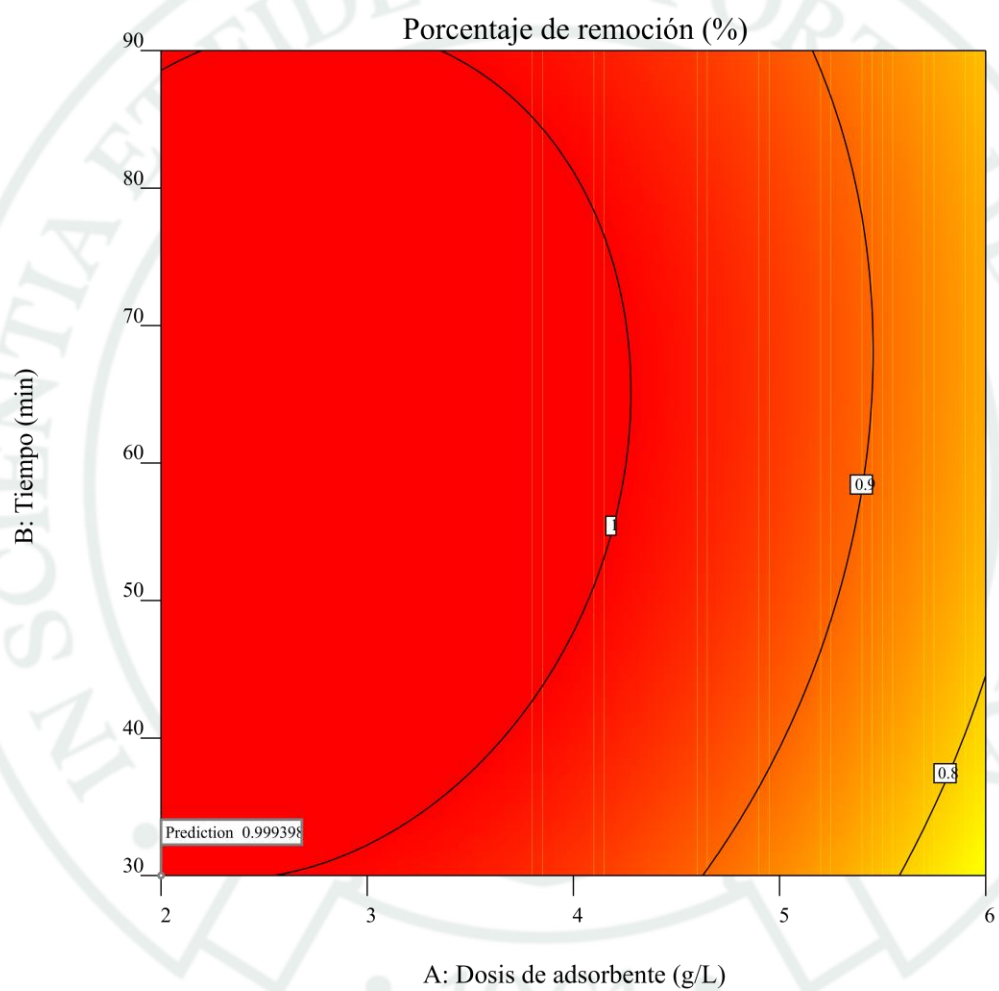


Figura 21

Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función de la dosis de adsorbente y la velocidad de agitación

