

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Industrial



ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICO-AMBIENTAL DE LA ELABORACIÓN DE UN ADSORBENTE AVANZADO A BASE DE GOMA DE TARA PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN EFLUENTES MINEROS

Trabajo de investigación para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Nimia Medalit Cevallos Barturén

Código 20110295

Daniel Steve Medina Ormachea

Código 20112884

Asesor

Dr. George Felix Power Porto

Lima – Perú

Julio del 2019





**STUDY OF THE TECHNICAL-
ENVIRONMENTAL FEASIBILITY OF THE
ELABORATION OF AN ADVANCED
ADSORBENT BASED ON TARA GUM FOR
ARSENIC REMOVAL FROM MINING
EFFLUENTS**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	2
1.1. Problemática.....	2
1.2. Objetivos de la investigación	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Marco referencial de la investigación.....	3
1.4. Descripción, alcance y limitaciones de la investigación.....	4
1.5. Justificación de la investigación.....	7
1.5.1. Técnica	7
1.5.2. Económica.....	7
1.5.3. Social	8
1.5.4. Ambiental.....	8
1.6. Hipótesis de la investigación.....	9
CAPÍTULO II: ASPECTOS TEÓRICOS	10
2.1. Conceptos generales sobre tratamiento de agua – Origen de relaves y aguas ácidas de minas.....	10
2.2. Conceptos básicos del arsénico y su toxicidad	13
2.3. Definición y características de la goma de tara.....	17
2.4. Definición y clasificación de los nanomateriales	18
2.5. Proceso de adsorción	20
2.6. Estado del arte	21
CAPÍTULO III: DISEÑO EXPERIMENTAL	30
3.1. Métodos de preparación.....	30

3.2. Metodología de las técnicas de caracterización del biocompósito	36
3.2.1. Difracción de rayos X (DRX)	36
3.2.2. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR).....	37
3.2.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	37
3.2.4. Microscopía electrónica de transmisión (TEM)	38
3.2.5. Determinación de la superficie específica mediante la isoterma de Brunauer- Emmet-Teller ($S_{B.E.T.}$).....	38
3.2.6. Medida de viscosidad.....	38
3.2.7. Titulación potenciométrica.....	39
3.2.8. Medida del potencial de hidrógeno (pH)	39
3.2.9. Magnetización	39
3.3. Prueba de adsorción.....	40
3.4. Método de biodegradabilidad.....	41
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. Métodos de preparación.....	44
4.2. Resultados de la caracterización de los materiales.....	45
4.2.1. Difracción de rayos X (DRX)	45
4.2.2. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR).....	48
4.2.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	50
4.2.4. Microscopía electrónica de transmisión (TEM).....	54
4.2.5. Determinación de la superficie específica mediante la isoterma de Brunauer- Emmet-Teller ($S_{B.E.T.}$).....	56
4.2.6. Medida de viscosidad.....	58
4.2.7. Titulación potenciométrica.....	60
4.2.8. Medida del potencial de hidrógeno (pH)	60
4.2.9. Magnetización	61
4.3. Remoción de arsénico	62
4.4. Estudios de biodegradabilidad	64
CAPÍTULO V: TECNOLOGÍAS EXISTENTES Y PROCESO DE PRODUCCIÓN .	66
5.1. Naturaleza de la tecnología requerida.....	66
5.2. Proceso de producción.....	67

5.2.1. DOP	70
5.2.2. Diagrama de balance de materia.....	71
5.2.3. Diagrama Sankey.....	72
5.2.4. Diagrama de flujo detallado	73
5.3. Características de las instalaciones y equipos	74
5.4. Aspectos de calidad	78
CAPÍTULO VI: ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL	80
6.1. Evaluación de los impactos ambientales en el proceso de producción	80
6.2. Identificación de los aspectos e impactos ambientales en el proceso del diseño experimental.....	84
6.3. Producción más limpia.....	84
6.4. Tratamiento de agua	86
6.5. Tratamiento de gases generados.....	87
6.6. Ciclo de vida del producto	87
CONCLUSIONES	90
RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS	92
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Producción de cobre según región	5
Tabla 1.2 Producción de oro según región	6
Tabla 1.3 Regiones con mayor producción	6
Tabla 1.4 Condiciones ambientales.....	7
Tabla 1.5 Conflictos socioambientales en el Perú, según actividad - julio 2017.....	8
Tabla 2.1 Propiedades químicas del arsénico	13
Tabla 2.2 Concentración de arsénico en aguas subterráneas de países afectados con arsénico	14
Tabla 2.3 Concentración de arsénico en algunos sistemas acuáticos mayores (ríos, lagos, desembocadura y marino) del mundo	15
Tabla 2.4 Especificaciones de la goma de tara	17
Tabla 3.1 Información sobre las marcas de los reactivos	42
Tabla 3.2 Información sobre las marcas de los equipos	43
Tabla 4.1 Características según cada método de preparación	44
Tabla 4.2 Valor de la viscosidad de cada material.....	59
Tabla 4.3 Concentración de manosa para cada material	64
Tabla 5.1 Tecnología existente según operación	67
Tabla 5.2 Balanza industrial.....	75
Tabla 5.3 pH-metro digital en línea	75
Tabla 5.4 Reactor de vidrio con agitador	76
Tabla 5.5 Dosificador volumétrico.....	76
Tabla 5.6 Máquina de envasado.....	77
Tabla 5.7 Etiquetadora.....	77
Tabla 6.1 Matriz Causa-Efecto del proceso de elaboración del adsorbente avanzado ..	81
Tabla 6.2 Rangos del nivel de significancia	82

Tabla 6.3 Impactos y medidas correctoras de las operaciones del proceso de producción 83

Tabla 6.4 Aspectos e impactos ambientales durante el diseño experimental 84



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Vainas de tara, semillas y goma de tara.....	18
Figura 2.2 Técnicas usadas para la remoción de arsénico en aguas contaminadas	22
Figura 2.3 Sistema de Coagulación/Filtración – Empresa Pureflow	26
Figura 3.1 Formación del biocompósito - método 1	31
Figura 3.2 Biocompósito concentrado.....	32
Figura 3.3 Formación del biocompósito – método 2	33
Figura 3.4 Formación del biocompósito – método 3	35
Figura 3.5 Concentración del biocompósito	35
Figura 3.6 Gráfico de la Ley de Bragg	36
Figura 3.7 Difractómetro de polvo Bruker D8.....	37
Figura 3.8 Adición del adsorbente al agua contaminada.....	41
Figura 3.9 Proceso de adsorción	41
Figura 4.1 Difractograma de la magnetita	46
Figura 4.2 Difractograma del biocompósito (80% Fe ₃ O ₄ - 20% GT).....	47
Figura 4.3 Espectroscopía infrarroja (FT-IR) de la goma de tara.....	48
Figura 4.4 Espectroscopía infrarroja (FT-IR) de los biocompósitos.....	49
Figura 4.5 Microscopía Electrónica Barrido (SEM) de la magnetita, 1.00KX	50
Figura 4.6 Microscopía Electrónica Barrido (SEM) de la magnetita, 50.00 KX.....	51
Figura 4.7 Micrografía SEM de la goma de tara.....	52
Figura 4.8 Micrografía SEM del biocompósito de 80% goma de tara y 20% magnetita 52	
Figura 4.9 Micrografía SEM del biocompósito de 50% goma de tara y 50% magnetita 53	
Figura 4.10 Micrografías SEM del biocompósito de 20% goma de tara y 80% magnetita	53
Figura 4.11 Micrografías TEM del biocompósito de 80% de goma de tara y 20% de magnetita.....	54

Figura 4.12 Micrografías TEM del biocompósito de 50% de goma de tara y 50% de magnetita.....	55
Figura 4.13 Micrografía TEM del biocompósito de 20% goma de tara y 80% magnetita	55
Figura 4.14 Isoterma de adsorción - Magnetita	56
Figura 4.15 Isoterma de adsorción - B20%Fe ₃ O ₄ 80%GT	57
Figura 4.16 Isoterma de adsorción - B80%Fe ₃ O ₄ 20%GT	58
Figura 4.17 Resultados de la prueba de viscosidad.....	59
Figura 4.18 Valores de pH de cada material.....	61
Figura 4.19 Curva de magnetización del biocompósito (80% Fe ₃ O ₄)	62
Figura 4.20 Rendimientos de la prueba de adsorción de cada material	63
Figura 4.21 Resultados de la prueba de biodegradabilidad	65
Figura 6.1 Ciclo de vida de ambos adsorbentes.....	88

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Glosario de términos	98
-------------------------------------	----



RESUMEN

El tema de investigación es el estudio de la viabilidad técnico-ambiental de la elaboración de un adsorbente avanzado a base de goma de tara para la remoción de arsénico en efluentes mineros.

El objetivo del trabajo es demostrar la adsorción de arsénico de este producto en aguas contaminadas.

La tesis consta de 6 capítulos en los que se revisan diferentes temas. En el capítulo 1 se detallan los objetivos del trabajo y la justificación del mismo. El capítulo 2 contiene todos los aspectos teóricos requeridos para el mejor entendimiento del contexto de la investigación. En el capítulo 3 se presentan los métodos empleados para la elaboración del adsorbente y su caracterización, y en el capítulo 4 se observan todos sus resultados. El capítulo 5 muestra el detalle del proceso de producción y las características de los equipos requeridos. Finalmente, el capítulo 6 da a conocer el estudio de impacto ambiental de la producción.

El adsorbente preparado es capaz de remover $4.04 \times 10^3 \mu\text{g/g}$ de arsénico a 2 ppm en agua contaminada después de 30 minutos a temperatura ambiente.

La investigación se llevó a cabo gracias al proyecto 127-PNICP-PIAP-2015 financiado por Innóvate Perú y empleando las instalaciones del Laboratorio de Docimasia de la Universidad de Lima.

Palabras claves: Biocompósito, adsorbente avanzado, arsénico, goma de tara, magnetita, adsorción, biodegradabilidad.

ABSTRACT

The research topic is the study of the technical-environmental feasibility of the elaboration of an advanced adsorbent based on tara gum for the removal of arsenic from mining effluents.

The objective of the research is to prove the arsenic adsorption of this product in contaminated water.

The work consists of 6 chapters, in which different topics were reviewed. Chapter 1 mentions the objectives and justification of the research. Chapter 2 contains all the theoretical aspects required for a better understanding of the research context. Chapter 3 presents the methods used for the adsorbent's preparation and its characterization, and Chapter 4 shows all the results. Chapter 5 contains the detail of the production process and the required equipment's characteristics. Finally, Chapter 6 shows the environmental impact assessment of the production process.

The prepared adsorbent is capable of removing 4.04×10^3 $\mu\text{g/g}$ of arsenic at 2 ppm in contaminated water after 30 minutes at room temperature.

The research was supported by the 127-PNICP-PIAP-2015 Project funded by Innóvate Perú, utilizing the facilities of the chemical analysis laboratory (Docimasy) of the University of Lima.

Keywords: Biocomposite, advanced adsorbent, arsenic, tara gum, magnetite, adsorption, biodegradability.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural empleado diariamente, ya sea en los hogares, labores cotidianas o en procesos industriales en las empresas. El agua utilizada por las industrias se clasifica en cuatro campos: el agua tecnológica, la cual es destinada para los procesos, el agua de refrigeración, el agua de lavado y el agua destinada a los calderos; sin embargo, no todas las compañías hacen un uso responsable de este recurso, puesto que es contaminado con sustancias químicas o biológicas, y en algunos casos altamente nocivas tales como el arsénico, sin realizar tratamiento para su disposición final.

El Perú es un país altamente vulnerable por su biodiversidad y la contaminación del agua con arsénico genera alteraciones en los ecosistemas, daños a la flora, a las personas y a los seres que la habitan. Con el fin de dar solución a este problema nacional, se busca una alternativa que utilice componentes orgánicos, como la goma de tara, para el tratamiento del agua contaminada con arsénico. Así, no solo se acondicionará el agua en lugar de verterla, sino que se dará una utilidad y valor agregado a la goma de tara.

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1. Problemática

Uno de los principales riesgos para la salud de muchas personas en el Perú es la contaminación de las fuentes de agua, las cuales han registrado niveles elevados de contenido de arsénico, sobrepasando los límites permisibles recomendados por la OMS para la concentración de arsénico en el agua potable (10 µg/L) (Arias et al., 2014). El arsénico, en su forma inorgánica, es un elemento altamente tóxico para gran parte de los organismos y se puede encontrar en el aire, el agua y la tierra.

Según la OMS (Organización Mundial de Salud), la exposición a los altos niveles de arsénico se debe al consumo de agua contaminada, al uso de estas aguas para preparación de comidas, riego de los cultivos y al resultado de procesos industriales. Los efectos a la salud que tiene su exposición pueden presentarse de forma aguda e inmediata en dolor abdominal, vómitos, diarrea, entumecimiento u hormigueo de las manos y, en casos extremos, la muerte. Por otro lado, su exposición a largo plazo provoca lesiones en la piel, con cambios de pigmentación, lesiones cutáneas, durezas y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies; su exposición prolongada puede ser causante del cáncer de piel, cáncer de vejiga y de pulmón, por lo que el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado al arsénico y sus compuestos como cancerígeno para los seres humanos. Entre otros efectos perjudiciales para la salud por la ingesta prolongada de arsénico se encuentran problemas relacionados con el desarrollo, neurotoxicidad, diabetes, enfermedades pulmonares y cardiovasculares (OMS, 2016); (Castro, 2014).

En el Perú, se ha registrado la presencia de arsénico por encima de los límites permisibles recomendados por la OMS para la concentración de arsénico en el agua potable (10 µg/L) en diferentes distritos. En el 2012, la OMS realizó una investigación la cual confirmó la situación y condición alarmante del agua en ciertas zonas del Perú. Se obtuvo que las concentraciones más altas de arsénico en el agua se encontraron en los pozos de Juliaca - Puno (1.2 – 193,1 µg/L). También se detectaron altos niveles en los pozos de Caracoto - Puno (31.9 – 113,1 µg/L). Asimismo, las 14 muestras de agua superficial recolectadas en la sección del río Rímac que atraviesa Lima presentaron niveles de arsénico entre 14.6 y 42.5 µg /L (Arias et al., 2014).

Si bien es cierto que la contaminación del agua puede ser ocasionada de manera natural, la minería y sus actividades constituyen otra fuente de contaminación que va en crecimiento. Esta situación ha llevado a enfocar la inversión pública en el saneamiento y tratamiento de las aguas, y por ende a mayores proyectos de investigación que busquen una alternativa de solución para la remoción de arsénico en efluentes mineros (Arias et al., 2014).

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Determinar la viabilidad tecnológica y ambiental para la elaboración de adsorbentes avanzados elaborados a base de goma de tara con el objetivo de disminuir la concentración de arsénico presente en las aguas residuales de mina y dar valor agregado a la tara.

1.2.2. Objetivos específicos

- Definir las propiedades físico-químicas relevantes del adsorbente avanzado para la purificación del agua.
- Identificar los aspectos e impactos ambientales del proceso de producción y el grado de biodegradabilidad del producto.
- Determinar la existencia de tecnología adecuada y suficiente para la preparación óptima de este producto en el Perú.

1.3. Marco referencial de la investigación

Título: Utilización de la semilla de tara (*Caesalpinia spinosa*) como ayudante de coagulación en el tratamiento de aguas

Autor: Edwar Alejandro Aguilar Ascón

Resumen: La investigación expone resultados sobre el uso de la goma de tara como ayudante de coagulación, además de un análisis de eficiencia de esta goma según sus características físicas, químicas y bacteriológicas. Por otro lado, también presenta un detallado análisis de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación (Aguilar Ascón, 2010).

Título: (Bio) nanocompuestos para tratamiento de aguas de arsénico/agua contaminada gentamicina o uso de medicina

Autor: He, Jing

Resumen: El estudio da a conocer la presencia de arsénico tóxico y antibióticos en el agua potable de China, por lo que se investiga sobre la adaptación de un biocompuesto llamado *chitosan goethite bionanocomposite (CGB)* como agente removedor para la eliminación de especies de arsénico del agua (He, 2013).

1.4. Descripción, alcance y limitaciones de la investigación

Descripción

La tesis de investigación es el estudio de la viabilidad técnico-ambiental de la aplicación de adsorbentes avanzados elaborados a base de goma de tara para la remoción de arsénico en efluentes mineros. Esta investigación se basará en experimentos que demuestren la utilidad del producto diseñado.

En el capítulo dos, se investigará sobre aspectos teóricos relacionados al tratamiento de aguas, las características y propiedades del arsénico, además de los principales procesos involucrados en su tratamiento. En el capítulo tres, se detallará el diseño experimental del producto, el cual incluye el método de preparación, las técnicas de caracterización y la prueba de adsorción de arsénico.

Se realizará el análisis de los resultados de las pruebas y se detallará el proceso de producción definido. Finalmente, se procederá con el estudio de impacto ambiental de los procesos y la evaluación del ciclo de vida del producto.

Alcance

Para delimitar el alcance geográfico de la investigación se mencionarán las principales fuentes de arsénico en el Perú. El arsénico es un elemento natural que se encuentra comúnmente en forma de impureza en los minerales metálicos, entre las principales actividades que intensifican su liberación se encuentran la fundición de cobre y la extracción oro. De esta forma se delimitará geográficamente las regiones con mayor producción de cobre y oro como principal área de la investigación. A continuación, se presentan los cuadros de producción de cobre y oro según regiones (MINEM, 2017).

Tabla 1.1

Producción de cobre según región

PRODUCTO / REGIÓN	2016	2017	Part%	Var%
COBRE / TMF	157,317	196,317	100%	24.79%
AREQUIPA	36,676	43,238	22.02%	17.89%
APURIMAC	7,399	39,072	19.90%	428.05%
ANCASH	32,751	35,994	18.33%	9.90%
CUSCO	24,385	22,656	11.54%	-7.09%
JUNIN	14,136	15,272	7.78%	8.04%
MOQUEGUA	14,849	14,247	7.26%	-4.05%
TACNA	11,900	11,255	5.73%	-5.42%
PASCO	4,988	4,574	2.33%	-8.30%
ICA	3,637	3,063	1.56%	-15.79%
LIMA	2,340	2,490	1.27%	6.41%
CAJAMARCA	2,165	2,367	1.21%	9.33%
HUANCAVELICA	1,578	1,306	0.67%	-17.23%
PUNO	233	427	0.22%	83.30%
HUANUCO	117	162	0.08%	37.86%
LA LIBERTAD	97	158	0.08%	62.22%
AYACUCHO	66	35	0.02%	-46.21%

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2017)

Tabla 1.2

Producción de oro según región

PRODUCTO / REGIÓN	2016	2017	Part%	Var%
ORO / g finos	12,261,107	12,101,141	100%	-1.30%
LA LIBERTAD	3,366,212	3,197,245	26.42%	-5.02%
CAJAMARCA	3,001,617	2,866,108	23.68%	-4.51%
AREQUIPA	1,037,019	1,483,810	12.26%	43.08%
MADRE DE DIOS	1,958,869	1,225,440	10.13%	-37.44%
AYACUCHO	1,178,336	966,400	7.99%	-17.99%
PUNO	334,705	800,827	6.62%	139.26%
TACNA	540,290	384,561	3.18%	-28.82%
ANCASH	217,461	320,888	2.65%	47.56%
CUSCO	119,028	299,367	2.47%	151.51%
APURIMAC	196,765	189,163	1.56%	-3.86%
PASCO	121,294	167,063	1.38%	37.73%
JUNIN	50,779	60,408	0.50%	18.96%
PIURA	0	47,635	0.39%	+
MOQUEGUA	77,580	43,480	0.36%	-43.95%
LIMA	42,428	35,319	0.29%	-16.75%
ICA	13,191	12,882	0.11%	-2.35%
HUANCAVELICA	5,532	544	0.00%	-90.17%

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2017)

La delimitación del alcance geográfico del estudio de investigación se encontrará enfocado a las regiones de mayor producción de cobre y oro, ya que estas son las principales fuentes de contaminación del agua con arsénico. Entre las cuales se encuentran:

Tabla 1.3

Regiones con mayor producción

Región	Porcentaje de producción de cobre	Porcentaje de producción de oro
Ancash	18,33%	2,65%
Apurímac	19,90%	1,56%
Arequipa	22,02%	12,26%
Cajamarca	1,21%	23,68%
La Libertad	0,08%	26,42%

Elaboración propia

Limitaciones

Entre las limitaciones para el tema de la investigación, se debe mencionar que todos los estudios, pruebas y experimentos se realizaron a escala del laboratorio a condiciones ambientales características de la región de la costa del departamento de Lima. De esta forma se presentarán posibles variaciones con respecto a la delimitación geográfica planteada. A continuación, se mencionarán las condiciones ambientales de la investigación, brindada por los equipos de medición en el laboratorio.

Tabla 1.4

Condiciones ambientales

Presión	1 atm
Temperatura	18 °C
Humedad	99%

Fuente: Medición de condiciones propias en el laboratorio (2017)

1.5. Justificación de la investigación

1.5.1. Técnica

En la actualidad, se cuenta con la tecnología necesaria para elaborar adsorbentes avanzados elaborados a base de goma de tara; puesto que el proceso de fabricación de nanopartículas es accesible y el procesamiento para la obtención de la goma de tara también está desarrollado (MASAC, 2016). Sin embargo, aún no han sido empleados en conjunto para la preparación del adsorbente avanzado (Ponce Álvarez, 2015).

Asimismo, existen estudios que demuestran la utilidad del hierro y sus compuestos para la remoción del arsénico en aguas contaminadas, por lo que las nanopartículas de magnetita son adecuadas para el tratamiento (Jiaping, 2012).

1.5.2. Económica

Actualmente los sectores industriales están en crecimiento, especialmente el sector minero. Este sector es el mercado objetivo ya que toda la industria requiere agua y está obligada a tratarla antes de regresarla al ambiente; y al ser esta industria una de las que contribuyen más a la economía del país, se espera lograr resultados económicos favorables en este ámbito. Además, los costos de la materia prima y producción serán accesibles, por lo que los precios serán competitivos en el mercado (MINEM, 2017).

1.5.3. Social

La utilización del adsorbente avanzado mencionado en el presente trabajo de investigación podrá tener un impacto importante en la reducción de la cantidad de conflictos sociales registrados en nuestro país, debido a que disminuirá la concentración de arsénico. Este es uno de los factores más concurrentes en los conflictos sociales, puesto que, durante el mes de julio del 2017, se registraron 177 conflictos, de los cuales 130 (73,4%) se deben a problemas medioambientales, siendo 84 casos (64,6%) los correspondientes a actividades mineras.

A continuación, se detallan las cantidades de conflictos ambientales (número de casos) según actividad responsable, los cuales se buscan disminuir (Defensoría del Pueblo, 2017).

Tabla 1.5

Conflictos socioambientales en el Perú, según actividad - julio 2017

Actividad	Nº casos	%
TOTAL	130	100,00%
Minería	84	64,6%
Hidrocarburos	17	13,1%
Energía	12	9,2%
Otros	7	5,4%
Residuos y saneamientos	5	3,8%
Agroindustrial	3	2,3%
Forestales	2	1,5%
TOTAL	130	100,00%

Fuente: Defensoría del Pueblo (2017)

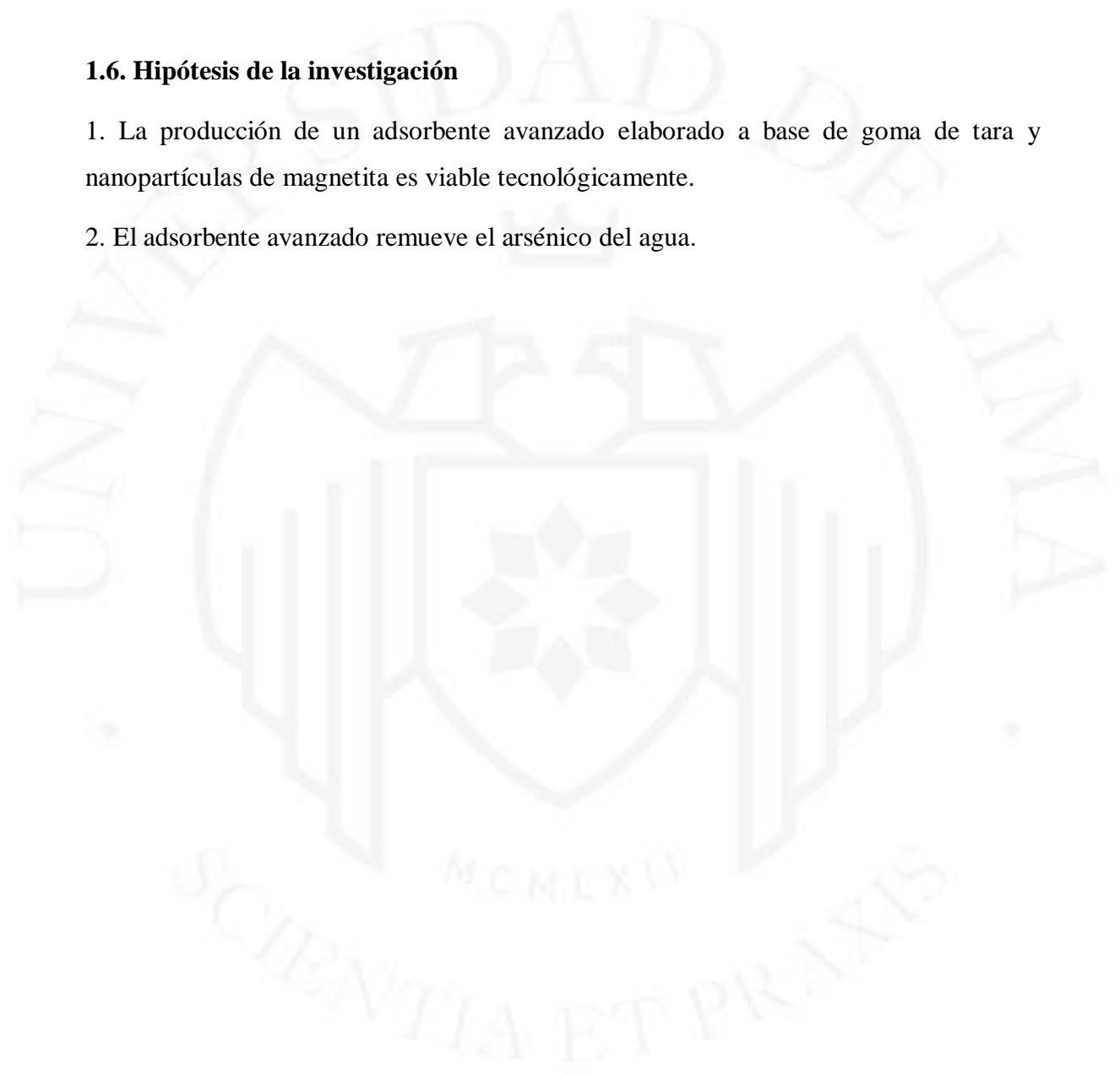
1.5.4. Ambiental

Diversas fuentes de agua en el Perú, tales como ríos, aguas superficiales y subterráneas, presentan una concentración de arsénico mayor a la recomendada por la OMS agua potable (10 µg/L), lo cual, como se mencionó anteriormente, es perjudicial para la salud de todo ser vivo. El río Rímac, principal fuente de agua para nuestra sociedad, mostró ser el sexto recurso hídrico más contaminado con este metaloide, con 27,1 µg/L de promedio de un rango entre 14,6 y 42,5 µg/L; dato alarmante para una realidad donde el 30% de la

población peruana se abastece de agua potable proveniente de este río. Por ende, el propósito del proyecto es la disminución de la concentración de arsénico de aguas contaminadas por este elemento. Además, el método de remoción propuesto es más amigable, ya que la materia prima y el producto son biodegradables, lo cual no alterará el entorno (Arias et al., 2014).