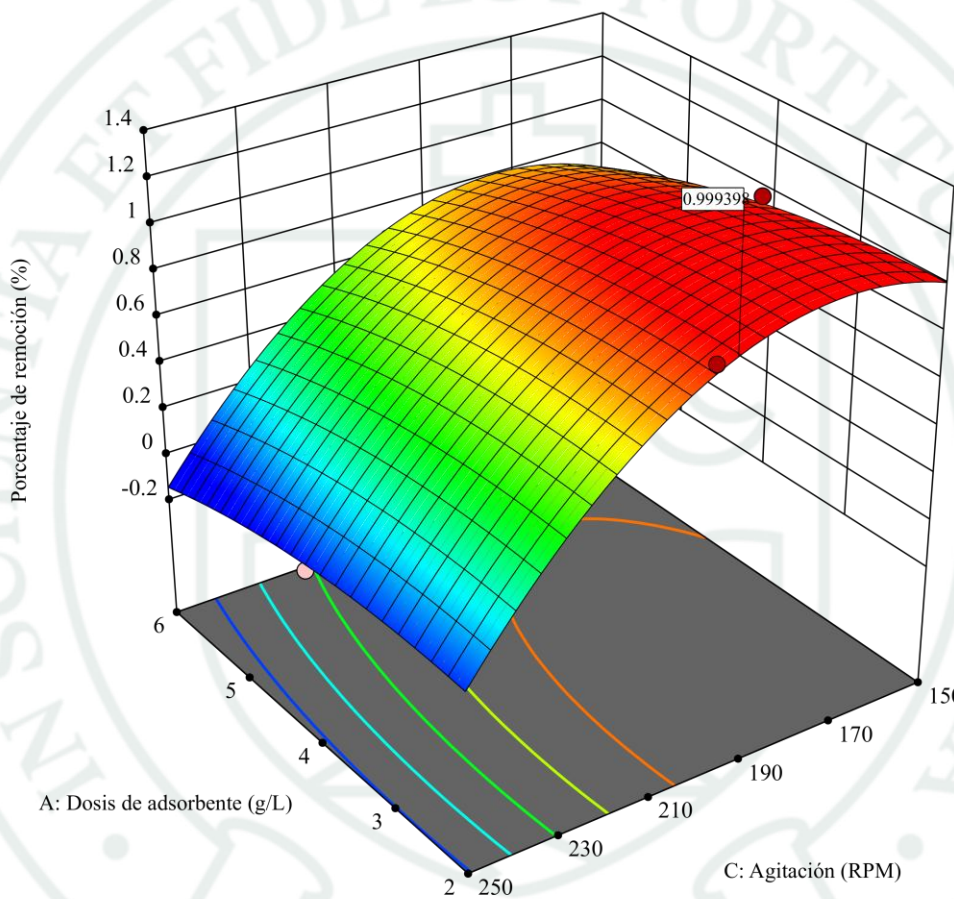


Figura 22

Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función del tiempo y la velocidad de agitación

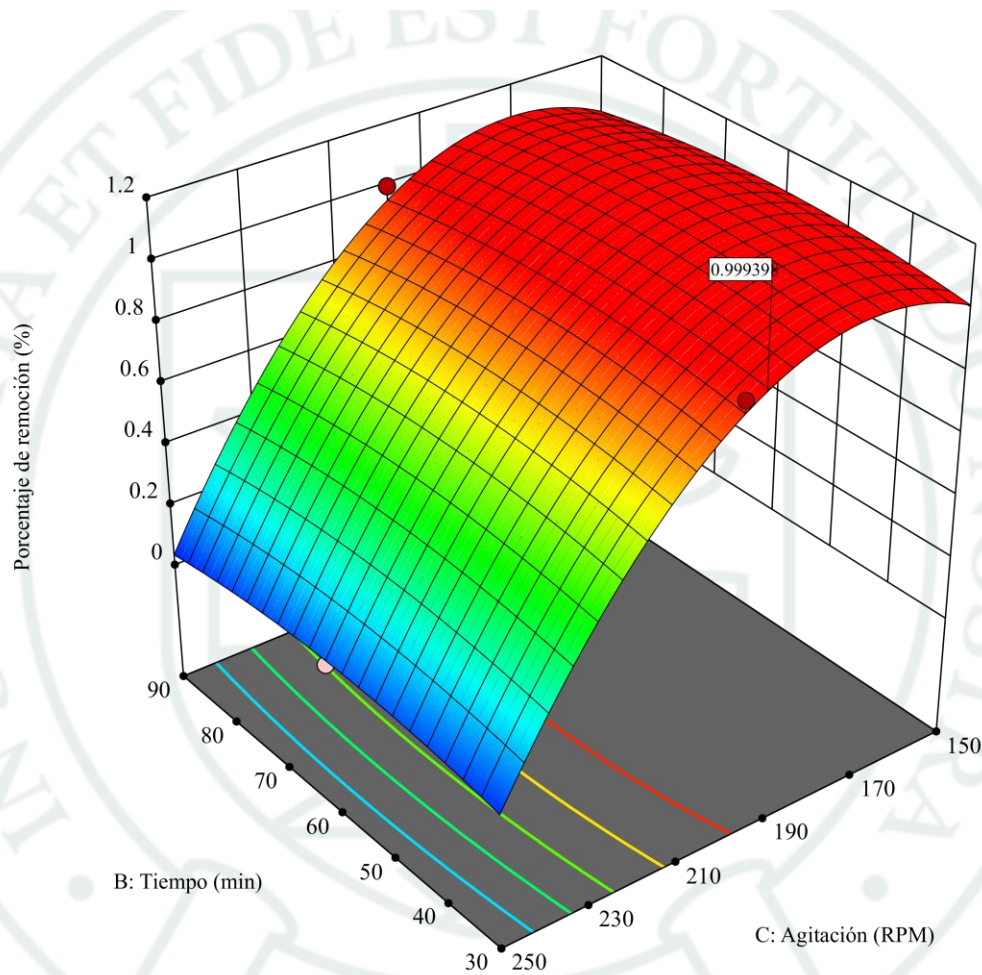


Figura 23

Gráfico de superficie de respuesta de la remoción de arsénico en función del tiempo y la dosis de adsorbente

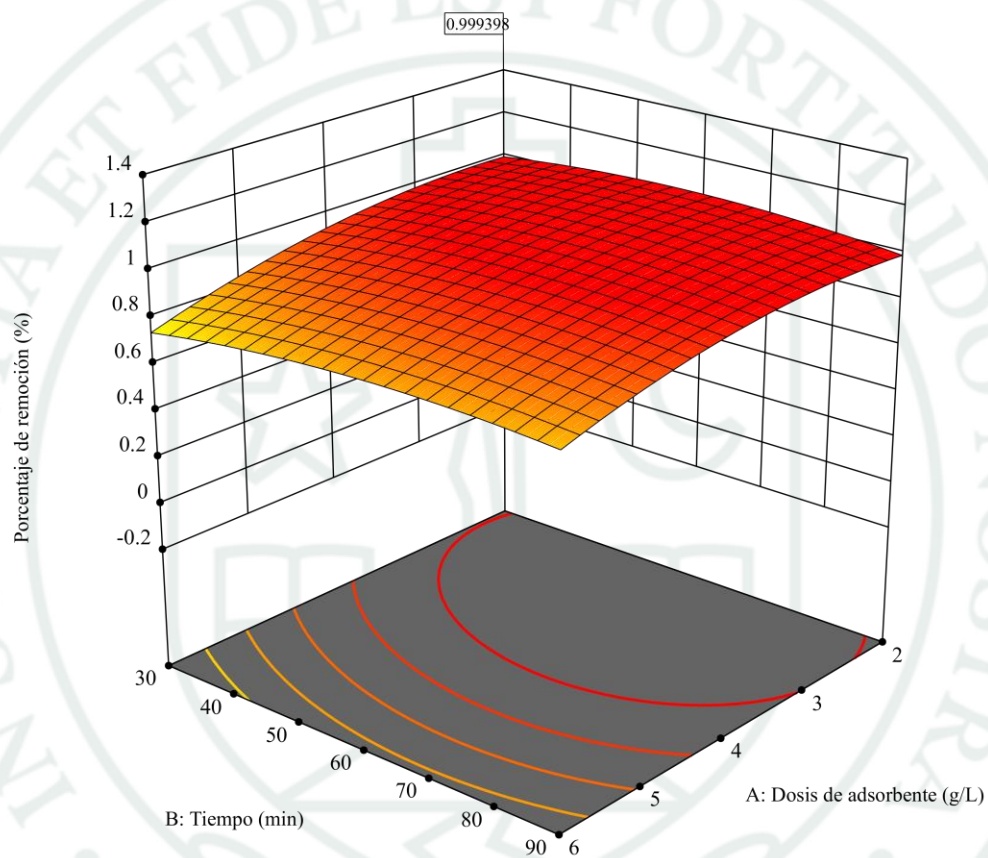


Tabla 20*Resultados de las corridas experimentales del control de bentonita activada*

N° de pruebas	Variables Naturales			Variable de respuesta
	Dosis de adsorbente (g/L)	Tiempo de contacto (min)	Agitación (RPM)	Porcentaje de remoción (%)
1	2	90	200	4.85
2	6	90	200	5.22
3	4	60	200	7.94
4	4	60	200	8.04
5	4	90	150	10.51
6	4	60	200	7.95
7	6	60	250	27.44
8	2	60	250	31.29
9	4	30	150	10.97
10	4	90	250	8.14
11	4	30	250	7.44
12	2	30	200	8.87
13	2	60	150	9.57
14	6	30	200	11.33
15	6	60	150	15
16	4	60	200	8.01
17	4	60	200	7.90

Tabla 21

Corrida experimental de bentonita activada con mayor porcentaje de remoción

Dosis de adsorbente (g/L)	Tiempo de contacto (min)	Agitación (RPM)	Porcentaje de remoción (%)
4	90	150	99.94