1.6. Hipótesis de la investigación

1. La producción de un adsorbente avanzado elaborado a base de goma de tara y nanopartículas de magnetita es viable tecnológicamente.
2. El adsorbente avanzado remueve el arsénico del agua.



CAPÍTULO II: ASPECTOS TEÓRICOS

2.1. Conceptos generales sobre tratamiento de agua – Origen de relaves y aguas ácidas de minas

El agua es esencial para la vida, es por ello que el tratamiento de ésta mantiene una alta relevancia para la humanidad, por ello los sistemas y métodos fueron evolucionando a lo largo de la historia.

El tratamiento de agua es un conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico y biológico los cuales tienen como fin la eliminación o reducción de elementos y características no deseadas en el agua, teniendo como producto agua a condiciones deseadas para reutilización, disposición, retorno al medio ambiente o su consumo sin generar impactos negativos en su tratamiento (Crittenden, Trussell, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2016).

Existen diferentes sistemas y operaciones para el tratamiento de aguas. Entre los más comunes podemos encontrar:

a) Desbaste

Mediante este proceso se eliminan los sólidos de gran tamaño, esto se realiza mediante mallas metálicas que filtran el paso de elementos sólidos de 10 a 20 milímetros de diámetro. Este tipo inicial de tratamiento de agua es muy relevante para evitar que las partículas de gran tamaño ingresen a los siguientes sistemas de filtración dañando los equipos (Vega de Kuyper, 1999).

b) Sedimentación

Mediante la sedimentación, se eliminan los elementos sólidos cuya densidad es mayor que la del agua, debido a esto las partículas quedan en el fondo siendo extraídas con mayor facilidad. Este tipo de tratamiento de agua puede realizarse más de una vez para asegurar la limpieza de este recurso (Crittenden et al., 2016).

c) Coagulación y Floculación

La coagulación y floculación son métodos y técnicas de tratamiento de aguas que se emplean en conjunto. Este tipo de método busca remover las partículas suspendidas en el agua, las cuales pueden reducir la calidad del agua hasta niveles no aceptables. La

coagulación implica el uso de polímeros en el agua para acondicionar la materia coloidal al desestabilizar y neutralizar su carga, la cual será removida en la floculación por medio de sedimentación o filtración de los flóculos (Crittenden et al., 2016).

d) Filtración

Este método de tratamiento de agua consiste en el uso de filtros por los cuales fluye el agua a tratar. La finalidad de estos filtros es atrapar o retener los materiales sólidos no deseados; los cuales pueden ser mayas metálicas, micro mayas, material granulado, cerámicas, entre otros. Este método puede ser empleado a diversas escalas; sin embargo, su aplicación requiere de una alta inversión.

Entre otros tipos de sistemas y operaciones unitarias más avanzadas se encuentran:

e) Osmosis inversa

La osmosis inversa es un tipo de purificación de agua de tecnología avanzada, esta se basa en aplicar presión sobre la disolución la cual pasa por membranas semipermeables. Las membranas no deben dejar pasar iones o moléculas grandes, con el fin de que se logre eliminar elementos como sales disueltas. Este tipo de tratamiento de agua es muy utilizado en procesos industriales, para la producción de agua potable, agua para calderos, desalinización de agua marina y agua subterránea (Crittenden et al., 2016).

f) Filtros de carbón activado

El carbón activado es carbón tratado, el cual se obtiene mediante la calcinación a altas temperaturas de materia orgánica obteniendo una estructura porosa. Existen diferentes métodos para su activación, tales como el uso de sustancias químicas, gases de combustión o vapor de agua. Este carbón se utiliza para la purificación de agua y permite la eliminación de productos químicos. El proceso es simple, el agua a tratar debe fluir en contacto con el carbón activado, el carbón activado adsorbe los químicos o estos se adhieren a su superficie. El carbón activado elimina fácilmente el cloro y metales como plomo o mercurio (Vega de Kuyper, 1999).

g) Tratamiento con ozono

El ozono logra una desinfección superior a la del cloro, gracias a su poder oxidante. El ozono permite la precipitación de metales pesados con facilidad, además elimina virus, bacterias y otros microorganismos que no pueden ser eliminados con el cloro. El ozono

actúa con mayor rapidez que el cloro y con menor tiempo de contacto con el agua a tratar; Sin embargo, carece del efecto de desinfección residual que tiene el cloro (Vega de Kuyper, 1999).

Origen de los relaves

Los relaves son los desechos que merman de una actividad industrial minera dado en los procesos metalúrgicos, este es un lodo que contiene material sólido generalmente compuesto por roca molida, minerales sin valor y agua. Si bien los relaves obtenidos por procesos metalúrgicos pueden contener mineral de ganga y mineral valioso también llegan a ser muy nocivos para el medio ambiente en muchos casos, ya que estos pueden contener metales pesados, productos químicos (residuos de los reactivos usados para la concentración de minerales) y otros elementos tóxicos tales como el mercurio. En actividades mineras, los relaves son colocados en lugares adyacentes a la zona de actividad y son eliminados directamente al medio ambiente o almacenados en lugares adecuados, entre las alternativas de eliminación de relave se encuentra la descarga en medio líquido, descarga en tierra y relleno de mina (Vega de Kuyper, 1999); (Díaz Cartagena, 1999).

Aguas ácidas

Las aguas ácidas se producen por oxidación química o biológica de los sulfuros; el drenaje de aguas ácidas producto de actividad minera es una de las amenazas más graves para el medio ambiente, éstas afectan directamente al agua y el suelo. En actividades mineras, durante el proceso de extracción de los metales tales como oro, plata o cobre, los sulfuros, especialmente la pirita, son expuestos al ambiente mediante desmontes o yacimientos los cuales pueden tener contacto con agua de lluvias, flujos de agua subterránea o en contacto con la humedad, en este medio se produce la oxidación generando ácido sulfúrico. Este ácido puede disolver otro tipo de elementos dañinos para el medio ambiente tales como el arsénico, los cuales son liberados en desmontes, pozos abiertos, canales subterráneos o pilas de lixiviación. El drenaje de aguas ácidas generalmente tiene un pH cercano a 3. Este tipo de contaminación afecta los ríos, suelos, entre otro tipo de agentes receptores de agua, dañando las condiciones de vida en el medio ambiente (Instituto Geológico y Minero de España, 2004); (Díaz Cartagena, 1999).

2.2. Conceptos básicos del arsénico y su toxicidad

El arsénico es un elemento natural con propiedades metálicas y no-metálicas, de color gris. Se encuentra presente de forma natural en la corteza terrestre y es expuesto al ambiente por el resultado de actividades humanas. Por otro lado, se encuentra de forma orgánica en presencia de carbono e hidrógeno, y de forma inorgánica al encontrarse en el ambiente en presencia de oxígeno, cloro o azufre; siendo esta la considerada más tóxica.

Tabla 2.1

Propiedades químicas del arsénico

Arsénico	
Símbolo	As
Número atómico	33
Grupo	15
Periodo	4
Clasificación	Metaloide
Masa atómica	74,92159
Configuración electrónica	3d ¹⁰ 4s ² 4p ³

Fuente: Barbalace (2014)

El arsénico en el entorno

El arsénico puede encontrarse en abundancia en la corteza terrestre y en menor cantidad en el agua y aire. Una de las principales fuentes naturales proviene de la liberación de As en el ambiente de los minerales que contienen As, éste es liberado de forma natural mediante la disolución del mineral mediante factores químicos y atmosféricos llegando a contaminar el suelo y agua. Por otro lado, el arsénico es también producto de actividades humanas entre ellas actividades mineras o fundición de metales.

El arsénico también es liberado al ambiente mediante el uso de pesticida agrícola, herbicidas, fertilizantes fosfatados y productos químicos que sirven para la preservación de madera. En los Estados Unidos, el límite máximo permisible de As en el suelo es de 24 mg kg⁻¹ (U.S. Environmental Protection Agency), contaminación que se ve intensificada por las actividades humanas mencionadas. En suelos europeos, el promedio estimado de concentración de As es de 7,0 mg kg⁻¹ (Singh R., Singh S., Parihar, Singh V., & Prasad, 2014).

A continuación, se presentan dos tablas que muestran la concentración de As en aguas subterráneas en diferentes países afectados; así como, en ríos y lagos de algunos países.

Tabla 2.2

Concentración de arsénico en aguas subterráneas de países afectados con arsénico

Ubicación (Países)	Concentración en $\mu\text{g L}^{-1}$	Fuentes de arsénico
Argentina, Pampa, Córdoba	100-3810	2 - 15 m, 61°45'-63°W; 32°20'-35°00'S
Argentina, Córdoba	> 100	
Bangladesh	< 10 - > 1000	Agua de pozo
Calcutta, India	< 50 - 23.080 >	Sedimentos puro - Arsénico
Chile	470 - 770	
Fukuoka, Japón	0,001 - 0,293	Origen natural
Hanoi, Vietnam	1 - 3050	Sedimentos puro - Arsénico
Hungría	1 - 174	Aguas subterráneas profundas
Mongolia Interior, China	1 - 2400	Agua potable, pozos
Region Lagunera, México	8 - 624	Agua de pozo
Mekong, Camboya	1 - 1340	Agua subterránea
Provincia Nakgon Si Thammarat, Tailandia	1,25 - 5114	Aguas subterráneas poco profundas, minería
Nepal	8 - 2660	Agua potable
Nororiente Ohio	< 1 - 100	Origen natural
Perú	500	Agua potable
Romania	1 - 176	Agua potable de pozo
Ronpibool, Tailandia	1 - 5000	Agua contaminada por desechos de minería
Shanxi, China	0,03 - 1,41	Agua de pozo
Sur-este, Finlandia	17 - 980	Agua de pozo; Origen natural
Bengal Oeste, India	3 - 3700	Sedimentos puro - Arsénico
Occidente USA	1 - 48.000	Agua potable
Xinjiang, China	0,05 - 850	Agua de pozo

Fuente: Singh et al. (2014)

Tabla 2.3

Concentración de arsénico en algunos sistemas acuáticos mayores (ríos, lagos, desembocadura y marino) del mundo

Sistemas acuáticos y ubicación	Concentración de arsénico (promedio/rango, $\mu\text{g L}^{-1}$)
Lagos	
Lago Biwa, Japón	2,2 (0,6 - 1,7)
Lago Moira, Ontario, Canadá	20,4 (22,0 - 47,0)
Lago Mono, California, USA	10.000 - 20.000
Marinos y Desembocaduras	
Bunnefjord, Noruega	0,5 - 1,9
Costas, Malasia	1,0 (0,7 - 1,8)
Costa Najaminato, Japón	3,1
Pacífico y Atlántico profundo	1,0 - 1,8
Desembocadura Krka, Yugoslavia	0,1 - 1,8
Desembocadura Ródano, Francia	2,2 (1,1 - 3,8)
Bahía Saanich, B.C., Canadá	1,2 - 2,5
Desembocadura Schelde, Bélgica	1,8 - 4,9
Costa Sureña, Australia	1,3 (1,1 - 1,6) (inorgánico)
Costa Sureste, España	1,5 (0,5 - 3,7)
Desembocadura Tamar, UK	2,7 - 8,8
Bahía Uranouchi, Japón	22,0 - 32,0
Vestfjord, Noruega	0,7 - 1,0
Ríos	
Ashanti, Ghana	284 (< 2 - 7.900)
Córdoba, Argentina	7 - 114
Dordogne, Francia	0,7
Rio Madison y Missouri, USA	44 (19 - 67), 10 - 370
Rio Mole, NSW, Australia	110 - 600 (hasta 13.900)
Rio Owens, CA, USA	85 - 153
Rio Po, Italia	1,3
Ron Phibun, Tailandia	218 (4,8 - 583)
Waikato, Nueva Zelanda	32 (28 - 36)

Fuente: Singh et al. (2014)

Toxicidad del arsénico

El arsénico puede movilizarse en el medio ambiente por el aire, agua o suelo. La lluvia y el viento puede transportar partículas de arsénico largas distancias, de esta forma pueden llegar a ríos o aguas subterráneas y en algunos casos sedimentar.

La concentración de arsénico en el suelo puede variar según las zonas de estudio, en zonas metropolitanas el rango es de 1 a 20 ppm siendo la media entre 3 a 4 ppm, lo cual no representa una gran amenaza para la zona. Sin embargo, en zonas cercanas a depósitos geológicos, zonas mineras o de fundición la concentración es mucho más

elevada, generalmente en aguas subterráneas se encuentra mayor concentración de arsénico que en la superficie.

Los organismos en el ambiente pueden reaccionar de forma diferente ante la presencia o contaminación por arsénico, esto dependerá mucho de la forma química del arsénico. En su forma inorgánica, la cual es la más tóxica puede llegar a causar efectos negativos, así como la reducción de especies en el ambiente y la disminución de la proliferación de organismos en la zona.

En los humanos la vía de contaminación es mediante la ingestión de As, ya sea por el consumo directo de agua contaminada o mediante la ingesta de alimentos contaminados. El consumo de agua contaminada con As atenta contra la salud de más de 150 millones de personas en todo el mundo y gran parte de los países más afectados se encuentran en el Sur y Sudeste de Asia. La contaminación de alimentos de consumo humano se da debido a que estos alimentos son irrigados con agua subterránea que fue contaminada con As, por ende, estos alimentos crecen contaminados directamente con este metaloide. Este es un peligro potencial para el humano, ya que está expuesto a consumir alimentos contaminados con As (Singh et al., 2014).

Los efectos en la salud humana debido a la ingesta de As pueden presentarse en enfermedades crónicas, envenenamiento severo y hasta la muerte. En una intoxicación aguda por ingesta el As ingresa rápidamente a la corriente sanguínea, por lo que el intestino, el corazón y el sistema nervioso se ven afectados, causando efectos tales como vómitos, diarrea y dolor abdominal, problemas cardiovasculares hasta la muerte. La intoxicación crónica por As es a causa de su ingesta prolongada en cantidades menores, esta puede traer enfermedades tales como pigmentaciones en la piel, cáncer de la piel, pulmón, vejiga o riñón, melanosis, leuco-melanosis, dorso, gangrena, hiperqueratosis y queratosis. Su inhalación afecta el sistema respiratorio generando deformación de las vías respiratorias y cáncer de pulmón (Singh et al., 2014).

El ser humano está expuesto a este elemento tanto por la ingestión de alimentos o la inhalación de aire, su ingesta puede ser eliminado rápidamente por la orina. Sin embargo, en casos de exposición a grandes cantidades de arsénico inorgánico pueden generar severas enfermedades hasta la muerte (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2005).

2.3. Definición y características de la goma de tara

La goma de tara es un polisacárido natural que proviene de la semilla del fruto del árbol de tara, *Caesalpinia spinosa*, que es autóctono del Perú. La goma de tara tiene un alto peso molecular y químicamente está formado por monómeros de manosa y galactosa en relación 3:1, tiene bajo contenido de proteínas, generalmente es de color blanco a crema, inodora, insípida y estable a temperatura ambiente (GELYMAR, 2017).

Se aplica bastante en el rubro alimenticio, como en los helados, embutidos o bebidas. También se usa en cosméticos ya que la goma de tara tiene propiedades emulsionantes y adhesivas.

Entre sus propiedades, la goma de tara se hidrata en solución sin necesidad de calentar y requiere de simple agitación a alta velocidad, aumentando su fuerza gel, tiene propiedades no-iónicas y es compatible con hidrocoloides de origen vegetal, almidones y CMC¹. Su estabilidad es alta en solución de pH con rango de trabajo entre 4 a 10 (GELYMAR, 2017).

Tabla 2.4

Especificaciones de la goma de tara

Característica	Descripción
Apariencia	Polvo fino de color crema a blanco
Humedad	Menor a 8%
Granulometría	Malla #80, 100, 140
Contenido de ceniza	0,08%
Contenido de grasa	Menor a 2%
Almidones	Ausente
Solubilidad	Parcialmente soluble en agua fría, soluble en agua caliente, insoluble en alcohol
Viscosidad a 20°C	No menos a 3000 cps
pH (1% Solución)	5,5
Partida Arancelaria	2106909100

Fuente: SIICEX (2017); Jacinto J.; Barraza G. (2006)

¹ CMC: Carboximetilcelulosa o caramelosa

Figura 2.1

Vainas de tara, semillas y goma de tara



Fuente: Peruvian tara S.A.C. (2017)

2.4. Definición y clasificación de los nanomateriales

Los nanomateriales son pequeñas partículas con rangos de tamaño de 1 a 100 nm. Las nanopartículas (NP) poseen propiedades físicas y químicas únicas debido a su gran área de superficie y tamaño de nanoescala. Por ejemplo, su reactividad y dureza dependen de su tamaño, forma y estructura. Debido a estas características, son materiales adecuados para diversas aplicaciones comerciales y domésticas, que incluyen catálisis, aplicaciones médicas, investigación basada en la energía y aplicaciones medioambientales (Khan I.; Khan I.; Saeed, 2017).

Clasificación

Los nanomateriales se pueden clasificar en diferentes clases según su origen, dimensión y configuración estructural.

De acuerdo al origen del nanomaterial

- **Nanomateriales naturales:** Son aquellos que, provenientes de un recurso natural, son tratados para obtener tamaños nanométricos. Por ejemplo: materiales naturales mineralizados como las conchas y corales, gelatina (tipo gel), coloides, etc.
- **Nanomateriales artificiales:** Partículas que son preparadas a partir de reactivos químicos. Ejemplos: nanotubos de carbono, nanopartículas semiconductoras, etc.

Debido a que el adsorbente es una mezcla entre nanopartículas de magnetita y goma de tara, abarca ambos orígenes, tanto el natural como el artificial.

De acuerdo a las dimensiones

- Cero dimensiones (0-D): Son nanomateriales que cuentan con nano-dimensiones en sus tres dimensiones. Por ejemplo: las nanopartículas metálicas y los *quantum dots*. Los tamaños de partículas considerados para esta clasificación se encuentran en un rango de 1-50 nm.
- Una dimensión (1-D): En esta nanoestructura, una dimensión es la que sobresale dando lugar a estructuras como *nanowires*, *nanorods* y *nanotubes*².
- Dos dimensiones (2-D): En esta clasificación, son 2 las dimensiones que predominan, produciendo diferentes tipos de nano-películas como los recubrimientos de multicapa, nano-hojas y *nanowalls*³.
- Tres dimensiones (3-D): Estas estructuras presentan todas sus dimensiones en una escala mayor llegando a los 100nm (Bose, 2017).

El adsorbente avanzado corresponde a la categoría 0-D debido a que no presenta ninguna dimensión sobresaliente ni forma ninguna estructura.

De acuerdo a la configuración estructural

- Nanomateriales basados en carbono: Son aquellos cuya estructura se basa en el carbono, formando diferentes configuraciones tales como esferas, elipsoides y tubos huecos. Ejemplo: fulerenos y nanotubos.
- Nanomateriales basados en metales: Corresponden a los nanomateriales cuyo principal componente es el metal, tales como nano-oro, nano-plata y metales óxidos.
- Dendrímeros: Son estructuras muy ramificadas cuya superficie posee numerosas cadenas que pueden modificarse para realizar funciones químicas específicas.
- Compósitos: Son nanocompuestos sólidos multifásicos, donde al menos una de sus fases tiene una dimensión a nanoescala. Ejemplos: coloides, geles y copolímeros (Bose, 2017).

² Nanowires: nanocables; nanorods: nanobarras; nanotubes: nanotubos

³ Nanowalls: nanoparedes

Debido a su composición, el adsorbente avanzado desarrollado en este trabajo, corresponde a un compósito ya que contiene una fase a escala nanométrica que es la magnetita.

2.5. Proceso de adsorción

Cuando los átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son atrapados en una superficie se produce la adsorción. Este proceso logra así eliminar ciertos componentes de una mezcla gaseosa o líquida; a diferencia de la absorción, que es la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido (absorbente), con el fin de recuperar un componente gaseoso deseado, eliminar un componente gaseoso no deseado u obtener un líquido (Hamburg, s.f.).

En el proceso de adsorción, el sólido que retiene las moléculas deseadas recibe el nombre de adsorbente, y el componente que se adsorbe en él se denomina adsorbato. El adsorbente debe tener afinidad, preferente a un solo adsorbato, y no a los demás componentes de la mezcla a separar. Así también, el adsorbente debe presentar una gran superficie específica (gran porosidad) y tener una buena capacidad de regeneración, esto último con el fin de que pueda ser reusado. El proceso mediante el cual se obtiene el adsorbente apto para su re-uso es la desorción (Hamburg, s.f.).

Los tipos de adsorción según la atracción entre soluto y adsorbente son:

- Adsorción por intercambio: Ocurre cuando los iones de la sustancia se concentran en una superficie como resultado de la atracción electrostática en los lugares cargados de la superficie.
- Adsorción física o fisisorción: Tiene lugar mediante interacciones denominadas fuerzas de Van der Waals o fuerzas de dispersión London, que dan lugar a una atracción débil entre el adsorbato y el adsorbente.
- Adsorción química o quimisorción: Se presenta mediante enlaces químicos, dando lugar a fuerzas de interacción mayores (INCAR -CSIC, 2011).

A continuación, se listan algunas de las principales aplicaciones de la adsorción:

- Purificación de aguas residuales
- Descontaminación de gases
- Eliminación de olores, sabores o colores no deseados por ejemplo en aceites
- Des humidificación de gasolinas

- Secado de aire
- Ciencia forense (revelado de huellas dactilares) (INCAR -CSIC, 2011).

2.6. Estado del arte

El agua potable contaminada con arsénico es una gran amenaza para la humanidad. A pesar de que en pequeñas cantidades no representa un riesgo, se sabe que es altamente tóxica si se ingiere en grandes dosis. Las concentraciones más elevadas se encuentran en aguas subterráneas en algunas áreas de India, Bangladesh, Chile, China, Argentina, México, Hungría, Taiwán, Vietnam, Japón, Nueva Zelanda, Alemania y los Estados Unidos (Singh et al., 2014). Debido a las crecientes evidencias reportadas de efectos tóxicos del arsénico, se elaboraron regulaciones más estrictas para limitar su descarga a las alcantarillas y los cuerpos de agua (Jiaping, 2012).

Con el fin de reducir el riesgo para la salud debido al consumo directo de agua potable contaminada o debido al consumo de alimentos y/o vegetales cultivados en el suelo irrigado con agua contaminada, se han desarrollado diversas estrategias o técnicas para su tratamiento. La eliminación de arsénico depende en gran medida de la composición química del agua contaminada. Arsenito y arseniato son formas primarias de arsénico en suelos y aguas naturales, siendo el As (III) la mayor incidencia reportada en aguas subterráneas; por lo que la oxidación de As (III) a As (V) se considera necesaria para lograr los resultados satisfactorios de la eliminación de este metaloide (Singh et al., 2014).

Existen diversas tecnologías de tratamiento y diferentes adsorbentes que se emplean para eliminar este metaloide del agua y que se han fomentado en los últimos años. A continuación, se detallarán las principales tecnologías de tratamiento que incluyen procesos físicos, químicos y biológicos; así como diversos adsorbentes (Reinsel, 2015).

Figura 2.2

Técnicas usadas para la remoción de arsénico en aguas contaminadas



Fuente: Singh et al. (2014)

Tecnologías de tratamiento físicas y químicas

Algunos de los principales tratamientos físicos y químicos son los siguientes:

- Precipitación
- Oxidación
- Coagulación / filtración (CF)
- Medios adsorbentes o de adsorción
- Intercambio iónico

a) Precipitación

La precipitación es el proceso por el cual los metales disueltos se hacen insolubles, generalmente como hidróxidos de metal, sulfuros de metal y carbonatos de metal. La precipitación consiste en la formación de un sólido en una solución o dentro de otro sólido

durante una reacción química o por difusión en un sólido (coprecipitación). Cuando la reacción se produce en un líquido, el sólido formado se denomina precipitado y el líquido que queda por encima del sólido se denomina sobrenadante.

La precipitación es la tecnología más convencional utilizada para la producción de materiales inorgánicos, la eliminación de desechos tóxicos o la recuperación de metales preciosos. Más del 75% de las operaciones de tratamiento de metales emplean esta tecnología. Sin embargo, crea una gran cantidad de precipitados de metal, que requieren tratamiento adicional y eliminación (Jiaping, 2012).

Existen varios reactivos de tratamiento aniónico (ligantes) para la precipitación de iones de metales pesados, tales como los iones de hidróxido, carbonato, fosfato y sulfuro. Los criterios de selección importantes son el costo, la eficacia del tratamiento y la facilidad en el post-tratamiento. Generalmente, es más simple entender la importancia del primer y segundo criterio, que del último. Es por esto, que la facilidad en el post-tratamiento no es tomada en consideración. Como las aguas residuales contienen típicamente otros iones metálicos no necesariamente tóxicos, pueden precipitarse junto con los iones de metales pesados. Por ejemplo, la falta de evaluación del último criterio se observa cuando se utiliza el carbonato de sodio para eliminar iones, lo cual conduce a un consumo adicional de carbonato (más costoso) y más precipitados (lodo) para tratar.

En el caso particular del arsénico, se realizaron pruebas de laboratorio y de campo para evaluar la efectividad de un proceso de filtración doméstica e investigar los efectos del fosfato y el silicato sobre la eliminación de arsénico de aguas subterráneas de Bangladesh mediante hidróxidos férricos. Como resultado se requirieron ratios Fe/As de más de 40 (mg/mg) para reducir el arsénico a menos de 50 $\mu\text{g/L}$ en agua de pozo de Bangladesh y el agua subterránea simulada en presencia de fosfato, silicato y otras impurezas (Jiaping, 2012).

Las sales de calcio, hierro o aluminio como la cal y el cloruro férrico pueden agregarse al agua contaminada con arsénico para su eliminación. Estos iones metálicos pueden formar una serie de precipitados metálicos tales como hidróxidos de calcio, hierro o aluminio. Estas especies de arsénico y otras sustancias solubles o insolubles pueden unirse al aluminio insoluble y a los hidróxidos férricos a través de la atracción electrónica o de la exposición química. Además, los iones de arsénico pueden formar precipitados junto con aluminio o iones férricos (Jiaping, 2012).

Ciertas condiciones como el pH, la concentración inicial del agua contaminada, la presencia de iones competitivos y la dosificación de coagulantes son importantes para el uso de la tecnología. Por ejemplo, el efecto inicial de la concentración de arsénico influye en su eliminación. Para una dosis de cloruro férrico de 4,9 mg/L, pH 7,0, y concentraciones de arsénico iniciales que varían de 0,002 a 0,1 mg/L, las eficiencias de remoción de As (III) y As (V) fueron independientes a las concentraciones iniciales (Jiaping, 2012).

Para concentraciones iniciales de As (V) entre 0,1 y 1,0 mg/L, una dosificación de 30 mg/L de sulfato de aluminio o sulfato férrico elimina más del 95% de As (V). Por encima de una concentración inicial de 1,0 mg/L, la eficacia de la eliminación disminuyó a medida que la concentración era creciente. Para concentraciones iniciales de As (III) mayores a 0,1 mg/L, ni el sulfato doble de aluminio de potasio ni el sulfato férrico dosificado a 30 mg/L pueden disminuir la concentración por debajo de 50 ppb (Jiaping, 2012).

Con una dosis de cloruro férrico o superior a 20 mg/L o sulfato doble de aluminio de potasio ($KAl(SO_4 \cdot 12H_2O)$) por encima de 40 mg/L se puede lograr una remoción de más de 90% de As (V). Se demostraron que las eficiencias de eliminación óptimas de As (V) mediante sales férricas se dan en pH 5-7,2 y pH 5-7,0, respectivamente, mediante las cuales se logró una concentración final por debajo de 10 ppb. Sin embargo, el porcentaje de eliminación de As (III) fue del 40% al 50%, mucho menos que la del As (V). Por lo tanto, debe realizarse una pre-oxidación de As (III) a As (V) para la mejora y aumento de eficiencia en el tratamiento. Esta pre-oxidación se puede lograr mediante pre-ozonización y/o pre-cloración (Jiaping, 2012).

b) Oxidación

La oxidación es un proceso químico típicamente usado en conjunto con otros procesos para el retiro de arsénico, cuyo principal objetivo es convertir el As (III) en As (V). El arsenito, dentro del cual el arsénico se encuentra con estado de oxidación 3^+ , es más soluble en el agua y no tiende a generar reacciones de precipitación/adsorción como el arseniato, cuyo estado de oxidación es 5^+ . En consecuencia, un oxidante como el cloro, el peróxido de hidrógeno, el permanganato de potasio, o el ozono debe ser añadido para oxidar As (III) a As (V) (Reinsel, 2015).

Sin embargo, el oxidante químico más probado en presencia de hierro de origen natural es la luz UV, dando lugar a la técnica de oxidación fotoquímica. Está demostrado que la tasa de oxidación de As (III) en el agua puede aumentar mediante irradiación UV en presencia de oxígeno, debido a que la luz ultravioleta o solar ayuda a generar radicales hidroxilos a través de la fotólisis de las especies Fe (III), lo cual causa que la velocidad de oxidación sea más rápida. Asimismo, en solución de perclorato o perclórica a pH 0,5-2,5, la adición de Fe (III) a agua contaminada con As, seguida de la exposición a luz ultravioleta/solar mejoró la eliminación de As. Además, estudios demuestran que las especies de cloro e hidróxido de Fe (III) absorben fotones para producir radicales hidroxilos y dicloro altamente oxidantes que convierten As (III) en As (V). Una oxidación de la solución As (III) que contenía 0,06-5 mg/L de Fe (II) y Fe (III) usando luz UV-A de 90 Wm^{-2} eliminó más del 90% del 500 $\mu\text{g/L}$ As en 2-3 horas. La adición de citrato a esta solución aceleró considerablemente la oxidación de As (III), arsenito inorgánico. De acuerdo a ese estudio, en lugar de luz ultravioleta, la luz solar también puede eliminar arsénico del agua natural al agregar hierro y citrato (Singh et al., 2014).

c) Coagulación / filtración

Una tecnología económica para la remoción de arsénico es la coagulación y la precipitación (procesos químicos) seguido de la filtración (un proceso físico), que es la llamada Coagulación/Filtración (CF) en la industria de purificación de agua (Reinsel, 2015).

Los coagulantes cambian las propiedades de carga superficial de los sólidos para permitir la aglomeración de partículas. Los productos finales son partículas más grandes o flóculos, que se asientan debido a la fuerza de la gravedad o se filtran con mayor facilidad. La desestabilización de los coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, es el propósito de la coagulación. Los coagulantes catiónicos cargados positivamente proporcionan cargas eléctricas positivas para reducir la carga negativa superficial, como resultado, se forman partículas más grandes debido a la aglomeración de estas; de manera inversa, los coagulantes aniónicos proporcionan cargas eléctricas negativas para reducir la carga positiva superficial produciendo dicha aglomeración. Los más comunes son las sales de aluminio como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), y sales férricas tales como cloruro férrico (FeCl_3) o sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). La floculación es la acción de los polímeros para formar puentes entre las partículas de masa

más grandes y unir las en los grandes aglomerados. En esta técnica, los agentes químicos comúnmente usados son polímeros aniónicos, catiónicos o no iónicos debido a su bajo costo y relativa facilidad de manejo. En cuanto a la eliminación mediante este proceso, las sustancias químicas forman As disuelto en sólido insoluble que se precipita posteriormente (Singh et al., 2014). Sin embargo; la coagulación utilizando sulfato doble de aluminio de potasio es generalmente menos eficiente que la coagulación empleando hierro, tal que este sulfato sólo debería ser usado en sistemas con concentraciones bajas de arsénico (Reinsel, 2015).

A continuación, se muestra el sistema de Coagulación/Filtración de la empresa Pureflow – EE.UU.

Figura 2.3

Sistema de Coagulación/Filtración – Empresa Pureflow



Fuente: Reinsel (2015)

d) Medios adsorbentes o de adsorción

Nuevos adsorbentes han sido desarrollados para eliminar metales y metaloides como el arsénico de aguas contaminadas, los cuales pueden ser usados para reemplazar o para aumentar el rendimiento de la tecnología Coagulación/Filtración. La mayor parte de los adsorbentes para este tipo de remoción está elaborada a base de hierro (Reinsel, 2015).

Otros adsorbentes ampliamente comercializados son los carbones activados, los cuales se han utilizado ampliamente para la adsorción de As (III) y As (V) del agua. Se investigó la adsorción de carbón activado en la eliminación de arsénico de las soluciones de electrolítico refinado de cobre, donde se obtuvo una capacidad de adsorción de 2,87 mg y 3,8 mg/g de arsénico III y V respectivamente (Dinesh Mohan, 2007).

Del mismo modo, una variedad de arenas recubiertas y tratadas fueron empleadas para la remediación de arsénico. La arena recubierta con óxido de hierro tenía más poros y un área superficial específica alta. Se utilizaron arenas verdes de manganeso (MGS), arena recubierta con óxido de hierro (IOCS tipo 1 y 2) y columnas de resina de intercambio iónico (forma Fe^{3+}) para la eliminación del dimetilarsinato del agua del grifo (Dinesh Mohan, 2007). Los estudios demostraron una capacidad de adsorción de arsénico empleando la arena recubierta con óxido de hierro de 8 g/g IOCS tipo 2. Además, se logró una alta capacidad de eliminación de arsénico ($5,7 \mu\text{g}/\text{cm}^3$) con esta resina, a comparación de los otros adsorbentes, debido a que se obtuvo un bajo rendimiento con MGS e IOCS tipo 1. También se sintetizó una esponja recubierta de hierro (IOCSp) para la eliminación de As (III) y As (V). Cada gramo de IOCSp adsorbió aproximadamente 160 μg de arsénico en 9 horas (Dinesh Mohan, 2007).

e) Intercambio iónico

Esta técnica corresponde a un proceso físico-químico en el cual un ion de la resina sólida se intercambia por un ion del agua de alimentación (Singh et al., 2014). El proceso de intercambio iónico emplea resinas con determinada carga electrónica de acuerdo al tipo de contaminante que se desea eliminar (Reinsel, 2015). Por ejemplo, el As (V) puede ser removido fácilmente mediante el uso de una resina de intercambio aniónico de base fuerte en forma de cloruro o hidróxido (Singh et al., 2014).

La ventaja de este proceso es que se regenera periódicamente y las resinas se pueden reutilizar después de la adsorción del arsénico. Sin embargo, para la regeneración se emplea hidróxido de sodio y cloruro de sodio, lo cual ocasiona un líquido residual con alta concentración de arsénico, que es la principal desventaja de este proceso (Reinsel, 2015).

En general, el intercambio iónico para la eliminación de arsénico solo es aplicable para aguas con bajo contenido de sulfatos y de sólidos disueltos. La eliminación de As puede verse afectada por la presencia de hierro (Fe^{3+}) en el agua de alimentación; puesto

que el arsénico puede formar complejos con hierro, los cuales no se eliminan mediante estas resinas (Singh et al., 2014).

Tecnología de tratamiento biológico

El proceso ABMet desarrollado por Applied Biosciences de Salt Lake City (Utah, Estados Unidos) utiliza la reducción biológica de sulfato para precipitar arsénico y metales pesados, y además nitrato, selenio y mercurio. En este proceso, un nutriente orgánico se agrega continuamente para alimentar a las bacterias. Una desventaja es que los sistemas biológicos para la eliminación de arsénico requieren un tiempo de residencia relativamente largo, entre 4 a 8 horas. No obstante, el sistema requiere poco mantenimiento. ABMet se ha instalado en varias ubicaciones en Norteamérica y Europa, tratando caudales de hasta 2 millones de galones por día (MGD), y ha sido exitoso con aguas con alto contenido de TDS⁴ (35 mg/L) y baja temperatura (4 °C) (Reinsel, 2015).

Otro ejemplo es la bioadsorción, proceso capaz de eliminar trazas de metales pesados y otros elementos de soluciones acuosas diluidas (Dinesh Mohan, 2007). Los métodos de tratamiento biológico permiten que ciertas plantas y microorganismos ayuden en la remediación de metales en el suelo y las aguas subterráneas (Singh et al., 2014). Esta técnica consiste en la inmovilización pasiva de metales por biomasa. Los mecanismos de adsorción de la superficie celular son independientes del metabolismo celular; ya que se basan en interacciones fisicoquímicas entre metal y grupos funcionales de la pared celular. La pared celular del microorganismo consiste principalmente en polisacáridos, lípidos y proteínas, que tienen muchos sitios de unión para los metales; por lo que la unión de metales es rápida. Algunos estudios que han empleado algas, hongos y bacterias como bioadsorbentes han producido resultados alentadores. Por ejemplo, el estudio realizado en Alemania por Geoffrey Gadd y en Estados Unidos por Corale Brierley, demuestran cómo las bacterias, hongos y algas pueden retener iones metálicos tóxicos (Dinesh Mohan, 2007). Otro ejemplo es el estudio realizado por Katsoyiannis y Zouboulis, quienes demuestran que los microorganismos *Gallionella ferruginea* y *Leptothrixochracea*, depositados en un medio filtrante, pueden oxidar el As(III) a As(V), logrando una adsorción y eliminación de arsénico de hasta 95%, incluso a altas concentraciones iniciales de As de 200 mgL⁻¹ (Singh et al., 2014).

⁴ TDS (Total Dissolved Solids): Sólidos disueltos totales

Asimismo, el polvo de quitosano, proveniente de caparazón de camarón, trabajado en forma de perlas se empleó para eliminar As (III) y As (V) del agua. El valor de pH óptimo para la eliminación de As (III) y As (V) fue 5; y se obtuvieron capacidades de adsorción de 1,83 y 1,94 mg As/g para As (III) y As (V), respectivamente (Dinesh Mohan, 2007).

Incluso, se ha examinado la capacidad de adsorción de cabellos humanos para la remoción de arsénico de agua potable contaminada, para lo cual se realizaron pruebas estáticas y dinámicas junto con el modelamiento numérico, dando como resultado una capacidad máxima de adsorción de 12,4 $\mu\text{g/g}$ para una concentración de arsénico de 360 $\mu\text{g/L}$ (Dinesh Mohan, 2007).



CAPÍTULO III: DISEÑO EXPERIMENTAL

Preliminarmente al diseño experimental se realizó un estudio sobre los posibles métodos de preparación existentes para la obtención del biocompósito. Se eligieron los métodos más sencillos y con mayor rendimiento, adicionalmente el método elegido no requiere de alta variedad de equipamiento para su producción industrial.

Asimismo, se realizó la caracterización del biocompósito obtenido utilizando diversas técnicas como Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía Electrónica de Transmitancia (TEM), Área Superficial B.E.T.⁵ (S_{BET}), Viscosidad, Titulación Potenciométrica y pruebas de Magnetización.

3.1. Métodos de preparación

Método 1: Coprecipitación

Un método muy utilizado para la síntesis de óxidos de hierro es la coprecipitación de soluciones salinas acuosas Fe^{2+} y Fe^{3+} mediante la adición de una base. Convencionalmente, la magnetita se prepara añadiendo una base a una mezcla acuosa de Fe^{2+} y Fe^{3+} a una relación molar de 1:2. El control de tamaño, la forma y composición de las nanopartículas depende de la relación Fe^{2+} y Fe^{3+} , del tipo de sales utilizadas (por ejemplo, cloruros, sulfatos, nitratos y percloratos), del pH y de la fuerza iónica del medio (Cardoso, 2008).

El método de coprecipitación empleado para el presente estudio empieza con la preparación de las soluciones de cloruro férrico ($FeCl_3$), cloruro ferroso ($FeCl_2$), goma de tara e hidróxido de amonio (NH_4OH), este hidróxido se utilizó como base en el proceso de síntesis.

Para la solución de goma de tara se preparó una solución de 0,62% m/m en agua desionizada, la cual se agitó por espacio de 3 horas a 500 revoluciones por minuto (rpm), tiempo requerido para su maduración.

⁵ Siglas que corresponden a los 3 científicos que desarrollaron esta técnica: Brunauer-Emmet-Teller

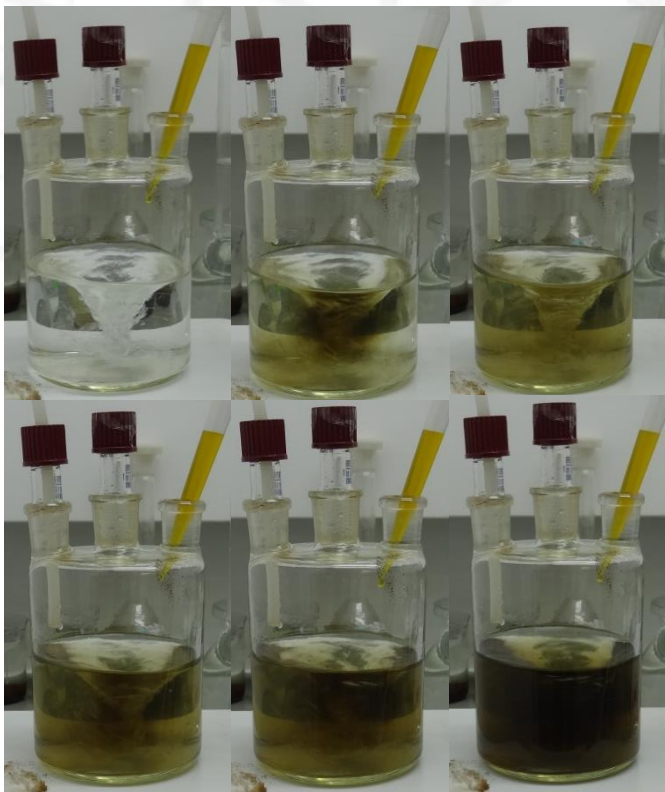
Para la solución de hierro se pesaron las sales cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y cloruro ferroso (FeCl_2) en una proporción de 4,26:1 y se disolvieron en agua desionizada.

Para la preparación del biocompósito se prepararon 300 mL de una solución con 0,035 M de NH_4OH . Con el fin de conseguir una atmósfera inerte, se realizó su desoxigenación durante 30 minutos mediante la adición en flujo continuo del gas nitrógeno.

Posteriormente se añadió, gota a gota, la solución de hierro a la mezcla, la cual se tornó de color verde oscuro y luego de unos segundos a negro. Luego, se agregaron 30 mL de la solución de goma de tara. Esta mezcla se mantuvo en agitación a 1200 rpm y con flujo continuo de gas nitrógeno durante 4,5 horas (Ponce Álvarez, 2015).

Figura 3.1

Formación del biocompósito - método 1



Elaboración propia

El producto se mantuvo en agitación constante hasta alcanzar el pH 10, el cual se reguló mediante la adición minuciosa de hidróxido de amonio (NH_4OH). La última operación fue la separación del agua transparente del biocompósito precipitado.

Figura 3.2

Biocompósito concentrado



Elaboración propia

Método 2: Hidrólisis forzada

En la hidrólisis forzada se emplea al sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) como precursor metálico para la preparación de las nanopartículas de óxido de hierro. Asimismo, se utiliza al nitrato de potasio (KNO_3) como oxidante intermedio y al hidróxido de sodio (NaOH) como agente precipitante. El método consiste en mezclar todas las sustancias en un balón de 3 bocas en atmósfera inerte para obtener magnetita mediante una oxidación controlada. Se agrega la solución de goma de tara y se deja agitar por 2 horas. Luego, se calienta a 90°C sin agitación por 24 horas para después dejarlo envejecer por 24 horas más. Después del envejecimiento se forma la espinela sólida que se deja enfriar en baño de hielo, acelerando la separación. Finalmente, el precipitado se separa con un imán por decantación (Picasso ,Vega ,Uzuriaga , 2012).

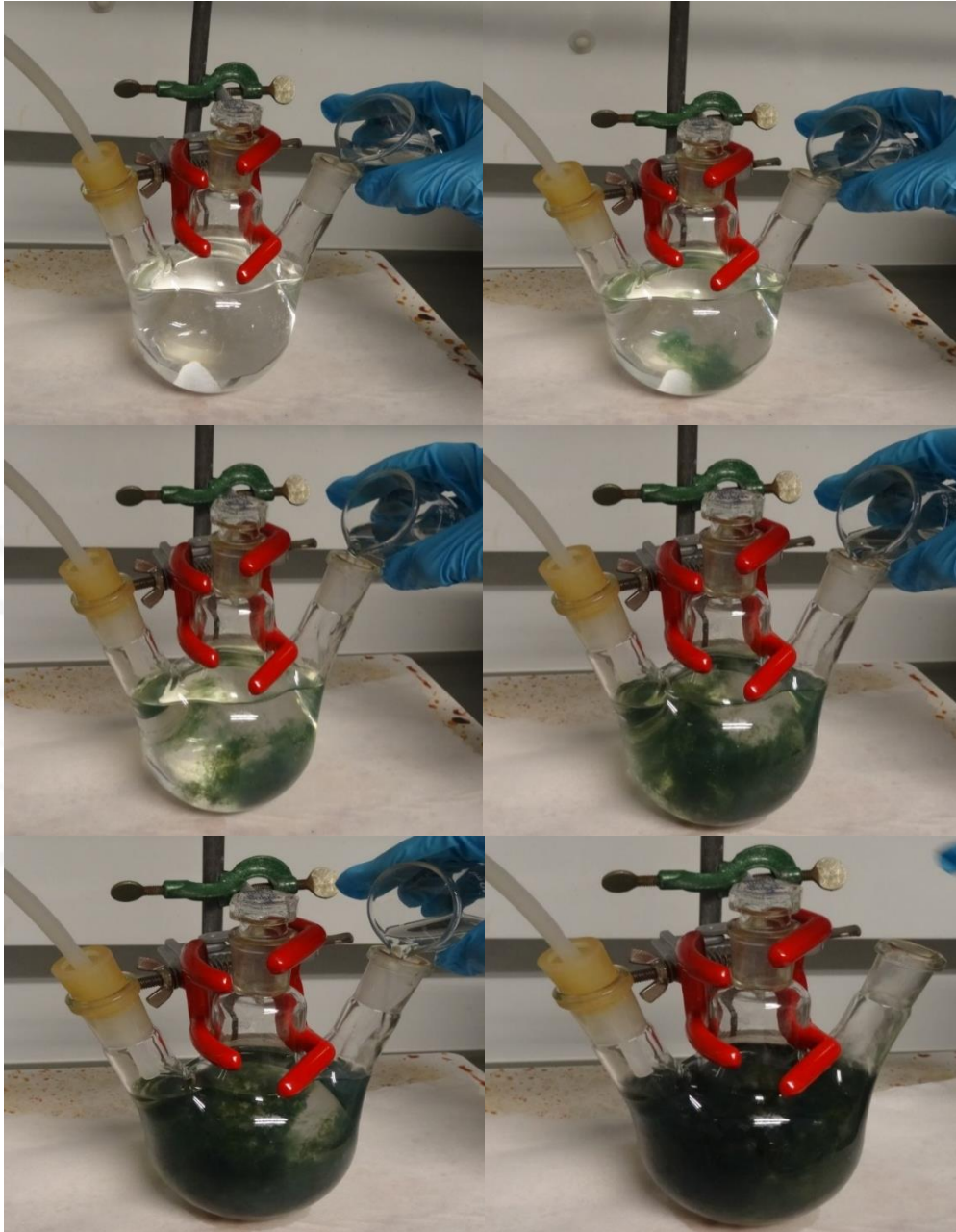
En el laboratorio, se preparó la solución de KNO_3 y NaOH en una relación de 7:2 en peso. Asimismo, se preparó la solución de sulfato ferroso heptahidratado, pesando 0,21 gramos y disolviendo en 10 mL de ácido sulfúrico 0,01M.

90 mL de la solución de KNO_3 y NaOH se vertieron en un balón de 3 bocas. Una boca funcionó como entrada para el gas nitrógeno, con el fin de conseguir una atmósfera inerte. Otra boca funcionó como salida para el oxígeno desplazado por el gas nitrógeno; mientras que en la del medio se colocó un tapón cerrado (Ponce Álvarez, 2015).

Al añadir la solución incolora de sulfato ferroso heptahidratado a la mezcla en el balón, el color cambió a verde oscuro y luego de unos segundos se tornó a negro. Esta mezcla se dejó agitando a 300 rpm, mientras se continuó suministrando gas nitrógeno durante 2 horas (Ponce Álvarez, 2015).

Figura 3.3

Formación del biocompósito – método 2



Elaboración propia

Se agregó la solución de goma de tara y se calentó hasta los 90°C, donde permaneció por 24 horas para su maduración. Una vez culminado el tiempo, se dejó enfriar hasta temperatura ambiente por 24 horas más, siendo esta su segunda maduración. Posteriormente, la muestra se colocó en un baño de hielo a 10°C con el fin de precipitar las nanopartículas (Ponce Álvarez, 2015).

Método 3: Síntesis con recubrimiento

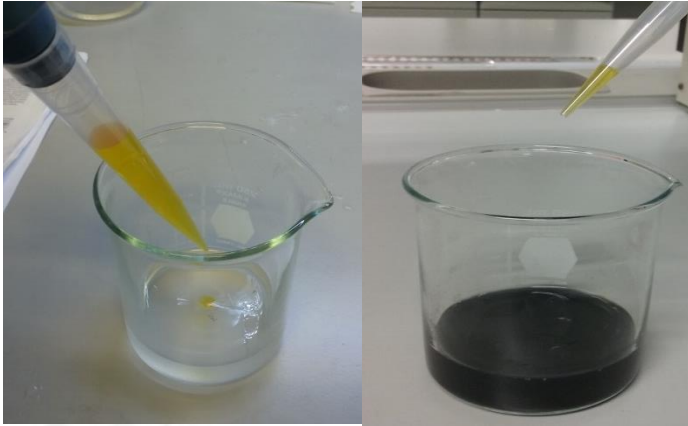
Según un estudio realizado por Long J., Yu X., Xu E. y otros (2015), para la obtención de nanocompuestos magnéticos recubiertos de carragenano y quitosano para la administración de fármacos, se obtuvo un método más fácil y ecológico sin el uso de precursores costosos o disolventes orgánicos. Lo cual es muy prometedor a comparación de los procesos que generalmente se emplean en el sector medicinal (Long et al., 2015). Para el presente estudio, se empleó este método con la diferencia que se utilizó goma de tara en lugar del carragenano y quitosano.

Para el desarrollo del método, se realizó la desoxigenación del agua desionizada durante 1 hora y se prepararon soluciones de goma de tara y de hierro. Para la elaboración de la goma de tara, se preparó una solución al 0,50% de goma de tara a 60°C la cual se deja enfriar hasta los 40°C. Para la preparación de la solución de hierro, se mezclaron las soluciones de cloruro férrico (0,2 M) y sulfato ferroso (0,02 M) en una relación estequiométrica de $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ de 2:1, con agitación constante durante 15 minutos con el fin de homogenizar la mezcla.

Posteriormente, se añadió una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1M con el fin de alcanzar pH 10. La mezcla se tornó inmediatamente negra indicando que las partículas de magnetita se formaron.

Figura 3.4

Formación del biocompósito – método 3



Elaboración propia

El proceso finalizó con la separación de la solución excedente del biocompósito formado, mediante el uso del rotavapor.

Figura 3.5

Concentración del biocompósito



Elaboración propia

3.2. Metodología de las técnicas de caracterización del biocompósito

3.2.1. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) nos permite un análisis cualitativo y cuantitativo de las fases cristalinas de los materiales sólidos. Este fenómeno es producido al interaccionar un haz de rayos X con una determinada longitud de onda en el material cristalino. El principio de esta propiedad contemplada en la dispersión coherente del haz de rayos X, se describe mediante la Ley de Bragg:

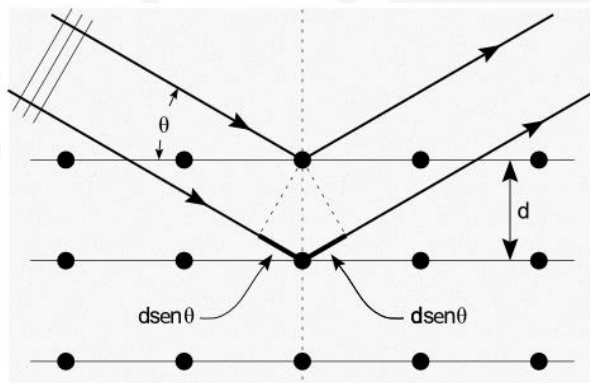
$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta$$

Donde:

- λ Longitud de onda de los rayos X
- d Distancia entre planos del cristal
- θ Ángulo de reflexión

Figura 3.6

Gráfico de la Ley de Bragg



Fuente: Gómez (2013)

Mediante este método es posible identificar las fases presentes en un sólido al comparar los máximos presentes en el difractograma con los valores de las fichas A.S.T.M. del Joint Committee on Powder Diffraction Spectroscopy (J.C.P.D.S.) (Ponce Álvarez, 2015).

Figura 3.7

Difractómetro de polvo Bruker D8



Fuente: Universidad Complutense Madrid (2018)

3.2.2. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

El método de espectroscopía infrarroja permite analizar la absorción y emisión de energía radiante de la vibración de las moléculas de un material en estudio. Las moléculas pueden rotar y vibrar a diferentes frecuencias, esto se debe a la absorción de energía de fotones en el rango energético de la espectroscopía infrarroja. En el análisis de espectroscopía infrarroja se estudia la intensidad de haz de luz al inicio y final del análisis de la muestra, de esta forma se obtiene la información sobre los grupos funcionales presentes o de las moléculas en su superficie (Piqué, Teresa M.; Vázquez, 2012).

3.2.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En la microscopía electrónica de barrido se libera un haz de electrones acelerados sobre la superficie de la muestra, los cuales producen interacciones tales como pérdida de energía al chocar con otros electrones lo que puede provocar que estos salgan despedidos o reboten, estos son los electrones secundarios. La detección de electrones secundarios permite entender la topología de la muestra y obtener imágenes de alta resolución de la superficie. La aceleración de los electrones depende de la muestra en análisis, si se tratan de muestras biológicas, la aceleración de los electrones debe ser con un voltaje pequeño

lo cual evita posibles daños a la muestra. De ser una muestra metálica es recomendable acelerar los electrones con una potencia elevada, ya que no ejerce daño a la muestra y se obtienen mejores resultados (Ponce Álvarez, 2015).

3.2.4. Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

La microscopía electrónica de transmisión es un método que también usa un haz de luz de electrones acelerados que interactúan con la materia en análisis. Este análisis permite revelar la configuración de la estructura, generando imágenes que permiten analizar la muestra a profundidad, permitiendo el estudio de materiales a nivel nanométrico gracias a su resolución (Ponce Álvarez, 1999).

3.2.5. Determinación de la superficie específica mediante la isoterma de Brunauer-Emmet-Teller (S_{B.E.T.})

Este método nos permite determinar el área superficial de un material mediante el uso de un gas, el cual será adsorbido sobre la superficie del material (monocapa) y sus poros. Para este método es necesario emplear un gas inerte, como el nitrógeno, el cual es el más utilizado. Para el análisis de la muestra, esta debe estar completamente seca para luego desgasificarla al vacío y colocarla posteriormente en el equipo Micrometrics ASAP-2010. La desorción del gas en la muestra permite determinar el área superficial de la muestra (Ponce Álvarez, 1999).

3.2.6. Medida de viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los fluidos, conocerla nos permite analizar el comportamiento del fluido y su estructura. Mientras mayor sea la viscosidad, mayor resistencia presenta en el desplazamiento. La temperatura es un factor que afecta directamente a la viscosidad de un fluido, donde un incremento de esta produce una reducción en la viscosidad (Crittenden et al., 2016). Para la medición de esta propiedad se empleó un viscosímetro (marca Brookfield LVT) utilizando el Spin N°64 a 60 rpm durante 1 minuto.

3.2.7. Titulación potenciométrica

La titulación potenciométrica es un método que permite determinar la concentración de una sustancia en una solución, en el cual se mide el potencial (voltaje) de la solución mediante el uso de un electrodo, este debe ser selectivo a la especie de la cual se requiere determinar la concentración. El voltaje medido es representativo a la concentración, ya que el voltaje puede transformarse en medida de concentración. Este método es ventajoso para obtener datos que un indicador visual no pueda, además es considerado uno de los métodos más exactos ya que el potencial medido determina el cambio real y el punto de equivalencia. Para realizar este método se empleó el titulador potenciométrico o potenciómetro, el cual es un equipo electrónico que contiene un electrodo de ORD de vidrio con lectura de 0.1, este electrodo debe ser calibrado con un electrodo de referencia, el equipo usado para las pruebas y experimentos del presente trabajo fue brindado por la Universidad de Lima (Oyola Martínez, 2014).

3.2.8. Medida del potencial de hidrógeno (pH)

Conocer el potencial de hidrógeno de una sustancia nos permite determinar si la solución es ácida o alcalina. Para determinar el pH de una solución se emplea el potenciómetro o pH-metro, instrumento que puede determinar el diferencial entre dos electrodos, uno de referencia y el otro que es sensible a los iones de hidrógeno. También se utiliza el papel indicador o papel tornasol, el cual se pone en contacto con la solución y se determina el pH según la coincidencia de tonos del papel impregnado. El rango de pH de una solución comprende los valores desde 0 hasta 14, se considera ácida si el valor del pH se encuentra entre el rango de 0 a 7, es alcalina si se encuentra entre el rango 7 a 14 y neutra si el valor del pH es igual a 7.

3.2.9. Magnetización

El análisis de magnetización permite conocer el comportamiento magnético del producto. Para ello se analiza la saturación magnética de la muestra, la cual es un efecto de los materiales magnéticos cuyo estudio consiste en exponer el producto a un campo magnético H_0 en el cual su incremento no genera ninguna variación en la magnetización del producto. La curva de magnetización o curva de histéresis nos permite determinar el valor de saturación magnética de la muestra, los materiales ferromagnéticos presentan

una superficie con secciones microscópicas los cuales actúan como imanes. En ausencia de un campo magnético externo, las secciones emiten campos magnéticos en direcciones aleatorias.

Por otro lado, la presencia de un campo magnético genera que estas secciones se alineen, lo cual se dará con mayor intensidad al aumentar el campo magnético externo. El punto de saturación se alcanza cuando una variación en aumento del campo magnético externo no modifica la fuerza de alineamiento de las secciones de la muestra. Obtener el valor de saturación magnética del producto nos permite conocer el tipo de propiedad magnética del producto (University of Nebraska Lincoln, s.f.).

3.3. Prueba de adsorción

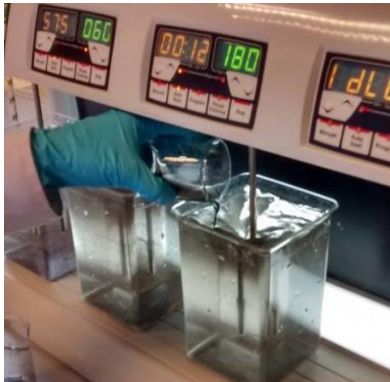
El proceso de adsorción consiste en la eliminación de ciertos componentes de una mezcla gaseosa o líquida. Se da cuando determinadas moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son atrapadas en una superficie (Hamburg, s.f.). La prueba de adsorción permite encontrar la dosificación óptima de material para remover la mayor cantidad de arsénico de la solución, bajo distintos tiempos de contacto.

Para el presente trabajo, el adsorbato empleado fue el arseniato de sodio dibásico heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en solución y el adsorbente fue el material que se preparó en el laboratorio. El proceso se llevó a cabo en el equipo de test de jarras y las mediciones del arsénico removido se ejecutaron en el equipo cromatógrafo PS Analytical Millennium Excalibur.

El proceso empezó con la preparación de la solución de arseniato de sodio (2 ppm), del cual se vierte 1 litro en cada jarra del equipo. Del mismo modo, se pesaron 20 g del biocompósito en solución, el cual se agregó durante la agitación rápida; para luego continuar con la agitación lenta durante 5, 10, 20 y 30 minutos. Posteriormente, se separó una muestra de cada jarra, se diluyó en una proporción de 1:5 y se filtró, de modo que partículas mayores a $0,22 \mu\text{m}$ fueron separadas. Luego del respectivo acondicionamiento de estas muestras para su uso en el equipo cromatógrafo, se colocaron en tubos de 50 mL de capacidad. Estos se colocaron en las rejillas del equipo, el cual, una vez programado, realizó la medición automática de la concentración de arsénico de las muestras.

Figura 3.8

Adición del adsorbente al agua contaminada



Elaboración propia

Figura 3.9

Proceso de adsorción



Elaboración propia

3.4. Método de biodegradabilidad

La biodegradabilidad es un parámetro determinante en el comportamiento ambiental de las sustancias químicas y una propiedad deseable de los productos que se liberan al medio natural. Mediante el proceso conocido como biodegradación, los microorganismos transforman los compuestos orgánicos, la mayoría de las veces en productos menos tóxicos que los compuestos originales (Vásquez y Beltrán, 2004).

Con el fin de simular este proceso de biodegradación in situ, se puede emplear la prueba de susceptibilidad enzimática, debido a que los polisacáridos como la goma de tara son muy susceptibles a la degradación enzimática y microbiana.

Los reactivos que se emplearon fueron mananasa de *Aspergillus niger*, la β -manosidasa de *Cellulomonas fimi*, la glucosa oxidasa de *Aspergillus niger*, la peroxidasa y la o-dianisidina. Muestras del biopolímero con nanopartículas fueron sometidas a la acción de la enzima manosidasa como modelo de la degradación bacteriana natural que experimentará el polímero en el medio ambiente. El biocompuesto fue usado como sustrato y la reacción se llevó a cabo en 755 μ L de buffer de acetato 50 mM a pH 5,1; el cual contenía 128 unidades de glucosa oxidasa, 18 unidades de peroxidasa y 1,29 m de o-dianisidina. El proceso fue monitoreado a 500 nm durante 180 minutos, empleando un espectrofotómetro con un soporte de cubeta encamisado.

A continuación, se presenta información complementaria sobre los reactivos y equipos que fueron empleados en los diferentes métodos de preparación del biocompósito, así como en las pruebas de adsorción y de biodegradabilidad.

Tabla 3.1

Información sobre las marcas de los reactivos

Reactivo/Insumo	Fórmula	Marca	Grado de pureza
Goma de tara	-	MASAC	N.A
Cloruro férrico hexahidratado	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Fermont	p.a
Cloruro ferroso	FeCl_2	Sigma Aldrich	p.a
Gas nitrógeno	N_2 (g)	Linde	U.H.P
Hidróxido de amonio	NH_4OH	J.T. Baker	p.a
Nitrato de potasio	KNO_3	Merck	p.a
Hidróxido de sodio	NaOH	Merck	p.a
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	Scharlau	N.A
Arseniato de sodio	$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Merck	p.a
Mananasa de <i>Aspergillus niger</i>	-	Megazyme Labs	N.A
β -manosidasa de <i>Cellulomonas fimi</i>	-	Megazyme Labs	N.A
Glucosa oxidasa de <i>Aspergillus niger</i>	-	Megazyme Labs	N.A
Peroxidasa	-	Sigma Aldrich	N.A
O-dianisidina	-	Sigma Aldrich	N.A

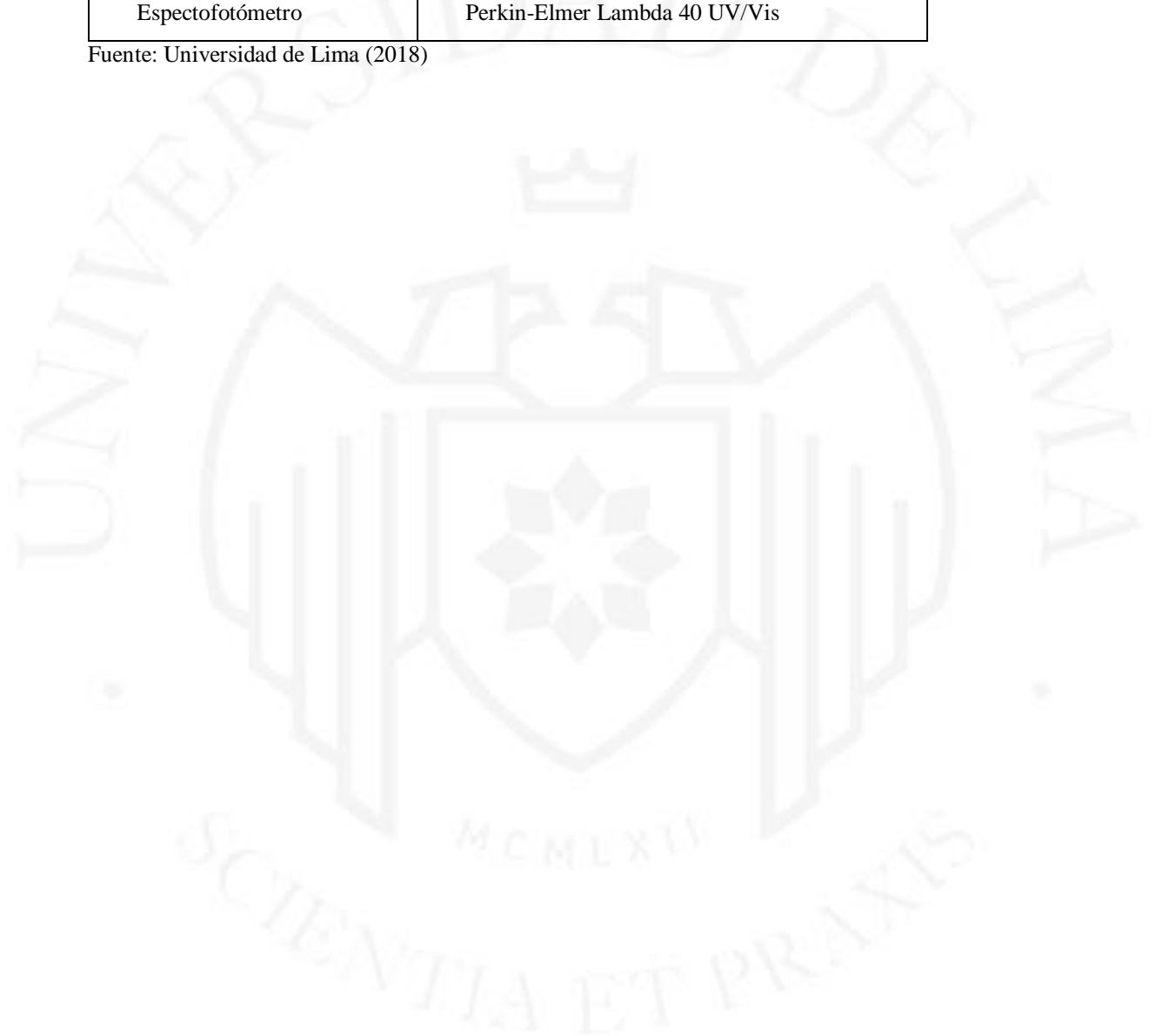
Fuente: Universidad de Lima (2018)

Tabla 3.2

Información sobre las marcas de los equipos

Equipo	Marca / modelo
Rotavapor	Büchi / R - 300
Test de jarras	Microfloc / Platypus Jar Test
Equipo cromatógrafo	PS Analytical / Millennium Excalibur
Titulador potenciométrico	Mettler Toledo / Easy Plus Titration
Espectrofotómetro	Perkin-Elmer Lambda 40 UV/Vis

Fuente: Universidad de Lima (2018)



CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Métodos de preparación

Como se detalla en el capítulo 3, se evaluaron 3 métodos de preparación del biocompósito. Cada uno con características diferentes, las cuales se comparan a continuación:

Tabla 4.1

Características según cada método de preparación

	Método 1	Método 2	Método 3
Insumos utilizados	FeCl ₃ ·6H ₂ O FeCl ₂ NH ₄ OH Goma de tara N ₂ (g) H ₂ O	FeSO ₄ ·7H ₂ O KNO ₃ H ₂ SO ₄ NaOH Goma de tara N ₂ (g) H ₂ O	FeCl ₃ ·6H ₂ O FeSO ₄ ·7H ₂ O NaOH Goma de tara N ₂ (g) H ₂ O
Duración de la síntesis (horas)	5 h	51 h	4 h
Procesos adicionales	-	Calentamiento hasta los 90°C y enfriamiento en baño de hielo hasta los 10°C	Calentamiento hasta los 60°C y enfriamiento hasta los 40°C
Rendimiento (%)	88,02%	61,01%	28,06%

Elaboración propia

Los métodos presentan reactivos similares, por lo que este no es un factor determinante para diferenciarlos. Sin embargo, el tiempo de la síntesis sí es una característica resaltante para su distinción, puesto que la duración de la producción del biocompósito es mucho mayor en el segundo método, lo cual genera una desventaja en el proceso.

Además, el segundo y tercer método presentan procesos adicionales como el calentamiento y posterior enfriamiento del producto, lo cual conlleva al uso de mayor cantidad de equipos, insumos, energía y espacio para el proceso de preparación.

Por último, para el cálculo del rendimiento se comparó la cantidad de moles del producto obtenido en cada método versus la cantidad teórica de moles de biocompósito que se debió conseguir. Se observa que el primer método cuenta con mayor porcentaje de rendimiento, lo cual es un atributo importante ya que demuestra que los reactivos e insumos empleados se aprovecharían mejor que en los otros métodos.

Finalmente, debido a los motivos presentados se determinó que el primer método, el de coprecipitación, es el indicado para la preparación del biocompósito. Cabe resaltar que se elaboraron 4 presentaciones del adsorbente avanzado dependiendo de la concentración de magnetita y goma de tara de cada uno. Estos son detallados a continuación:

- Biocompósito (80% Fe_3O_4 , 20% GT)
- Biocompósito (50% Fe_3O_4 , 50% GT)
- Biocompósito (20% Fe_3O_4 , 80% GT)
- Biocompósito (04% Fe_3O_4 , 96% GT)

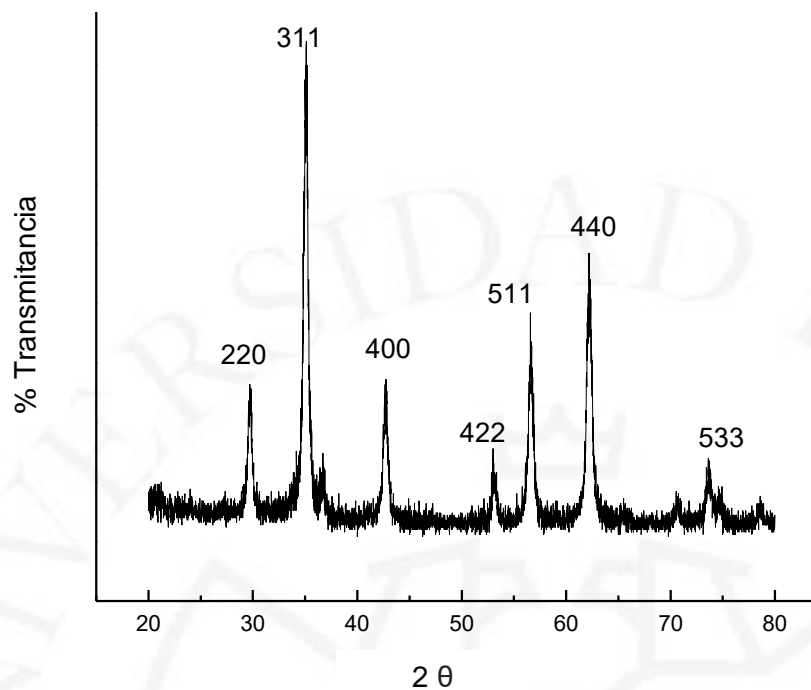
4.2. Resultados de la caracterización de los materiales

4.2.1. Difracción de rayos X (DRX)

Los resultados de la medición de la difracción de rayos X realizada a la magnetita en el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, se muestran en el siguiente difractograma.

Figura 4.1

Difractograma de la magnetita

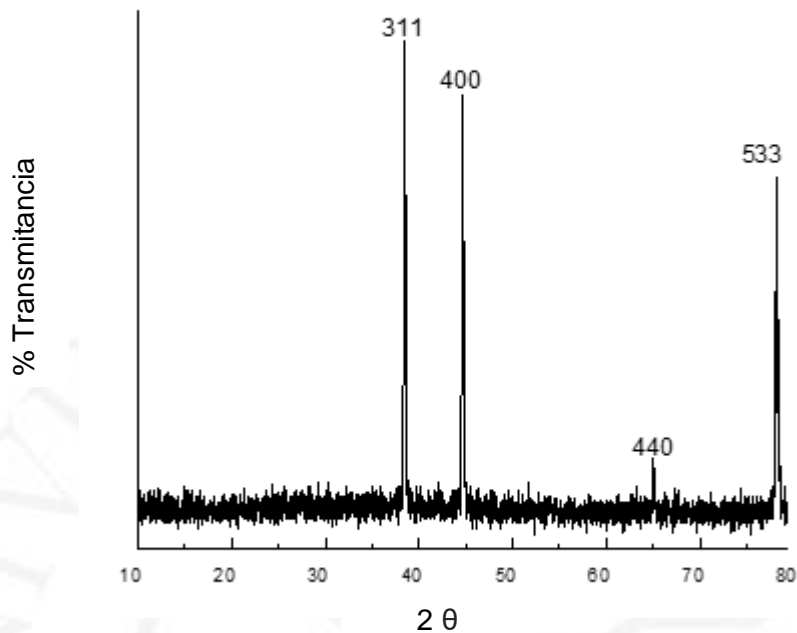


Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Del mismo modo, se realizó la verificación de la fase magnetita en el biocompósito (80% Fe_3O_4 - 20% GT). Se escogió este material para la prueba debido a que presenta mayor remoción de arsénico.

Figura 4.2

Difractograma del biocompósito (80% Fe₃O₄- 20% GT)



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

El primer difractograma muestra picos definidos a 38°, 44°, 65° y 78° asociados a los planos cristalinos 311, 400, 440 y 533 de la magnetita. Mediante este patrón se ha estimado que el tamaño de partícula de la magnetita es 13,74 nm aproximadamente, utilizando el método de Debye-Scherrer. Cada plano cristalino está identificado por una terna de números (hkl) conocidos como los Índices de Miller, los cuales son inversamente proporcionales a la distancia de intersección del plano con cada eje fundamental xyz. Así, mientras más alto sea el índice de Miller, más cerca se encuentra la intersección del plano al centro de corte de los ejes (Prieto Colorado, 2013).

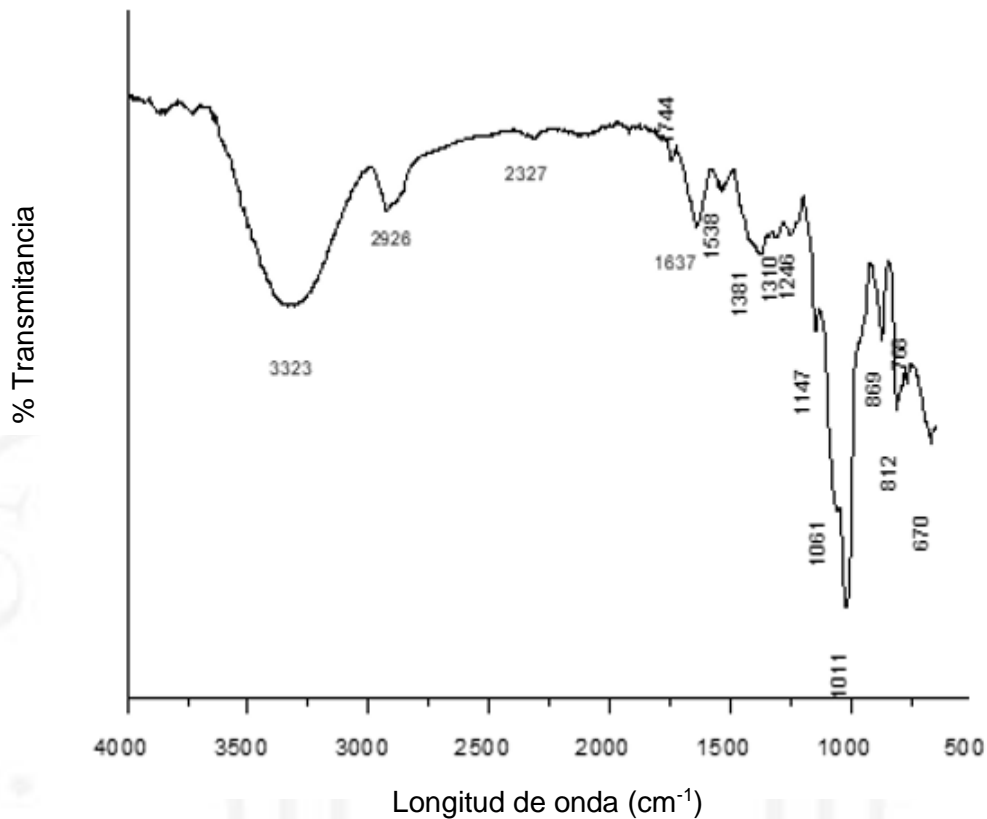
En el difractograma del biocompósito (20% de goma de tara y 80% de magnetita) se pueden apreciar picos definidos correspondientes a la magnetita. Comparando ambos gráficos, se observa un desplazamiento de los picos hacia ángulos mayores; lo cual se debe a que la estructura de la magnetita se ha acomodado dentro de la goma de tara ocasionando distorsiones sobre su estructura. Sin embargo, a pesar de que los picos obtenidos se encuentran bien definidos, no se presentan todos puesto que solo aparecen los de mayor intensidad y característicos de esta estructura.

4.2.2. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

Los resultados de la espectroscopía infrarroja para la goma de tara que se realizaron en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería fueron los siguientes:

Figura 4.3

Espectroscopía infrarroja (FT-IR) de la goma de tara



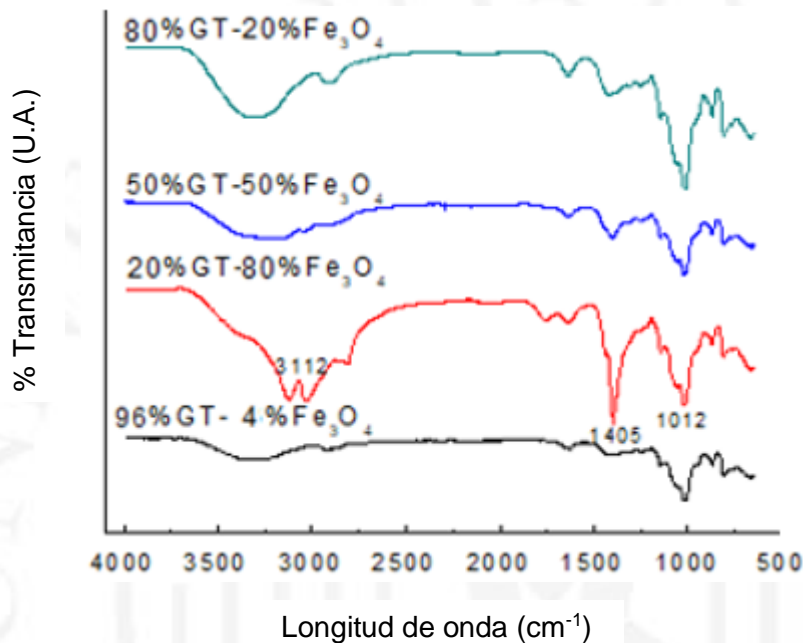
Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Se puede observar que existen bandas y picos definidos a lo largo del espectro correspondiente a la goma de tara. La banda centrada en 3323 cm⁻¹ representa las vibraciones de los grupos hidroxilo, los cuales permitirán que las nanopartículas de magnetita se adhieran a la goma de tara. Usualmente este grupo se encuentra alrededor de los 3600-3700 cm⁻¹; sin embargo, está desplazado hacia la derecha debido al grado de polimerización de los taninos.

La banda en 1381 cm^{-1} corresponde con la vibración simétrica de estrechamiento C-O del grupo éster. Así mismo, la banda centrada en 1061 cm^{-1} corresponde a la vibración f, mientras que el pico en 1011 cm^{-1} representa la vibración simétrica.

Del mismo modo, se obtuvieron espectros para las 4 variedades del biocompósito. Figura 4.4

Espectroscopía infrarroja (FT-IR) de los biocompuestos



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Como se mencionó, las bandas entre los 3000 y 3700 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de los grupos hidroxilos presentes en la estructura. En los espectros mostrados, se observan bandas en esas longitudes de onda, tal como el pico al 3112 cm^{-1} presente en el biocompósito $80\%\text{Fe}_3\text{O}_4 - 20\%\text{GT}$. El pico a 1405 cm^{-1} también está asignado a la presencia de grupos OH que se encuentran en la goma de tara y permiten la unión con las nanopartículas de magnetita. Continuando con el espectro, se observa el pico 1012 cm^{-1} , el cual representa a las vibraciones por estrechamiento de C-O y C-O-C. Del mismo modo, existe otro pico a 559 cm^{-1} que demuestra la vibración asignada al Fe-O; no obstante, no se aprecia debido al rango de barrido considerado para el gráfico.

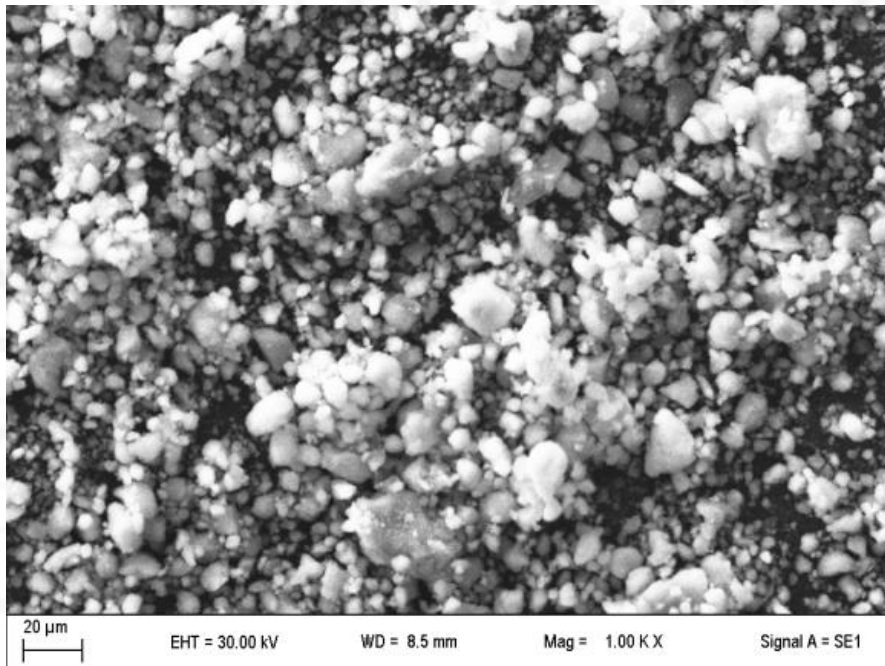
Todos los picos mostrados demuestran la presencia de la goma de tara y su enlazamiento con la magnetita, formando así el biocompósito deseado.

4.2.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Este análisis se llevó a cabo en el laboratorio del Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Extremadura, con el fin de evaluar la distribución de las nanopartículas de magnetita en la goma de tara.

Figura 4.5

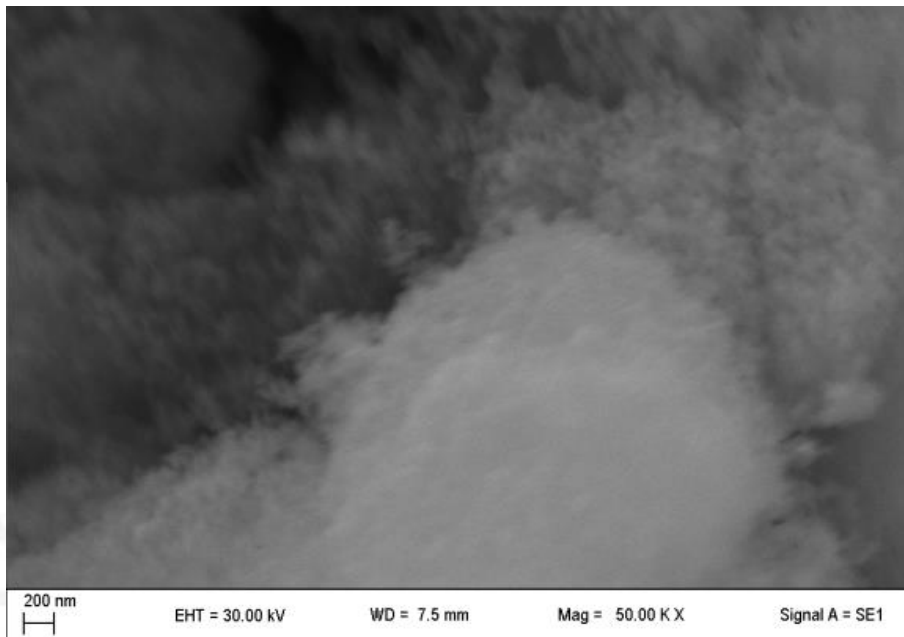
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de la magnetita, a 1.00KX



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Figura 4.6

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de la magnetita, a 50 KX

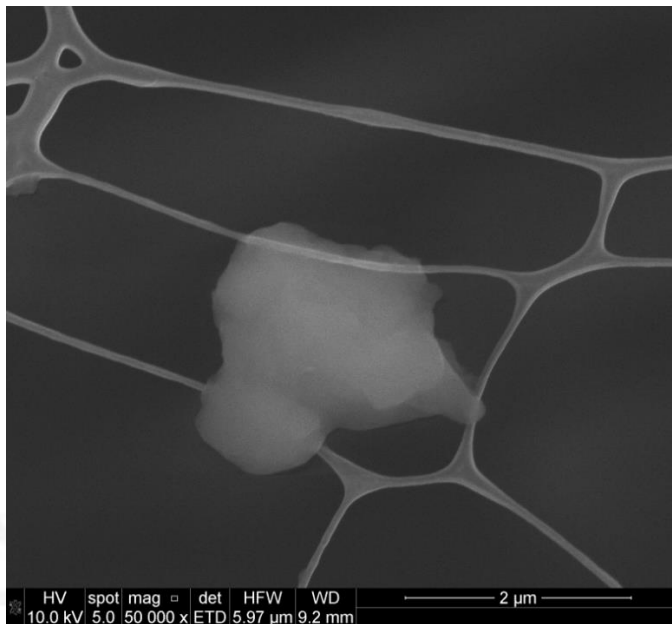


Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

En la primera micrografía, se observa la distribución homogénea de las partículas de magnetita, las cuales aparentan contar con mayor tamaño; sin embargo, en la segunda foto se observa que estas partículas grandes corresponden a la aglomeración de partículas mucho más pequeñas. Esto indica que el tamaño de cada nanopartícula de magnetita se encuentra por debajo de los 50 nm.

Figura 4.7

Micrografía SEM de la goma de tara

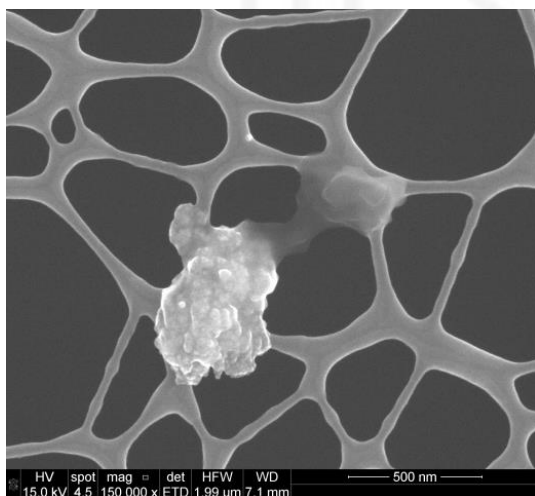


Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

La micrografía de la goma de tara muestra un sólido homogéneo, el cual está soportado sobre la rejilla que se utilizó para el secado de la muestra.

Figura 4.8

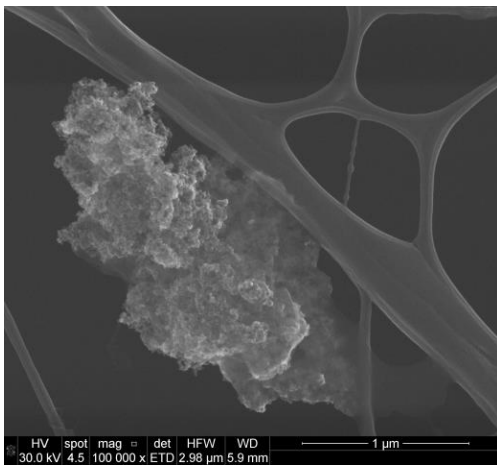
Micrografía SEM del biocompósito de 80% goma de tara y 20% magnetita



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Figura 4.9

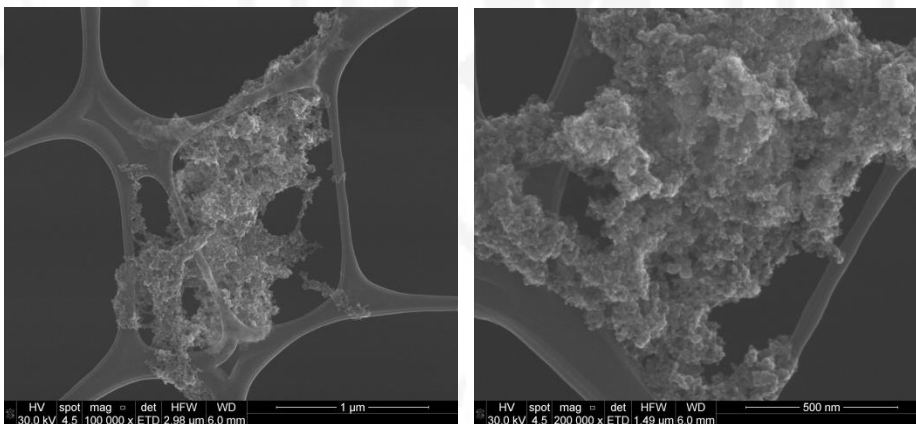
Micrografía SEM del biocompósito de 50% goma de tara y 50% magnetita



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Figura 4.10

Micrografías SEM del biocompósito de 20% goma de tara y 80% magnetita



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

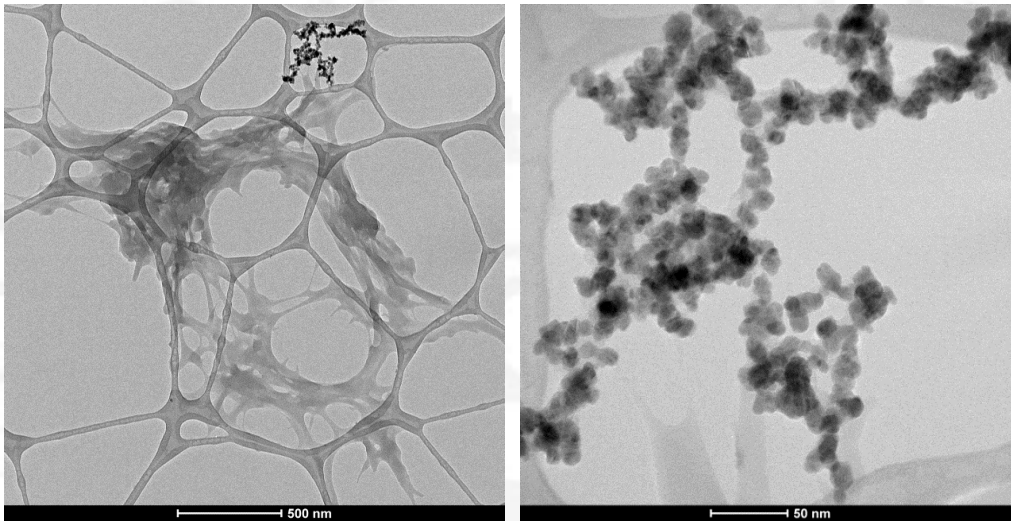
Tal como se muestra en las micrografías, las aglomeraciones de magnetita tienden a posicionarse dentro de los poros de la goma de tara; formando el biocompósito. Una mayor acumulación de partículas de magnetita se observa mejor en el biocompósito con 80% Fe_3O_4 y 20% GT. Se observa al biocompósito en la superficie de la rejilla, el cual se encuentra como sólido. Las micrografías de todos los adsorbentes preparados muestran características similares.

4.2.4. Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

Se realizó esta prueba a las muestras de los biocompósitos en el laboratorio del Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Extremadura, para poder obtener imágenes con mayor resolución de estos y determinar el tamaño y la distribución de las nanopartículas de magnetita en la goma de tara.

Figura 4.11

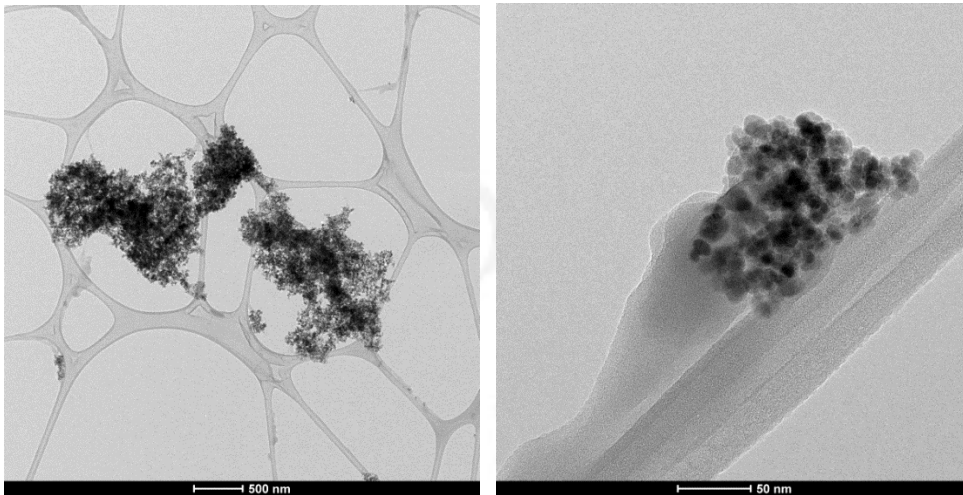
Micrografías TEM del biocompósito de 80% goma de tara y 20% magnetita



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Figura 4.12

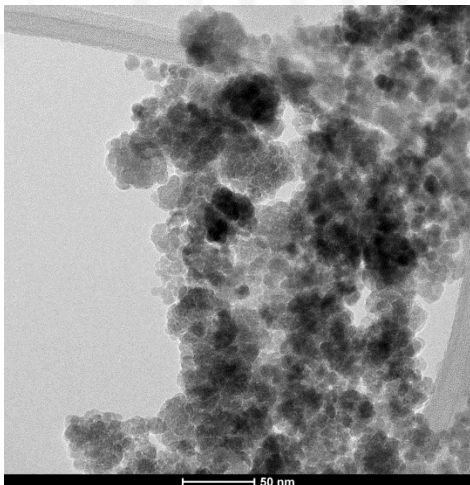
Micrografías TEM del biocompósito de 50% goma de tara y 50% magnetita



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Figura 4.13

Micrografía TEM del biocompósito de 20% goma de tara y 80% magnetita



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

El tamaño de las nanopartículas de magnetita obtenido mediante las micrografías TEM es 13,16 nm de diámetro aproximadamente, lo cual corrobora el resultado mediante DRX. Así mismo, se observa la incorporación de la magnetita en la estructura de la goma

de tara, lo cual indica que el método de preparación es el adecuado y se controlaron bien los parámetros.

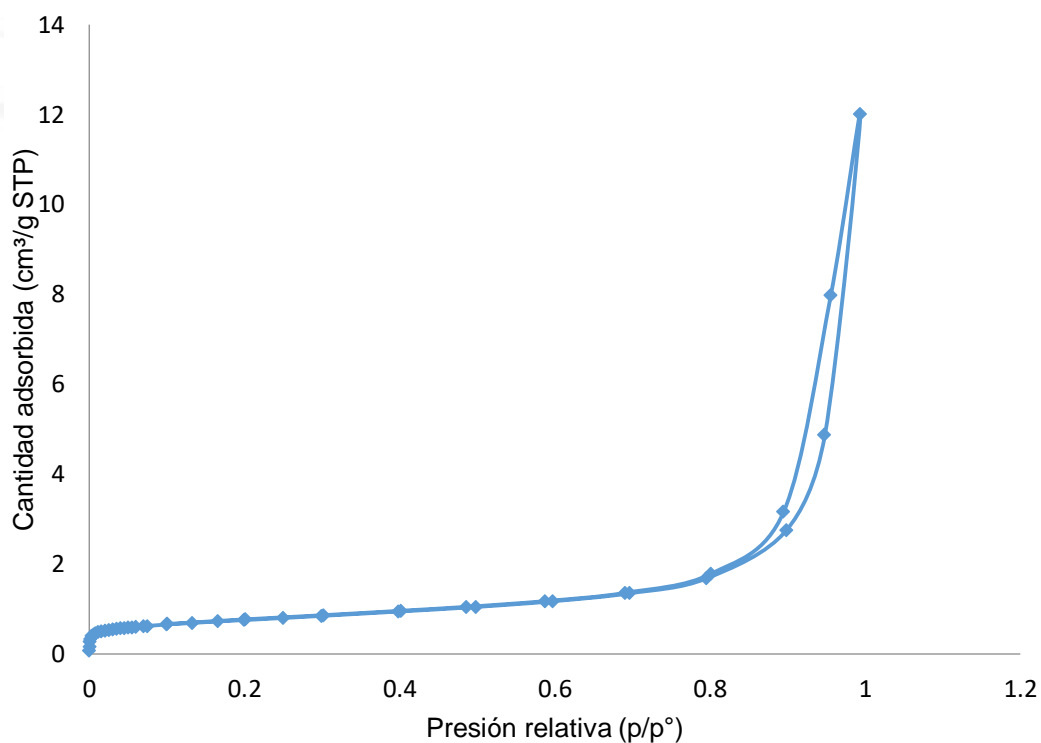
Las partículas de magnetitas presentan una forma esférica bien definida y su aglomeración aumenta directamente proporcional a su concentración en el biocompósito.

4.2.5. Determinación de la superficie específica mediante la isoterma de Brunauer-Emmet-Teller ($S_{B.E.T.}$)

La medida de la Superficie Específica mediante el método BET se basa en conocer la cantidad del gas adsorbido necesario para formar una monocapa y el área que ocupa una de estas moléculas adsorbidas, con lo cual se puede estimar el área de la superficie del sólido. Para la realización del método se empleó gas nitrógeno a -196°C , puesto que cubre todo el rango de porosidad e interactúa débilmente con la mayoría de los sólidos. El experimento fue realizado en el laboratorio de la Universidad Autónoma de Madrid.

Figura 4.14

Isoterma de adsorción - Magnetita



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

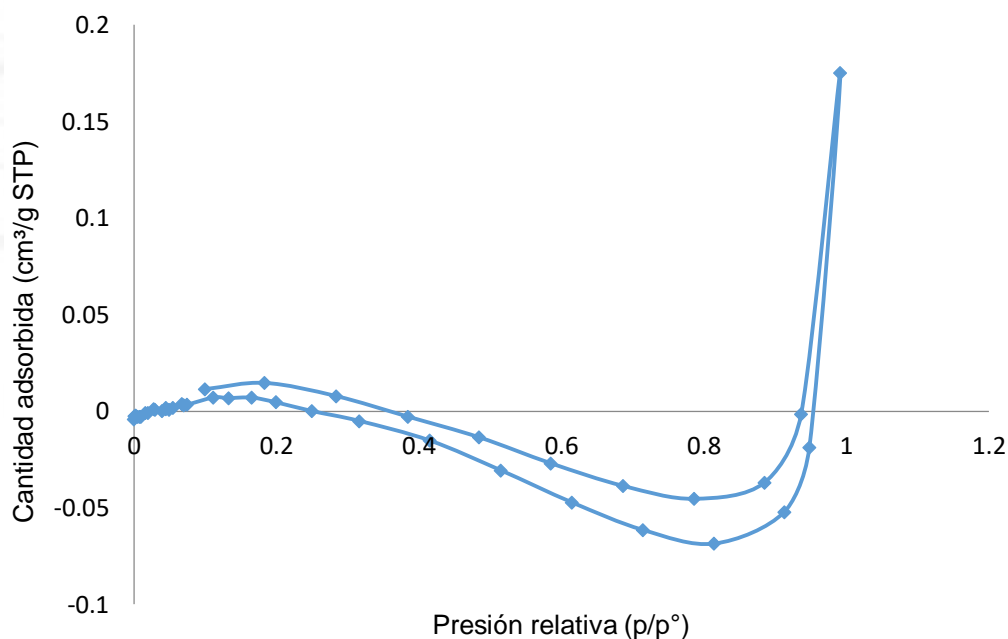
La forma de esta curva corresponde a una isoterma tipo III, la cual ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbente es baja; el adsorbato tiene afinidad por el adsorbente y por sí mismo, por lo que una vez que se ha adsorbido una molécula, esta actúa como sitio libre para que se adsorba otra, lo cual puede generar un recubrimiento desigual.

El ciclo de histéresis que se observa corresponde al tipo I, puesto que la curva es similar a la isoterma. Este tipo de ciclo de histéresis sugiere una distribución de poros estrechos y uniformes. Cabe resaltar que el ciclo de histéresis regresa al punto de inicio de la curva de isoterma, hecho que demuestra que el material en análisis no presenta ninguna o poca variación estructural.

El dato que se obtiene para el área de superficie BET es de 2,64 m²/g de material.

Figura 4.15

Isoterma de adsorción - B20%Fe₃O₄ 80%GT

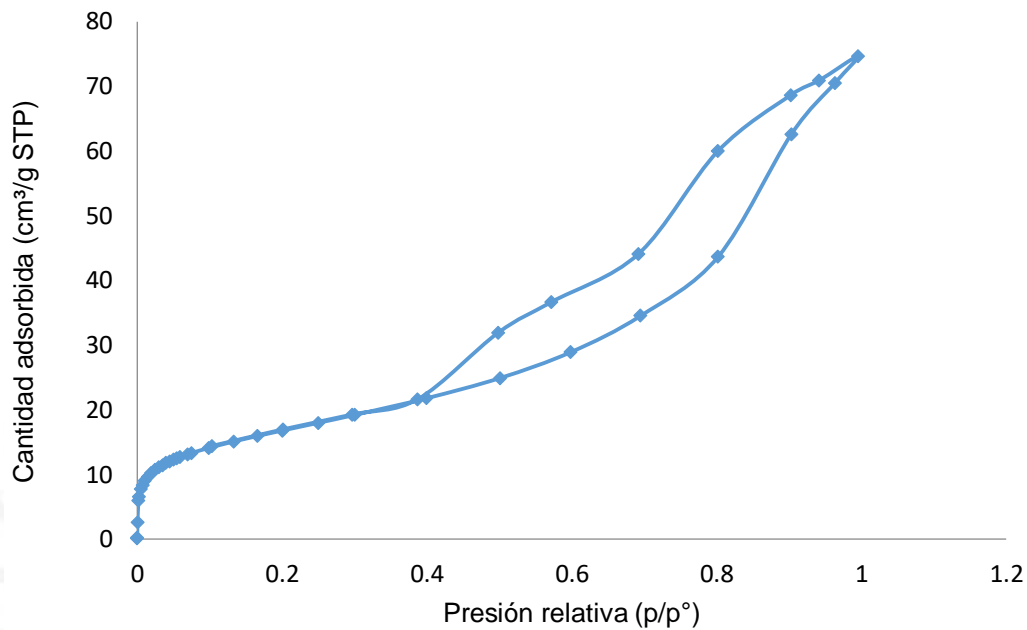


Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

El gráfico presenta tanto valores positivos como negativos. Por este motivo la gráfica obtenida y los valores del reporte no son representativos para la muestra. Por lo tanto, se puede concluir que este material tiene poca superficie de adsorción.

Figura 4.16

Isoterma de adsorción - B80%Fe₃O₄ 20%GT



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Esta muestra presenta todos los datos positivos, por lo tanto, se puede representar una correcta isoterma de adsorción, la cual corresponde al tipo II. Este tipo de gráfica se da principalmente cuando la afinidad del adsorbato por el adsorbente es mayor a la del adsorbato por sí mismo. El agrupamiento de puntos en los primeros valores de presión relativa representa el llenado de la monocapa, luego se van formando las multicapas.

El ciclo de histéresis que se muestra en el gráfico es el tipo III, característico de materiales con partículas laminares. Se puede observar que regresa al inicio del gráfico de la isoterma, esto demuestra que la muestra del biocompósito no pasa por variaciones considerables de su estructura.

El dato que se obtiene para el área de superficie BET es de 60,66 m²/g de B80%Fe₃O₄ 20%GT, valor que representa una buena área superficial en comparación con los otros materiales en prueba.

4.2.6. Medida de viscosidad

Se obtuvieron los siguientes resultados de cada material preparado, empleando el Viscosímetro de la Universidad de Lima:

Tabla 4.2

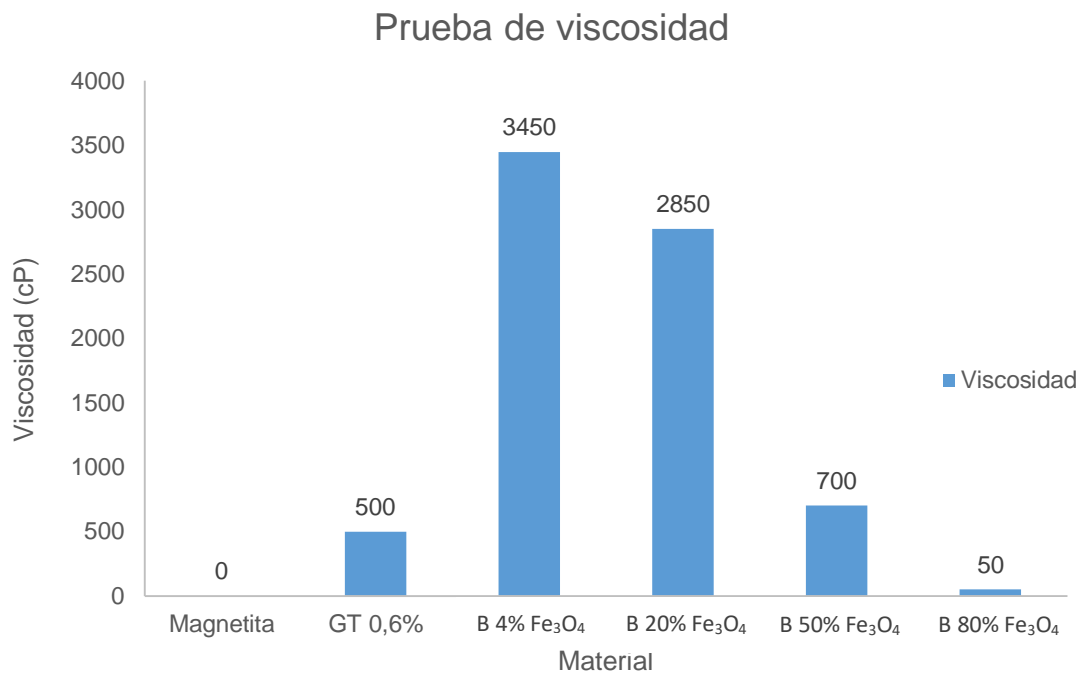
Valor de la viscosidad de cada material

Material	Spin N°	Velocidad (rpm)	Factor	Medida (LV)	Viscosidad (cP)
Magnetita	64	60	100	0	0
GT 0,62%	64	60	100	5	50
96% GT - 4% Fe ₃ O ₄	64	60	100	35	3450
80%GT - 20% Fe ₃ O ₄	64	60	100	29	2850
50%GT - 50% Fe ₃ O ₄	64	60	100	7	700
20% GT - 80% Fe ₃ O ₄	64	60	100	1	50

Elaboración propia

Figura 4.17

Resultados de la prueba de viscosidad a 18°C.



Elaboración propia

De acuerdo a los valores mostrados, se puede observar que la magnetita no presenta viscosidad; lo cual se debe a que la solución es completamente líquida. Sin embargo, la viscosidad de los otros materiales preparados presenta una relación directamente proporcional a la concentración de goma de tara incluida en las soluciones. De este modo, el biocompósito 96% GT - 4% Fe₃O₄ muestra una viscosidad muy elevada de 3450 cP; mientras que el biocompósito 20% GT - 80% Fe₃O₄ tiene una viscosidad

mucho menor, 50 cP. La viscosidad de la solución de únicamente goma de tara alcanzó los 500 cP, este valor se debe a que la solución fue preparada al 0,62% de goma en peso.

Debido a la relación directa entre la concentración de la goma de tara y los valores de la viscosidad, se puede realizar un escalamiento de la preparación de los biocompósitos de manera más precisa y sencilla; es decir, obtener el mismo material en mayores cantidades.

4.2.7. Titulación potenciométrica

Con el fin de determinar la densidad de los sitios en los biocompósitos preparados se empleó el Titulador potenciométrico EasyOx –Mettler Toledo de la Universidad de Lima.

Los resultados obtenidos mostraron un valor de $3,30 \times 10^{-5}$ mol/g para la muestra del biocompósito con 50% de goma de tara y 50% de magnetita; $4,90 \times 10^{-5}$ mol/g para la muestra con un 20% de magnetita y 80% de goma de tara y un $2,78 \times 10^{-5}$ mol/g para la muestra con 80% de magnetita y 20% de goma de tara. Estos resultados mostraron una mayor cantidad de sitios en el biocompósito con mayor cantidad de goma de tara.

La carga asociada a las nanopartículas de magnetita no se logró determinar debido a la inestabilidad en el cambio del estado de oxidación a pesar que la prueba se realizó en atmósfera de nitrógeno para evitar estas fluctuaciones.

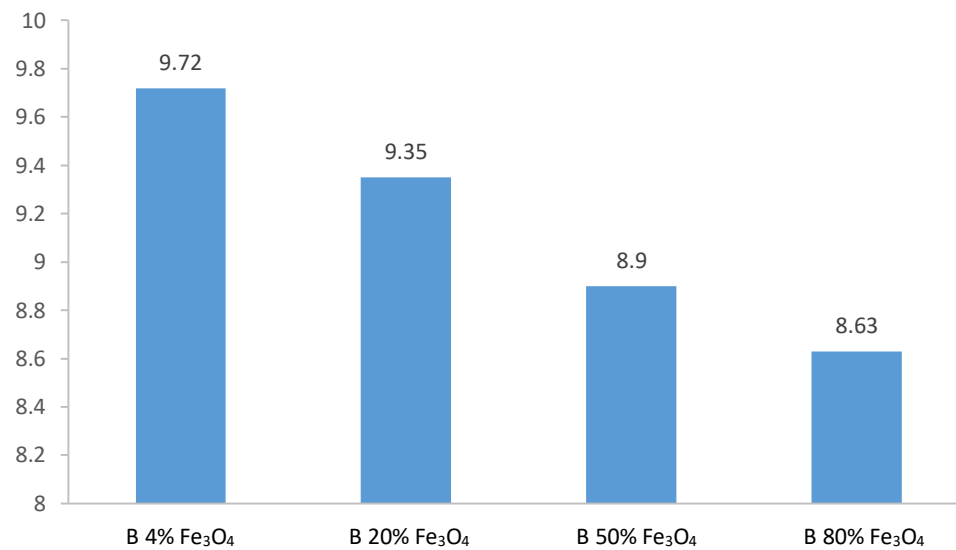
4.2.8. Medida del potencial de hidrógeno (pH)

Para la obtención de los siguientes resultados se empleó el pH metro del Laboratorio de Docimasia de la Universidad de Lima. Se determinó la medida del pH para la solución de goma de tara y se obtuvo un valor de 6,5 a una temperatura promedio de 22°C.

Así mismo, se realizó la medición para cada biocompósito preparado y se obtuvieron los siguientes valores:

Figura 4.18

Valores de pH de cada material



Elaboración propia

Donde cada material cuenta con la siguiente relación masa de biocompósito/masa de agua:

- B 4% Fe₃O₄ : 0,003 g biocompósito/mL agua
- B 20% Fe₃O₄ : 0,006 g biocompósito/mL agua
- B 50% Fe₃O₄ : 0,010 g biocompósito/mL agua
- B 80% Fe₃O₄ : 0,012 g biocompósito/mL agua

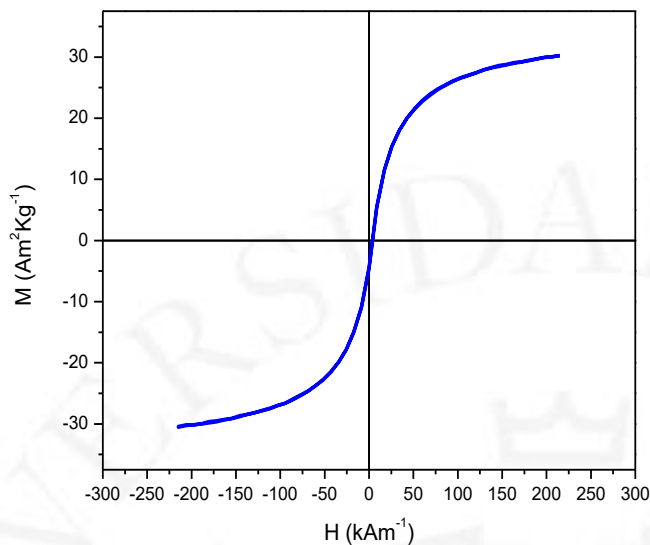
Se observa que el pH disminuye conforme aumenta la concentración de nanopartículas de magnetita en el biocompósito.

4.2.9. Magnetización

A continuación, se presente la curva de magnetización (M-H) del biocompósito B80%Fe₃O₄. Donde M corresponde a la capacidad de magnetización y H al valor de histéresis. Estos resultados se obtuvieron empleando el equipo de Magnetización del laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Figura 4.19

Curva de magnetización del biocompósito (80% Fe_3O_4)



Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

De acuerdo al gráfico, se observa que la curva de magnetización, a temperatura ambiente del biocompósito, muestra ausencia de histéresis ($H_c=0$); valor que se esperaba ya que corresponde a los materiales supermagnéticos.

El valor de la saturación magnética se encuentra alrededor de $30\text{-}35 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$, la cual concuerda con el contenido de magnetita del biocompósito, ya que muestras con un contenido del 100% de magnetita pueden presentar valores de saturación magnética de $40 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ (Liang, Shi, Jia, Yang, & Liu, 2012).

4.3. Remoción de arsénico

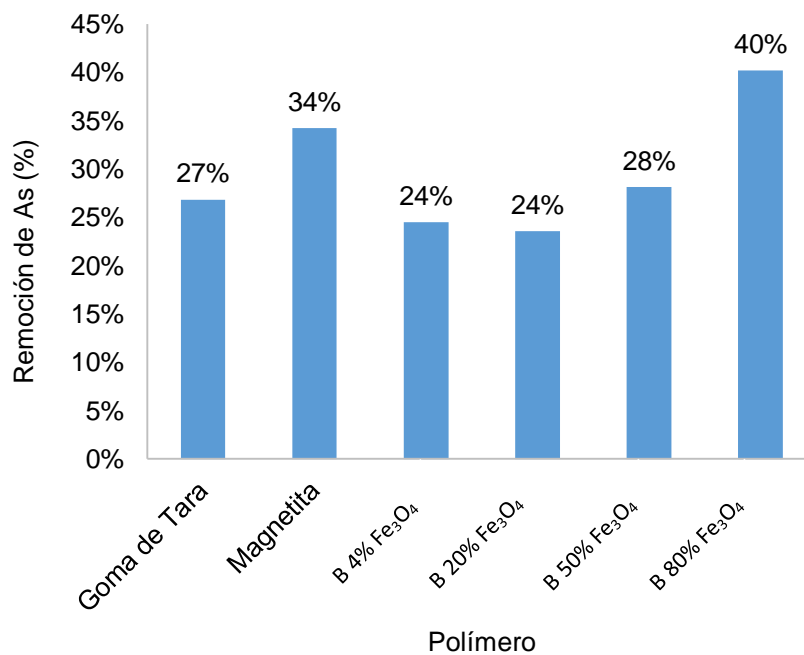
La prueba se realizó en 6 materiales, los cuales se detallan a continuación:

- Goma de tara al 40% (GT)
- Magnetita (Fe_3O_4)
- Biocompósito (B 80% Fe_3O_4 , 20% GT)
- Biocompósito (B 50% Fe_3O_4 , 50% GT)
- Biocompósito (B 20% Fe_3O_4 , 80% GT)
- Biocompósito (B 04% Fe_3O_4 , 96% GT)

Las medidas de remoción de arsénico se realizaron a temperatura ambiente, empleando 20 mL de cada material en una jarra de 1 litro de capacidad conteniendo una solución de As de 2 ppm, tomando muestra cada 5, 10, 20 y 30 minutos. De acuerdo a la concentración final de arsénico obtenida luego de 30 minutos de contacto para cada adsorbente, se presenta el porcentaje de remoción de As de cada material.

Figura 4.20

Porcentaje de remoción de As de la prueba de adsorción de cada material



Elaboración propia

Se puede observar que el polímero con una de las menores capacidades de adsorción es la goma de tara, ya que luego de los 30 minutos presenta un porcentaje de 26,82%. Además, su capacidad de remoción es irregular con el paso del tiempo. En contraste, la magnetita sola sí presenta una mejor capacidad para adsorber el arsénico disuelto, con un porcentaje de 34,24%.

Respecto a los biocompuestos, se percibe que mientras mayor es la concentración de magnetita en la composición, mayor es la capacidad de adsorción. El biocompuesto con 80% de magnetita muestra una disminución uniforme de la concentración de arsénico a lo largo del tiempo de contacto. Así mismo, se observa que su remoción es la mayor de todas, incluyendo a la de la magnetita sola.

Por lo que se concluye que el biocompósito (80% Fe₃O₄, 20% GT) es el mejor adsorbente para la remoción de arsénico en el agua contaminada, obteniendo un porcentaje de eficacia de 40,23%.

4.4. Estudios de biodegradabilidad

La prueba de degradación enzimática es utilizada cuando se conoce la estructura del polímero a degradar y las enzimas que degradan el polímero están disponibles. La goma de tara es un polisacárido de galactomanano que consiste en una cadena principal de 1,4-β-D-manosa y cadenas laterales de 1,6-α-D-galactosa, con una relación de galactosa/manosa de 1:3. Asimismo, las enzimas hidrolíticas relacionadas con la hidrólisis de mananos, y por lo tanto la goma tara, son mananasa, β-manosidasa y α-galactosidasa.

Dado lo anterior, el objetivo de la prueba era degradar la columna vertebral del polímero y dar un seguimiento a la velocidad de formación de o-dianisidina oxidada que es proporcional a la tasa de formación de manosa; debido a que este ratio es una medida de la susceptibilidad de la goma de tara o del biocompósito. Los ratios de formación de manosa obtenidos para ambos polímeros, se muestran a continuación:

Tabla 4.3

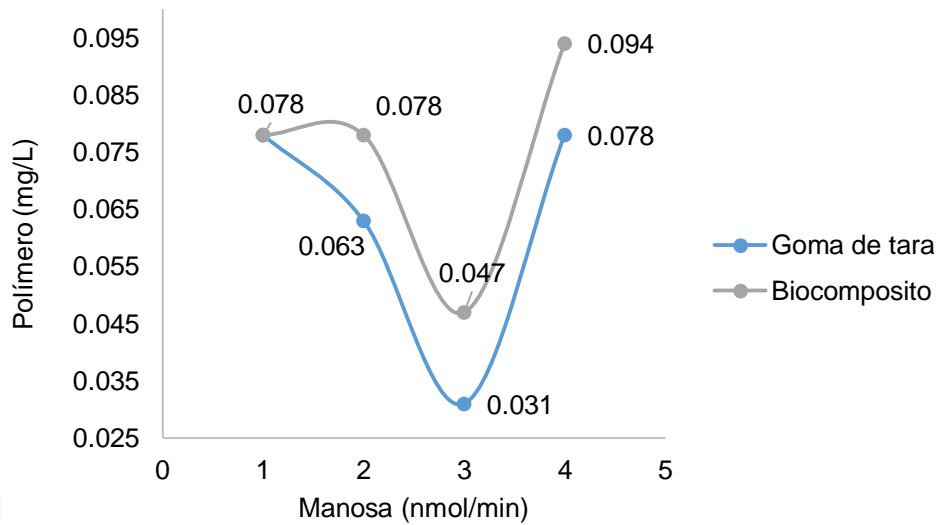
Concentración de manosa para cada material

	Goma de tara	Biocompósito
Polímero (mg/L)	nmol/min	nmol/min
0,16	0,078	0,078
0,32	0,063	0,078
0,65	0,031	0,047
1,30	0,078	0,094

Fuente: Incremento del valor agregado de la goma de Tara, *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera (2015)

Figura 4.21

Resultados de la prueba de biodegradabilidad



Elaboración propia

Se observa que los ratios de formación de manosa para ambos polímeros (goma de tara y biocompósito) no difieren de manera importante; lo cual demuestra que la modificación en la goma de tara no altera la susceptibilidad al ataque enzimático; es decir, su biodegradabilidad.

CAPÍTULO V: TECNOLOGÍAS EXISTENTES Y PROCESO DE PRODUCCIÓN

5.1. Naturaleza de la tecnología requerida

Descripción de las tecnologías existentes

Actualmente, no existe un proceso específico para la elaboración del biocompósito propuesto, pero sí existen métodos para la preparación de magnetita con otros insumos orgánicos; los cuales se han adaptado para la obtención del producto. La producción consta de diversas operaciones que requieren ciertos procesos de tecnología. Las actividades más recurrentes del proceso son las de agitación, en todos los casos es necesario verificar y pesar los insumos ingresantes para su dosificación.

Para la preparación de soluciones y la agitación se puede emplear un tanque de mezcla o un reactor con agitador, en ambos casos se llegará a obtener una mezcla homogénea. Para el lavado se puede utilizar un clarificador o separador de fases. El envasado y sellado se realizarán mediante dosificadores y envasadores.

En la tabla 5.1 se presentan las diferentes alternativas de tecnología para cada operación.

Tabla 5.1

Tecnología existente según operación

Operación	Tecnología existente	Tipo	Opción seleccionada
Recepción e inspección	Revisión físico-química	Manual	Revisión físico-química
Pesado	Balanza industrial	Industrial	Balanza industrial
Mezclado y agitación	Tanque de mezcla	Industrial	Reactor cerrado con agitador
	Reactor cerrado con agitador	Industrial	
Medición de pH	pH-metro	Manual	pH-metro
Separación de fases	Clarificador	Industrial	Separador de fases
	Separador de fases	Industrial	
Dosificado	Dosificador	Automático	Dosificador
Envasado y sellado	Envasado con sellado	Industrial	Envasadora con sellado
Etiquetado	Etiquetadora	Industrial	Etiquetadora

Nota: La tabla muestra los diferentes equipos que se pueden emplear en el proceso productivo del biocompósito, y menciona la alternativa elegida para cada operación.
Elaboración propia

5.2. Proceso de producción

Descripción del proceso

A continuación, se detallará el proceso de producción del biocompósito.

- a) Recepción e inspección de los insumos: Esta inspección se realiza con la finalidad de asegurar que los insumos a emplear en el proceso de producción cumplan con todas las especificaciones técnicas. Se verifica que el recipiente de los reactivos se encuentre herméticamente sellado, con la banda de seguridad en la tapa completamente intacta. Se compara la información de la etiqueta con las características requeridas. Y se pesa el recipiente para comprobar que el valor pesado, el cual incluye el peso del recipiente, sea de 115% aproximadamente del peso de solamente el reactivo, el cual está indicado en la etiqueta. La inspección y control de calidad se realiza en el momento de la llegada de los insumos, se seleccionan muestras aleatorias las cuales son trasladadas al laboratorio de control de calidad, donde deben ser analizadas mediante pruebas y ensayos para verificar que las características de los reactivos e insumos tales como el hidróxido de sodio, cloruro ferroso, cloruro férrico hexahidratado y goma de tara,

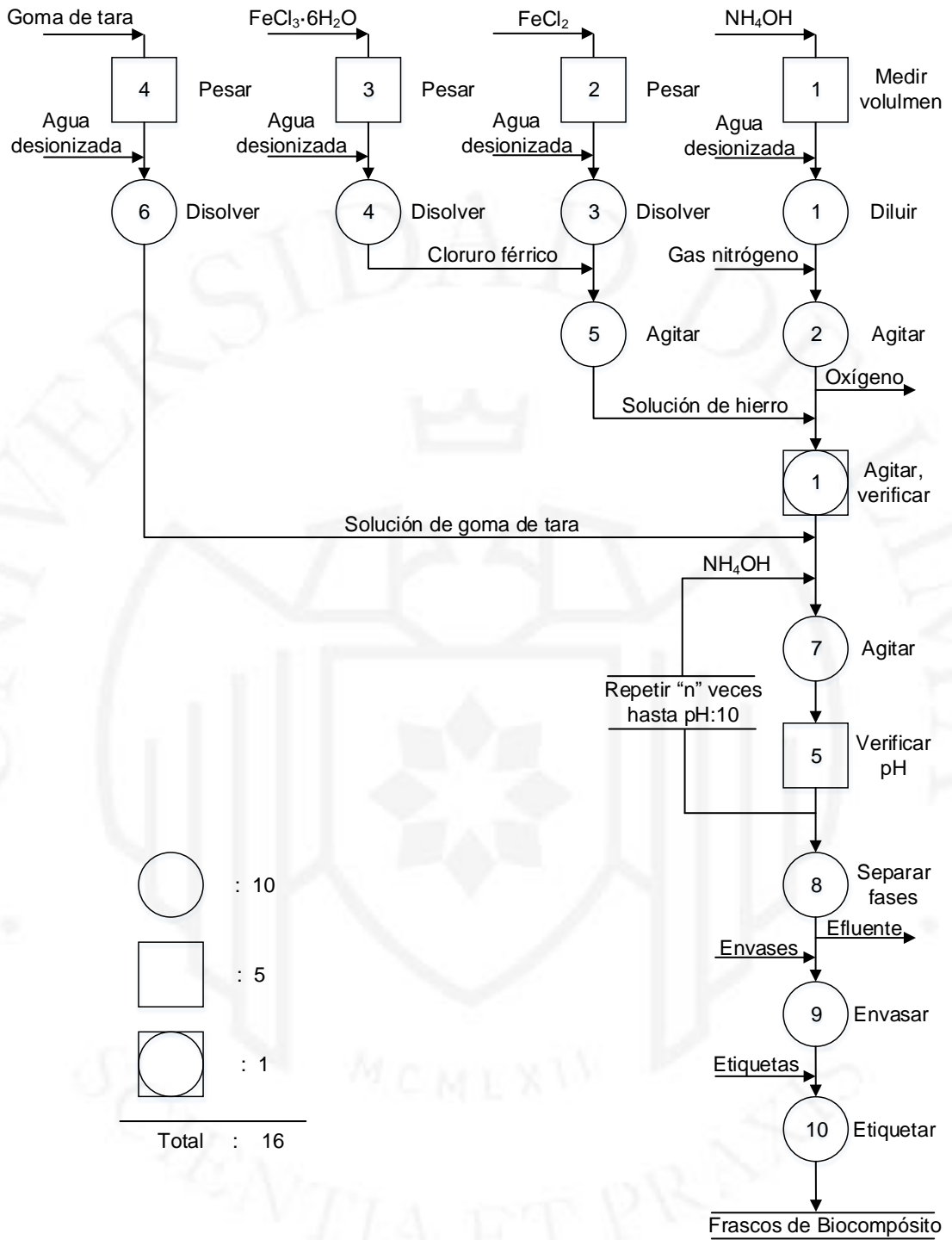
cumplan con los estándares requeridos para el proceso. El agua a emplear también es inspeccionada antes de ingresar al proceso productivo, esta inspección se realiza en el laboratorio de control de calidad. El agua debe cumplir con los estándares del agua de tipo I, agua desionizada, tener un valor máximo de 0,056 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como conductividad eléctrica y 18 $\text{M}\Omega$ como valor mínimo de resistividad a 25 °C.

- b) Pesado: Es muy importante asegurar las cantidades de preparación, por lo que se requerirá de una balanza industrial muy precisa. En el caso de este proceso de producción, mediante esta operación se logrará obtener las soluciones con sus respectivas concentraciones molares y alcanzar la relación estequiométrica de las reacciones, las cuales serán empleadas para la obtención del biocompósito.
- c) Preparado de solución de goma de tara: Para la solución de goma de tara, se requiere una concentración al 0,62% p/p, agitada a 500 rpm por 3 horas, tiempo suficiente para su maduración. Cabe resaltar que esta disolución debe empezar horas antes del inicio del proceso de síntesis del biocompósito.
- d) Preparado de solución de hierro: Para la solución de hierro, se requiere una mezcla de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y FeCl_2 en una relación de 4,26:1 p/p disueltos en agua desionizada a una concentración de 0,15 g/mL.
- e) Mezclado y agitación de soluciones: Para la preparación de las soluciones se debe realizar el mezclado y la agitación. La agitación debe ser constante hasta su completa disolución para que logre alcanzar una fase física homogénea. La velocidad de esta operación es de 300 rpm.
- f) Preparación del biocompósito: En el reactor principal se mezcla en agitación constante el hidróxido de amonio 0,7 mol/L con agua desionizada, hasta alcanzar una concentración 5,26% V/V. Cuando la mezcla se encuentre homogénea, se debe mantener una atmósfera inerte por lo que debe ingresar el gas nitrógeno en forma constante para eliminar el oxígeno, este flujo se mantendrá durante todo el proceso de formación de biocompósito. Luego ingresa la solución de hierro en agitación constante, esto generará un cambio de color inmediato a verde y posteriormente a

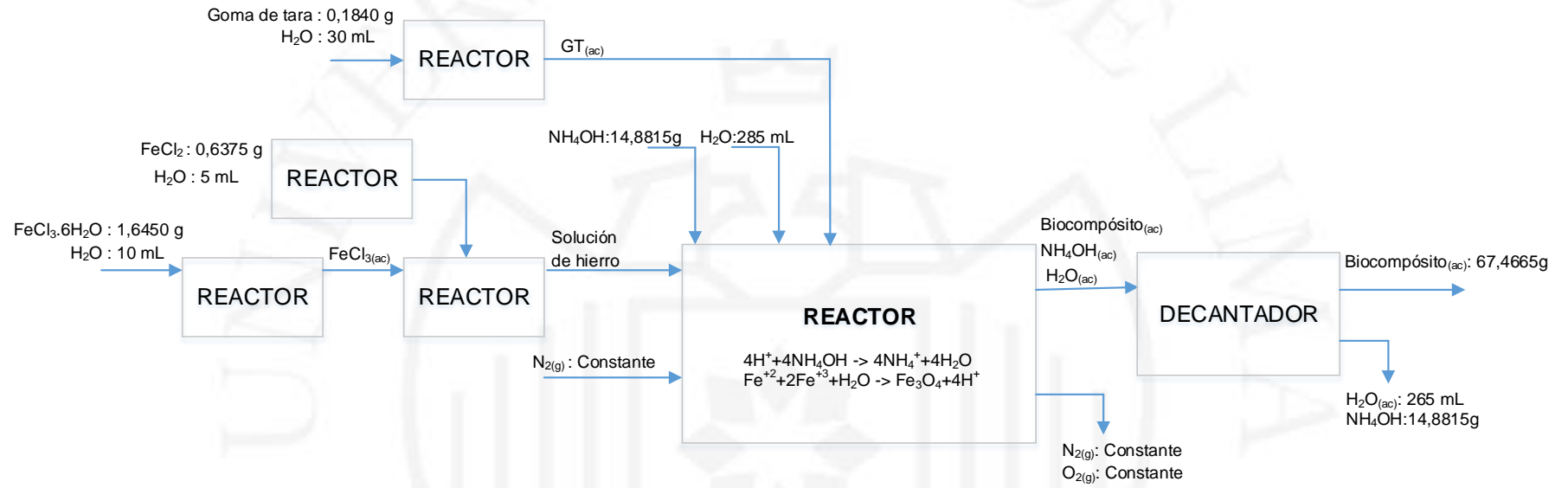
negro, lo cual refleja la formación de la magnetita. Finalmente, debe ingresar la solución de goma de tara para la formación del biocompósito, la eficacia de esta agitación tendrá influencia directa en el rendimiento del proceso de producción.

- g) Medición de pH: Cada 30 minutos, durante 4,5 horas, se toma una muestra de la mezcla para verificar el valor del pH con la ayuda de un pH-metro. La solución debe tener un pH 10 para que la magnetita precipite. Inicialmente, se obtiene un pH ácido, alrededor del valor 3. Con el fin de aumentarlo, se agrega hidróxido de amonio 0,7 mol/L, de manera controlada, hasta alcanzar el valor de pH requerido.
- h) Envasado: El biocompósito es almacenado en frascos sellados al vacío, la dosificación del producto debe ser ajustada según la capacidad de los frascos.
- i) Etiquetado: La etiqueta cumplirá con las especificaciones técnicas de los artículos 116 y 117 determinados por la Norma Metrológica Peruana (NMP) de Rotulado de Productos Envasados, en los cuales se establece que se debe presentar la siguiente información (Instituto Nacional de Calidad, 2018).
- Nombre del producto
 - Declaración de los insumos y aditivos empleados en la elaboración
 - Nombre y dirección del fabricante
 - Fecha de vencimiento, cuando el producto lo requiera
 - Código o clave del lote
 - Condiciones especiales de conservación, cuando el producto lo requiera

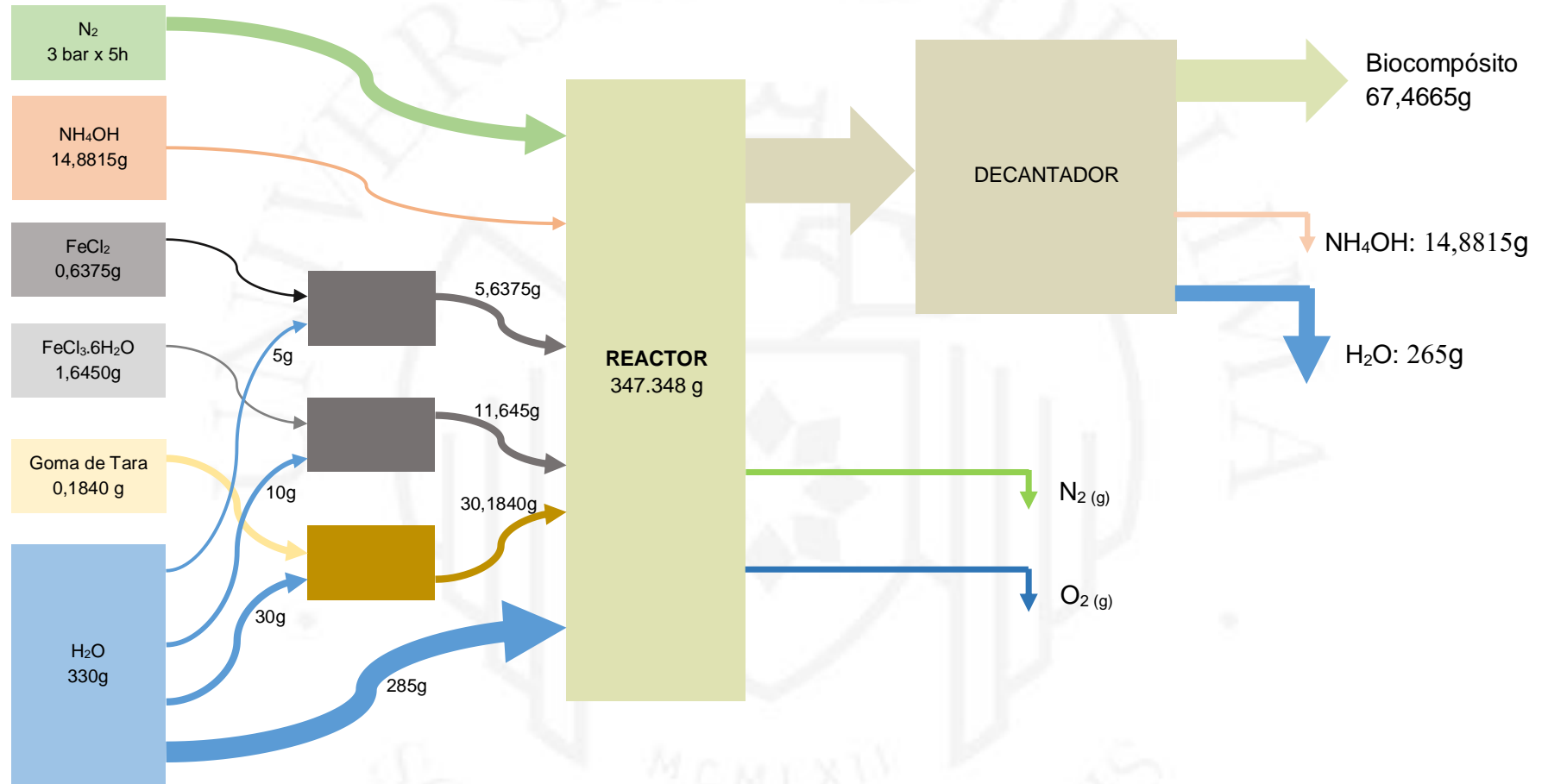
5.2.1. DOP



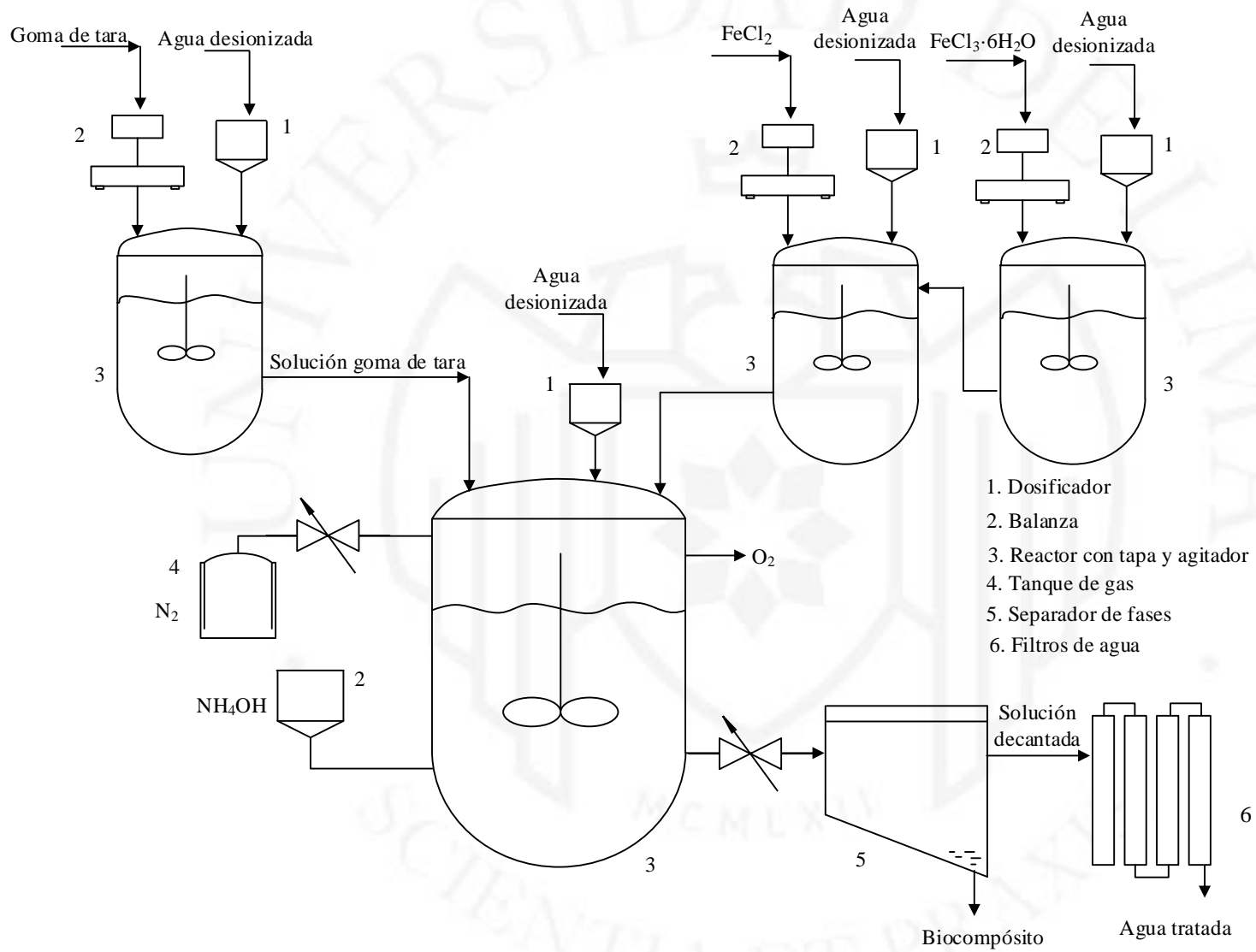
5.2.2. Diagrama de balance de materia



5.2.3. Diagrama Sankey



5.2.4. Diagrama de flujo detallado




5.3. Características de las instalaciones y equipos

Para asegurar la eficiencia y productividad del proceso, se han elegido los siguientes equipos:

- Respecto a la operación de pesado, se realizará mediante una balanza electrónica de tipo industrial.
- En la operación de preparación de solución de goma de tara, solución de hierro y el biocompósito se empleará un reactor cerrado con agitador, cada reactor debe tener la capacidad igual o superior a la relación presentada en el balance de materia para lograr una producción continua.
- La medición del pH se realizará mediante un pH-metro digital en línea, mediante el cual se podrá monitorear para mayor exactitud en los resultados y asegurar la calidad del biocompósito.
- Para el obtener el biocompósito final, se escogió utilizar un separador de fases. Este equipo es apropiado para la separación de mezclas pastosas, como es característico en esta etapa del proceso productivo; además presenta una agitación lenta que favorece a esta separación.
- Para la operación de envasado se empleará un dosificador automático regulable.
- En el etiquetado se empleará una etiquetadora automática con capacidad para un sistema continuo de producción y que cumpla con la presentación adecuada de la etiqueta.

Tabla 5.2

Balanza industrial

Descripción	Imagen
<p> Marca: Henkel. Modelo: FS15-2T Tipo: Plataforma Precisión: 1 Kg Energía: 220 V Frecuencia: 50 / 60 hz DC Batería : 6 V, recargable Amperaje : 4 AMP Cálculo de Suma Plataforma: 2,25 m² </p>	

Fuente: Benavides (2018)

Tabla 5.3


pH-metro digital en línea

Descripción	Imagen
<p> Nombre: Controlador de pH / ORP en línea marca Meacon Rango de medida 0-14 pH Exactitud pH relativo $\pm 0,05$ Precisión pH relativo $\pm 0,002$ Rango de temperaturas en °C 0 ~ 100°C Área: 0,25 m² </p>	

Fuente: Meacon Corporation (2018)

Tabla 5.4

Reactor de vidrio con agitador

Descripción	Imagen
<p>Reactor de vidrio con agitador Reactor químico hermético con agitador Configuración según procesos Volumen: 50 L Peso: 90 Kg Velocidad rotación: 60-780 rpm Dimensiones: Largo: 0,65 m Ancho: 0,56 m Alto: 2,45 m</p>	

Fuente: Zhengzhou Keda Machinery and Instrument Equipment Co. (2018)

Tabla 5.5


Dosificador volumétrico

Descripción	Imagen
<p>Dosificador volumétrico para mezcla automática Pantalla digital para ajustar el dispensado al requerido. Capacidad: 25Kg/h Dimensiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Largo: 0,83 m • Ancho: 0,68 m • Alto: 1,4 m 	

Fuente: Dongguan Gainwal Plastic Machinery Ltd (2017)

Tabla 5.6


Máquina de envasado

Descripción	Imagen
<p>Máquina de envasado</p> <p>Puede ajustarse el para el tamaño deseado Trabaja con los siguientes materiales vidrio, metal, papel, plástico, madera Capacidad: 1000 frascos / hora Dimensiones: Largo: 1,1 m Ancho: 0,6 m Alto: 1,7 m</p>	

Fuente: Dongguan Rainbow Pack Machine Co. (2018)

Tabla 5.7

Etiquetadora

Descripción	Imagen
<p>Etiquetadora automática Máquina de etiquetado de sacos planos o irregulares Columna regulable V/H, multiajustable Pantalla táctil con grabación de hasta 50 formatos para no tener que ajustar el dispensado al cambiar de formatos. Capacidad: 2000 etiquetas / hora Dimensiones: Largo: 1 m Ancho: 0,5 m Alto: 1,5 m</p>	

Fuente: Soluciones de Etiquetado y Marcaje (2018)

5.4. Aspectos de calidad

La calidad del biocompósito es un aspecto esencial para la remoción del arsénico, ya que de esta dependerá la eficiencia del producto. Es por ello que durante el proceso de producción del biocompósito es necesario establecer puntos de control de calidad exhaustivos, desde el ingreso de la materia prima en perfectas condiciones tanto como el buen estado de los equipos para obtener el mejor rendimiento.

a) Control de calidad de materia prima

La materia prima debe conservarse en condiciones que no alteren su composición química. Para el cloruro férrico, cloruro ferroso, hidróxido de amonio y la goma de tara, estos deben permanecer en lugares secos, cerrados y a temperatura ambiente de aprox. 25 °C. Así mismo, es muy importante que el ambiente se encuentre libre de humedad, ya que esta puede alterar fácilmente la concentración y otras características de la materia prima.

b) Control de calidad durante el proceso de producción

- Cloruro ferroso: La agitación debe permanecer constante para lograr una solución homogénea, verificación de posibles fugas. Es necesario una verificación visual sobre el color y su homogeneidad en toda la solución, mantener la preparación de la solución a temperatura ambiente, 17°C a 25°C aproximadamente.
- Cloruro férrico: Una vez retirado el cloruro férrico hexahidratado del frasco, este debe ser utilizado de inmediato evitando su exposición al aire, ya que al ser un compuesto hidratado y estar expuesto al ambiente, reacciona alterando su composición.
- Solución goma de tara: Durante la preparación de goma de tara es importante mantener la agitación constante y verificar que la solución llegue a la viscosidad deseada.

c) Punto de verificación de calidad

En cada actividad del proceso es necesario una verificación de calidad, sin embargo; el punto de verificación de calidad más importante se encuentra en la verificación de pH, ya que es en este punto donde se alcanza el producto deseado, por el cual obtenemos el

biocompósito. La solución debe alcanzar el valor de pH 10 para obtener la calidad deseada de producto final, por lo que es necesario suministrar $\text{NH}_4\text{OH}_{(\text{ac})}$ hasta alcanzar el valor de pH requerido.

d) Sistema de mantenimiento de equipos

La calidad del producto final también se ve afectada por el mantenimiento de los equipos involucrados en el proceso de producción. Mantener una producción continua requiere que los equipos deban operar en óptimas condiciones, de esta forma obtener los mejores resultados. Durante el diseño experimental los equipos e instrumentos utilizados recibieron mantenimiento y calibración, para cada prueba y ensayo. De esta forma, es necesario realizar el mantenimiento y calibración de los equipos seleccionados en el proceso de producción, según indique el cronograma de mantenimiento del fabricante.



CAPÍTULO VI: ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

6.1. Evaluación de los impactos ambientales en el proceso de producción

El impacto ambiental es aquella alteración positiva o negativa en uno o más componentes del ambiente, el cual es generado por la actividad humana. Este impacto produce cambios en el ambiente, ya sea, en el agua, aire, suelo y biota. El Estudio de Impacto Ambiental tiene como fin analizar, pronosticar y presentar medidas para la toma de decisiones de tal modo que las actividades del presente trabajo sean compatibles con la protección y preservación del ambiente. En este caso se evaluará la huella que ocasiona el proceso de producción de adsorbentes avanzados elaborados a base de goma de tara para el tratamiento de efluentes industriales contaminados especialmente con arsénico. Cabe resaltar que, para ahondar este estudio, existe la norma internacional ISO 14001, la cual establece cómo implementar una Gestión Ambiental eficaz en cualquier tipo de empresa. Dicha norma está basada en el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar, y especifica los requisitos más importantes para identificar, controlar y supervisar los aspectos ambientales de cualquier organización, y también la forma de gestionar y mejorar todo el sistema (Bureau Veritas, s.f.).

De acuerdo al proceso de producción existen ciertas actividades que afectan de manera directa o indirecta al medio ambiente. La operación de preparación de las soluciones genera gran cantidad de volumen de agua residual, la cual, si es vertida al desagüe, puede alterar la calidad del agua de la red hídrica de toda la localidad y ciudad. Del mismo modo, esta operación también puede producir vapores que alteran la composición del aire y son peligrosos para la salud de los trabajadores. Así mismo, esta actividad puede ocasionar cierta cantidad de residuos sólidos cuando las soluciones no son preparadas de manera adecuada, los cuales son desechados degradando la calidad del suelo. En la operación de envasado también se genera cierta proporción de latas defectuosas, las cuales son desechadas como residuos sólidos y de esta forma se ocasiona contaminación del suelo.

Puesto que el proceso requiere de reactivos químicos, los trabajadores poseen cierto riesgo de exposición a estas sustancias; cabe resaltar que la operación de preparación de soluciones presenta mayor riesgo de contacto que la recepción e inspección. También se presenta ruido en las operaciones de preparación de soluciones,

obtención del producto y envasado, lo cual representa un riesgo para los encargados de estos procesos.

Con el fin de realizar un análisis adecuado de todos los posibles impactos del proceso de elaboración, se presenta a continuación la matriz Causa-Efecto.

Tabla 6.1

Matriz Causa-Efecto del proceso de elaboración del adsorbente avanzado

FACTORES AMBIENTALES	N°	ELEMENTOS AMBIENTALES IMPACTADOS	ACTIVIDADES						
			a) RECEPCIÓN E INSPECCIÓN	b) PREPARACIÓN DE SOLUCIONES	c) DOSIFICACIÓN DE SUSTANCIAS	d) OBTENCIÓN DEL PRODUCTO	e) ENVASADO		
COMPONENTE AMBIENTAL	MEDIO FÍSICO	A	AIRE						
		A.1	Alteración del aire debido a la emisión de partículas de goma de tara			-0,32			
		A.2	Contaminación por emisión de vapores de las sustancias preparadas		-0,63				
		AG	AGUA						
		AG.1	Contaminación por aguas residuales de los desechos en recipientes		-0,63	-0,54	-0,54		
	MEDIO SOCIAL	MEDIO SOCIAL	S	SUELO					
			S.1	Degradación del suelo debido a los residuos del recipiente		-0,47		-0,59	
			P	SEGURIDAD Y SALUD					
	P.1	Riesgo de exposición del personal a sustancias químicas	-0,62	-0,50					
	P.2	Riesgo de exposición del personal a ruidos intensos		-0,43		-0,43	-0,51		
P.3	Riesgo de exposición del personal a olores nocivos		-0,59	-0,43	-0,59				

Nota: Los números representan el índice de significancia del impacto de cada operación sobre determinado componente ambiental. El símbolo + corresponde a un impacto positivo y el símbolo – a uno negativo.

Elaboración propia

Para determinar el IS (índice de significancia) de cada impacto se aplicó la siguiente fórmula:

$$IS = \frac{2m + d + e}{20} \times s$$

Donde:

m: magnitud

d: duración

e: extensión

s: sensibilidad del medio

Los rangos de significancia son los siguientes:

Tabla 6.2

Rangos del nivel de significancia

NIVEL DE SIGNIFICANCIA	VALORACIÓN
Muy poco significativo (1)	0,10 - <0,39
Poco significativo (2)	0,40 - <0,49
Moderadamente significativo (3)	0,50 - <0,59
Muy significativo (4)	0,60 - <0,69
Altamente significativo (5)	0,70 - 1,0

Fuente: FAO ORG (2017)

Se puede observar que el nivel de significancia del componente medio físico presenta un valor más significativo respecto al medio social. Así mismo, las operaciones con mayor impacto son las de recepción e inspección y preparación de soluciones.

A continuación, se presenta un cuadro de los niveles de significancia 4 y 5 con el fin de encontrar medidas de solución y disminuir el potencial impacto.

Tabla 6.3

Impactos y medidas correctoras de las operaciones del proceso de producción

OPERACIÓN	IMPACTO AMBIENTAL	MEDIDA CORRECTIVA
Recepción e inspección	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de exposición del personal a sustancias químicas. 	<p>Para reducir este riesgo, se implementarán medidas de seguridad en el área de trabajo, así mismo se brindarán los EPPs (equipos de protección personal) de uso obligatorio.</p>
Preparación de soluciones	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación por aguas residuales en los recipientes • Contaminación del aire por emisión de vapores de las sustancias preparadas 	<p>Para eliminar el impacto de las aguas residuales, se realizará un tratamiento con el fin de separar el contaminante en un material sólido que pueda ser más manejable.</p> <p>Principalmente, se debe a los posibles vapores generados por la preparación de la solución de hidróxido de amonio, para lo cual se colocarán campanas extractoras. Además, se brindará al personal los EPPs adecuados para la mitigación del efecto de estos vapores.</p>
Dosificación de sustancias	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación por aguas residuales de los desechos en los equipos. • Riesgo de exposición del personal a olores de los reactivos 	<p>Se realizará el mismo tratamiento de aguas que se obtienen de los residuos de la preparación de soluciones. Estas aguas residuales son las que se quedan en el recipiente de dosificación, por lo que ya se encuentran diluidas.</p> <p>Para disminuir este tipo de impacto, la planta de producción debe ser aireada. Además, se brindarán a los operarios los EPPs requeridos para contrarrestar estos olores, como mascarillas para vapores o gases.</p>
Obtención del producto	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación del suelo debido a los residuos del recipiente 	<p>Para contrarrestar este riesgo, se separará la magnetita y arsénico de la goma de tara en solución, la goma puede ser reutilizada o vertida al medio ambiente ya que es biodegradable. La magnetita y arsénico se pueden recuperar por otro proceso, o en su defecto son trasladados por una EPS-RS para que se encargue de su disposición final en un relleno de seguridad de residuos peligrosos.</p>
Envasado	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de exposición del personal a ruidos intensos 	<p>Frente a este impacto, se presentan 2 opciones. La primera es colocar paredes mitigadoras de ruido para que la extensión sea solo de carácter puntual; es decir, solo en la sección del proyecto donde se encuentre la maquinaria. La segunda es la distribución de EPPs al personal que labore dentro del área impactada.</p>

Elaboración propia

6.2. Identificación de los aspectos e impactos ambientales en el proceso del diseño experimental

Con el fin de evaluar los impactos que generó el proceso del diseño experimental, especialmente las pruebas de adsorción que se realizaron para evaluar la funcionalidad del producto, se presenta a continuación el cuadro de aspectos e impactos ambientales correspondientes a estas operaciones.

Tabla 6.4

Aspectos e impactos ambientales durante el diseño experimental

Actividad	Aspecto	Impacto	Valoración
Lavado de los recipientes usados	Residuos de reactivos químicos en los recipientes	Contaminación del agua	Impacto negativo. Es regional porque es vertido al desagüe.
Preparación de sustancias para la prueba de adsorción	Generación de residuos líquidos	Contaminación del suelo	Carácter negativo. Es puntual, solo afecta el área del laboratorio.
		Contaminación del agua	
Acondicionamiento de la muestra para la prueba de adsorción	Residuos sólidos generados	Contaminación del suelo	Carácter negativo. Es local, ya que tienen una disposición final adecuada.
Medición del arsénico al finalizar la adsorción	Generación de residuos acuosos	Contaminación del suelo	Carácter negativo. Es local, ya que tendrán una disposición final adecuada.
		Contaminación del agua	
	Generación de gas	Contaminación del aire	Impacto negativo. Es regional porque es emitido al ambiente.

Elaboración propia

6.3. Producción más limpia

La aplicación de estrategias de producción más limpia en el proceso de elaboración del biocompósito permite un aumento de eficiencia, reducción del riesgo de contaminación del medio ambiente y la salud del hombre; asimismo, puede verse reflejado económicamente en un ahorro de costos a medio plazo. Se identificaron puntos donde la aplicación de estrategias de producción más limpia tendría un impacto notable.

Buenas prácticas operativas

Las buenas prácticas operativas deben aplicarse a cada operación involucrada en el proceso.

a) Pesado adecuado de la materia prima

Para asegurar la calidad del producto y la estandarización de los lotes producidos es necesario que la materia prima sea cuantificada según las concentraciones requeridas, de esta forma se garantizará la estandarización de los productos. Para lograr esto es posible la asignación de un operario para el pesado de los materiales y la elaboración un plan de calibración de la balanza.

b) Estandarización de los procesos

La estandarización en los procesos permite que la producción continua del producto no sufra cambios significativos. Los procesos no estandarizados pueden generar problemas en el producto final, problemas con clientes al no recibir el producto solicitado, problemas en generación de una mayor cantidad de residuos o merma en las operaciones. Para lograr la estandarización en los procesos se deben establecer los requerimientos para cada operación, las cuales deben colocarse en lugares muy visibles dentro de las instalaciones, mantener un registro de datos de cumplimiento de los procedimientos, capacitar a los operarios y realizar un seguimiento al registro para evaluar el cumplimiento de la estandarización en los procesos.

c) Mantenimiento de equipos

Un mantenimiento preventivo planificado mantiene la eficiencia de los equipos en óptimas condiciones, operando en sus mejores condiciones y aprovechando la eficiencia en el uso energético. Se debe contar con los manuales de uso y mantenimiento de los equipos brindados por los proveedores; paralelo a esto se debe programar y planificar los mantenimientos de forma anual a lo largo de su vida útil. En esta planificación es necesario precisar las actividades de mantenimiento, recursos necesarios, tiempo, insumos o recursos a utilizar, frecuencia entre otras precisiones del fabricante.

d) Ahorro energético

- Equipos: Gran parte del consumo energético se debe al uso de los equipos en el proceso de producción, este consumo puede variar principalmente por el sistema de tecnología que se utilice, el rendimiento de los equipos y las condiciones requeridas del proceso. Se deben definir estrategias en estos puntos que puedan lograr un mejor rendimiento en el uso energético que requieren los equipos, mediante las cuales se obtendrá un ahorro significativo.
- Iluminación: La iluminación en las instalaciones para el proceso de producción representa un consumo significativo de energía, en este punto se puede aprovechar la luz natural a través de tragaluces o lámparas de alto rendimiento, ahorradoras o de alta eficiencia. La iluminación LED es actualmente la tecnología de mejores resultados en consumo energético, esto también representa un ahorro a medio y largo plazo económicamente. Otra de las posibles estrategias es el uso y aprovechamiento de la energía solar, siempre y cuando las condiciones e instalaciones sean las adecuadas.
- Personal: El personal es recurso clave en la eficiencia del uso energético, mantener un plan de capacitación y concientización del uso energético dentro de las instalaciones puede verse reflejado en un ahorro energético considerable. Por otro lado, trazar metas y progresos en la eficiencia energética involucrando al personal con un papel importante generara mayor productividad en el uso energético y en la fuerza laboral.

6.4. Tratamiento de agua

Dentro del proceso de producción existe la posibilidad de realizar el tratamiento del agua utilizada para la preparación de las soluciones, entre los principales tratamientos tenemos:

- Tratamiento de agua en la solución de tara y solución de hierro: el tratamiento del agua producto de las soluciones obtenidas no requiere de procedimientos sofisticados que demanden tecnología muy avanzada, por lo que su tratamiento puede ser viable y la reutilización del agua puede generar ahorros económicos a largo plazo y un menor impacto al medio ambiente.
- Tratamiento de agua de la solución de biocompósito: el tratamiento de agua de esta solución requiere un procedimiento más detallado, sin embargo, su

tratamiento y reutilización pueden generar ahorros económicos y un menor impacto en el ambiente y la salud humana.

6.5. Tratamiento de gases generados

El principal gas o vapor emitido en el proceso es el amoníaco, un gas tóxico y dañino para la salud humana. Sin embargo, es posible recuperar hidróxido de amonio mediante air-stripping el cual son columnas de captación de gases. Esto generaría un menor impacto ambiental al no liberarlo al ambiente, y su posible reutilización generará ahorro económico.

6.6. Ciclo de vida del producto

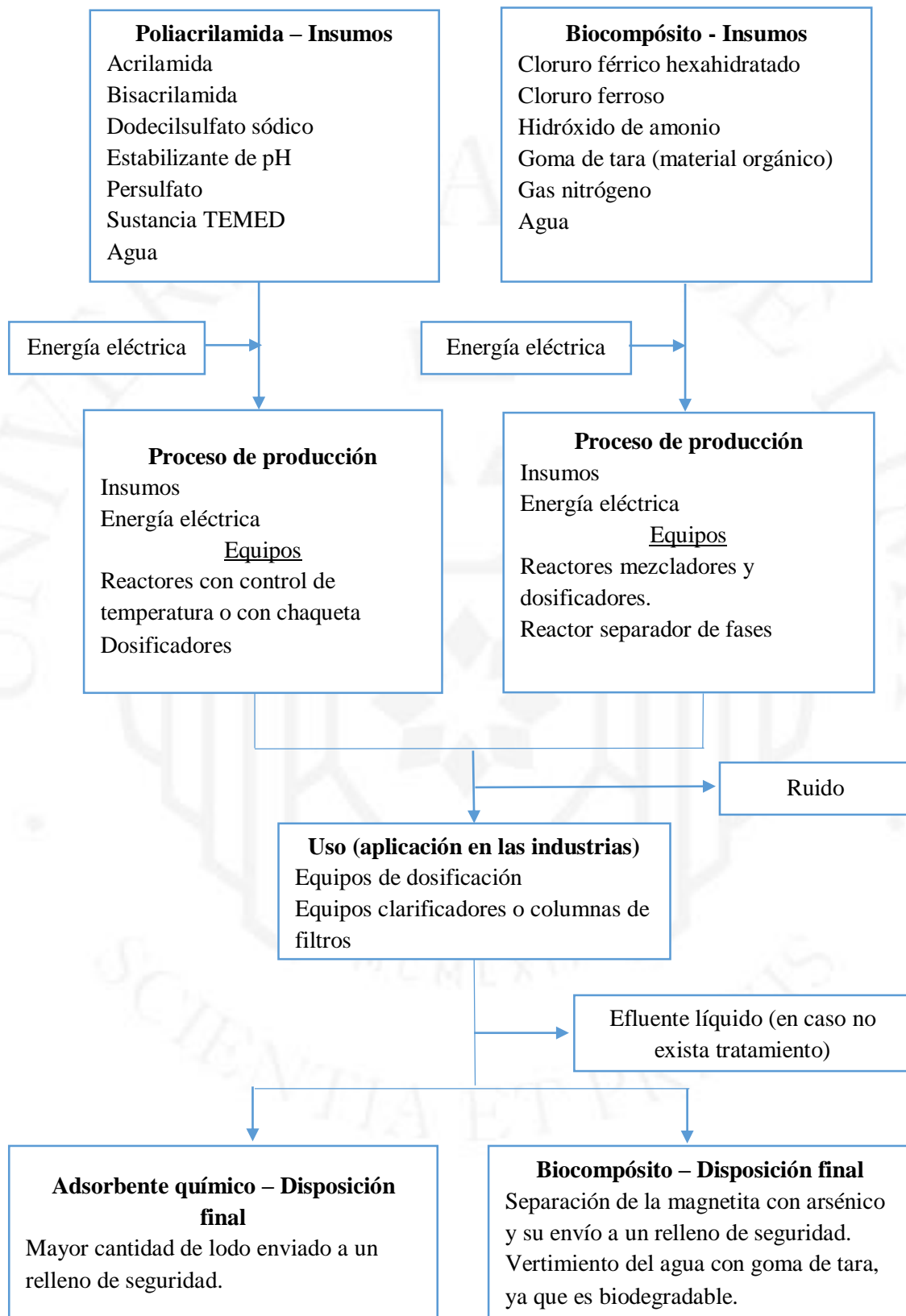
El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia. Es decir, considera el consumo de recursos naturales y las emisiones contaminantes de un producto, no solo en la fase de fabricación, sino también en las primeras etapas de producción (fabricación de insumos y materias primas, energía requerida) y las últimas etapas de uso de este producto a su eliminación como residuo (salidas al aire, agua y suelo) (Ferreira; García Praca, 2015).

Para el presente trabajo, se enfatizará el análisis en la comparación entre el adsorbente avanzado elaborado a base de goma de tara y otro floculante completamente químico, como la poliacrilamida; evaluando las similitudes y diferencias para los siguientes aspectos:

- Naturaleza de los insumos
- Proceso de producción
- Uso del producto
- Disposición final

Figura 6.1

Ciclo de vida de ambos adsorbentes



Elaboración: Propia

Se puede observar que la poliacrilamida requiere mayor cantidad de reactivos químicos a diferencia del biocompósito; lo cual puede generar un alto grado de complejidad para su tratamiento final. Además, existe un control de temperatura durante el proceso de producción del adsorbente químico, el cual genera una mayor demanda de energía eléctrica (Burkert; Hartmann, 1914).

El tipo de equipos empleados para su aplicación en las plantas industriales dependerá de la naturaleza del proceso a tratar, de la concentración del agua contaminada, el caudal, entre otros parámetros. Y ambos tipos de adsorbentes pueden ser usados en diversos casos.

Para ambos polímeros, existe la posibilidad de que en el post-tratamiento no se realice ninguna operación de acondicionamiento de los residuos y estos sean vertidos directamente a las fuentes de agua, lo cual ocasionaría un impacto perjudicial a los seres que rodean y habitan estas áreas.

Sin embargo, cuando se realiza una adecuada disposición final, se envía el lodo obtenido a un Relleno de Seguridad. En el caso particular del biocompósito, la cantidad destinada a este relleno es mucho menor en comparación con la del adsorbente químico, debido a que contiene material orgánico que se biodegrada y no requiere de una disposición final. Este aspecto genera un menor impacto ambiental, ya que el agua con goma de tara, separada del lodo, puede ser vertida sin contaminar ninguna fuente de agua.

Debido a lo mencionado anteriormente, se concluye que el biocompósito genera un menor impacto ambiental que un adsorbente químico.

CONCLUSIONES

La aplicación de un adsorbente avanzado a base de goma de tara para la remoción de arsénico en aguas residuales contaminadas es viable tecnológicamente debido a que existen los equipos e insumos necesarios para su elaboración.

El biocompósito preparado es capaz de remover 40,23% de arsénico a 2 ppm en agua contaminada después de 30 minutos a temperatura ambiente. Las medidas de remoción de arsénico demostraron que un incremento en el contenido de goma de tara, no mejoraban la eficiencia del biocompósito.

Las pruebas sobre la medida de la capacidad magnética del biocompósito mostraron que el material es superparamagnético, lo cual permite que pueda ser atraído de manera eficaz por un imán para su remoción del agua tratada.

Los estudios realizados sobre la susceptibilidad enzimática del biocompósito demostraron que la capacidad de biodegradabilidad de la goma de tara no fue afectada por la adición de la magnetita.

Se diseñó un método de preparación el cual permite obtener nanopartículas de magnetita con goma de tara de manera sencilla a escala industrial.

El proceso industrial propuesto demuestra ser el de mayor rendimiento, siendo el más atractivo al no requerir de equipos con tecnología sofisticada ni de procesos adicionales como el calentamiento o enfriamiento de las sustancias.

El producto presenta una gran ventaja frente a sus competidores al ser el único amigable con el medio ambiente, debido a que una gran parte de los lodos obtenidos es biodegradable y no daña las fuentes de agua ni los suelos. Además, tiene un impacto económico favorable al no requerir de tratamiento de lodos luego de su aplicación.

Se concluye que el proyecto no ha generado impactos significativos en el medio ambiente debido a que todos los reactivos empleados durante el proceso experimental fueron acondicionados para una adecuada disposición final. Asimismo, en el proceso de producción, es posible la reutilización de algunos insumos tales como el agua y el NH_4OH , luego de su debido tratamiento y acondicionamiento. Esta reutilización generaría, además de un menor impacto ambiental, un ahorro económico a largo plazo.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una evaluación financiera del proyecto con el fin de estimar la inversión requerida para la implementación de una planta productora del adsorbente avanzado, así como el tipo de financiamiento más rentable.

Con el fin de implementar el uso de este adsorbente en aguas mineras reales, se debe considerar dos aspectos indispensables. En primer lugar, realizar una prueba de floculación y sedimentación para determinar la dosificación óptima de acuerdo a las características del agua residual. Además, ejecutar un test de estabilidad del flóculo para precisar la deshidratación del lodo obtenido luego del tratamiento y planificar su disposición final.

Para una implementación adecuada de las estrategias de producción más limpias, es necesario la evaluación previa de los costos que requiere el tratamiento de agua y de los gases generados, el cual logre un balance entre los beneficios ambientales y los costos que implican las operaciones.

Dado que la capacidad de remoción de arsénico del adsorbente avanzado es $4,04 \times 10^3 \mu\text{g/g}$, se recomienda emplear este producto como floculante luego de un proceso de coagulación con el fin de remover aún más el arsénico presente en el agua.

Una alternativa interesante es evaluar sustituir las nanopartículas de magnetita por otro material para formar diversas líneas de producción de biocompuestos con goma de tara, los cuales tendrían la propiedad de un floculante orgánico con capacidad para adsorber una gama más amplia de minerales y metales suspendidos en efluentes mineros.

REFERENCIAS

- Aguilar Ascón, E. A. (2010). Utilización de las semillas de tara (caesalpinia spinoza) como ayudante de coagulación en el tratamiento de aguas (Tesis de titulación, páginas 7-13, 102-149) Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/495>
- Arias, M. H. J., Gilman, R. H., Cabrera, L. Z., George, C. M., Danz, D., Checkley, W., Mihalic, J., Sima. L., (2014). Arsenic exposure in drinking water: an unrecognized health threat in Peru. *Bulletin of the World Health Organization*, 92(8), 565–572. Recuperado de <https://doi.org/10.2471/blt.13.128496>
- Barbalace, K. (2014). Periodic Table of Elements. Recuperado de <https://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/As.html>
- Benavides, C. (2018). Sin título. Recuperado de <http://comercialbenavides.redtienda.net/cat.php?id=134768>
- Bose, A. (2017). Classification of Nanomaterials: Pharmainfo.net. Recuperado de <http://www.pharmainfo.net/book/emerging-trends-nanotechnology-pharmacy-introduction-nanotechnology/classification>
- Burkert, Hans; Hartmann, J. (1914). ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry. Editorial WILEY-VCH, páginas 151-154
- Cardoso, A. S. (2008). In vitro studies of Gum Arabic-coated Magnetic Nanoparticles with Mammalian Cell Cultures. (Paper científico, página 20-22) Lisboa: Universidad Nova de Lisboa.
- Castro, D. (2014). Niveles preocupantes de arsénico en el agua potable: El Comercio. El Comercio. Recuperado de <http://elcomercio.pe/blog/expresiongenetica/2014/09/niveles-arsenico-agua-potable>
- Defensoría del Pueblo. (2017). REPORTE DE CONFLICTOS SOCIALES N.º 161: DEFENSORÍA DEL PUEBLO. Recuperado de http://www.defensoria.gob.pe/conflictos-sociales/objetos/paginas/6/48reporte_mensual_de_conflictos_sociales_n_161_-_jul.pdf
- Dongguan Gainwal Plastic Machinery Ltd. (2017). Sin título. Recuperado de <http://en.gainwal.com/>
- Dongguan Rainbow Pack Machine Co., L. (2018). Sin Título. Recuperado de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Factory-price-pneumatic-small-beer-bottling-60775277185.html?spm=a2700.galleryofferlist.normalList.311.17fa743asMjPRG>

- GELYMAR. (2017). GELYMAR. Recuperado de <http://www.gelymar.com/es/goma-tara/>
- Hamburg, G. (s.f.). Ingeniería de procesos térmicos - Absorción y adsorción: Gunt Hamburg. (pp.21)
- He, J. (2013). BIONANOCOMPOSITES FOR WATER TREATMENT OF ARSENIC/GENTAMICIN CONTAMINATED WATER OR MEDICINE USE: Dart-europe. Tesis para optar el Título de Electrónico. Recuperado de: <http://www.theses.fr/2013GRENU034/document>
- Instituto Nacional de Calidad. (2018). Normas Metrológicas Peruanas. Recuperado de <https://www.inacal.gob.pe/metrologia/categoria/normasmetrologicas>
- Instituto Nacional de Cáncer. (2018). Diccionario del Cáncer. Recuperado de <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/queratosis-actinica>
- Jacinto Valderrama, Judith; Barraza Jauregui, G. D. C. (2006). Efecto del pH y Concentración de Goma de Tara (*Caesalpinia spinosa*) sobre la Clarificación del Jugo de Caña (*Saccharum officinarum*). Pueblo Continente. Vol. 17, Páginas 27-34. Recuperado de <http://journal.upao.edu.pe/PuebloContinente/article/viewFile/633/594>
- Jiaping, P. . (2012). Decontamination of Heavy Metals: Processes, Mechanisms, and Applications' CRC Press, Print ISBN: 978-1-4398- 1667-7. New York: CRC Press.
- Khan, Ibrahim; Khan, Idrees; Saeed, K. (2017). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. Arabian Journal of Chemistry. (Informe) Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535217300990>
- Long, Jie., Xiaoqin Yu., Enbo Xu., Wu, Zhengzong., Xu, Xueming., Jin, Zhengyu., Jiao, A. (2015). In situ synthesis of new magnetite chitosan/carrageenan nanocomposites by electrostatic interactions for protein delivery applications. Editorial: ELSERVIER.
- Marisela Rincón, Gisela Páez, Edixon Guitierrez, Z. M. (2012). Quitina y Quitosano, polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. página 53-55. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/235431334_Quitina_y_Quitosano_polimeros_amigables_Una_revision_de_sus_aplicaciones
- MASAC. (2016). Semilla de tara peruana. Recuperado de <http://molinosasociados.com/category/productos/?slug=texturizantes>
- Meacon Corporation, M. (2018). Sin Título. Recuperado de <https://www.meacon.com/>
- Ministerio de Energía y Minas (2017). Anuario Minero 2017. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/>

- National Institute of Standards and Technology. (2018). Galactose. Recuperado de <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=26566-61-0>
- Norma Salas de la Torre, C. Córdova C., Laura Lengua C., D. B. G. (2008). CARACTERIZACIÓN DE κ -CARRAGENANO Y λ -CARRAGENANO OBTENIDOS A PARTIR DE MACROALGA CHONDRACANTHUS CHAMISSOI Y SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. Rev. Per. Quím. Ing. Quím UNMSM.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (s.f.). IDENTIFICACION Y VALORACION DE IMPACTOS. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/V9727S/v9727s0a.htm>
- Olaeta, I. (s.f.). Fullerenos ¿qué son y para qué sirven? Recuperado de <https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/2009/09/04/fullerenos-que-son-y-para-que-sirven/>
- Organización Mundial de la Salud (2016). Arsénico: World Health Organization. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/>
- Ortiz Cruz, V. (2009). Comparación de dos métodos para la determinación de arsénico en agua de los pozos de la costa agrícola de Caborca, Sonora. (pp. 4, 5)
- Oyola Martínez, R. (2014). Titulación Potenciométrica. (PP. 1-4). Humacao.
- Peña, A. (2004). Bioquímica. (Libro) Editorial Limusa S.A.
- Peruvian tara s.a.c. (2017). EXPORTACIONES DE GOMA DE TARA. Recuperado de <http://peruviantaraexportacion.blogspot.com/2017/07/exportaciones-de-goma-de-tara-2017.html>
- Picasso Gino, Vega Jaime, Uzuriaga Rosario, R. G. P. (2012). Preparación de nanopartículas de magnetita por los métodos sol-gel y precipitación: estudio de la composición química y estructura. Revista de La Sociedad Química Del Perú, 78(3), 170–182. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2012000300003
- Piqué, Teresa M.; Vásquez, A. (2012). Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el Estudio de la Hidratación del Cemento.
- Ponce Álvarez, S. P. (1999). Catalizadores del tipo perovskita para la oxidación de CO y gas natural. Tesis, (pp. 75)
- Ponce Álvarez, S. P. (2015). Incremento del valor agregado de la goma de Tara (Caesalpinia spinosa, Molina Kuntze) como base para la fabricación de adsorbentes avanzados para la remoción de arsénico en aguas procedentes de la industria minera. (pp. 1-10) En base al Proyecto 127-PNICP-PIAP-2015.

- Prieto Colorado, Á. C. (2013). Síntesis y Caracterización: Estructural de los Materiales: Universidad de Valladolid. (Informe, páginas 19-22) Recuperado de <http://www4.uva.es/goya/Intranet/Pages/programas/sintesis/2012-2013/tema7.pdf>
- SGS. (2018). Materias primas para la industria Química. Recuperado de <https://www.sgs.pe/es-es/chemical/chemical-feedstocks-services/monomers>
- SIICEX. (2017). TARA. Recuperado de <http://www.siicex.gob.pe/siicex/resources/fichaproducto/tara.pdf>
- Singh, Rachana; Singh, Samiksha; Parihar, Parul; Singh, Vijay Pratap; MohanPrasad, S. (2014). Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review: Recuperado de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651314004746
- University of Nebraska Lincoln. (s.f.). Physics 927: Magnetic properties of materials. Nebraska.
- Vásquez, G., & Beltrán, R. (2004). Pruebas normalizadas para la evaluación de la biodegradabilidad de sustancias químicas. Una Revisión. *Interciencia*, Vol.29 N°10
- Xiaojuan Liang, Haowei Shi, Xiangchen Jia, Yuxiang Yang, X. L. (2012). *Materials Sciences and Applications*
- Zhengzhou Keda Machinery and Instrument Equipment Co., L. (2018). Sin Título. Recuperado de <http://kdinstrument.com/products/Big-Capacity-50Liter-Glass-Reactors.html>

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2005). Resúmenes de Salud Pública - Arsénico (Arsenic). Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html
- Bureau Veritas. (n.d.). Certificación ISO 14001: Sistemas de Gestión Ambiental: Bureau Veritas Argentina. Recuperado de http://www.bureauveritas.com.ar/services+sheet/iso_14001-sistema_de_gestion_ambiental
- Crittenden, John C.; Trussell, Rhodes R.; Hand, David W.; Howe, Kerry J.; Tchobanoglous, G. (2016). Principios de tratamiento del agua. In Principios de tratamiento del agua (pp. 450–562). Impresos Vacha S.A.
- Díaz Cartagena, W. (1999). Minería, Petróleo y Medio Ambiente. In Minería, Petróleo y Medio Ambiente (pp. 68–115). Lima: E.T. Comunicaciones S.A.
- Dinesh Mohan, C. U. P. J. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review (pp. 30-31, 34)
- Ferreira, Hélio; García Praca Leite, M. (2015). A Life Cycle Assessment study of iron ore mining:. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615007611>
- Instituto Geológico y Minero de España. (2004). Estudio y modelización geoquímica de las aguas ácidas del lago minero de la corta Aznalcóllar. Madrid.
- Reinsel, M. (2015). Arsenic Removal Technologies: A Review. (Reseña virtual) Recuperado de <https://www.wateronline.com/doc/arsenic-removal-technologies-a-review-0001>
- Vega de Kuyper, J. C. (1999). Manejo de Residuos de la Industria Química y Afin. In Manejo de Residuos de la Industria Química y Afin (pp. 65–83).



ANEXOS

Anexo 1: Glosario de términos

Biocompósito: Son nanocompuestos sólidos multifásicos, que cuentan con una o más fases de dimensión a nanoescala y al menos posee un componente orgánico (Bose, 2017).

Biota: Conjunto de flora y fauna de una región.

Carragenano: Son polisacáridos complejos, también denominados ficocoloides, obtenidos de las algas rojas, formados por derivados de galactosa. Son elementos solubles a temperaturas calientes se mantienen en disolución en temperaturas altas. Estas algas marinas se caracterizan por su riqueza en oligoelementos, proteínas, vitaminas, iodo, fósforo, potasio, entre otros (Norma Salas de la Torre, C. Córdova C., Laura Lengua C., 2008).

Dimetilarsinato: Esta especie del arsénico ocurre debido al proceso de metilación. Este mecanismo consta de dos etapas fundamentales:

- Reacciones de reducción para convertir el As^{5+} a As^{3+} .
- Reacciones de metilación oxidativa que transforman el As^{3+} en un compuesto orgánico metilado.

La metilación del arsénico requiere una reducción de As^{5+} a As^{3+} , enseguida la adición del primer grupo metilo para obtener ácido monometil arsónico (MMA), esta es seguida por una segunda metilación en la que se obtiene ácido dimetil arsónico (DMA) (Ortiz Cruz, 2009).

Fulerenos: También denominado fullereno. Es una molécula compuesta por carbono que puede adoptar una forma geométrica, tal como una esfera, un elipsoide, un anillo o un tubo. Es un material obtenido por interacción de átomos de carbono C_{60} en fase gaseosa, lo cual logra que los átomos de carbono se unan en hexágonos y con dobles enlaces resonantes entre átomos de carbono vecinos (Olaeta, s.f.).

Galactosa: Es un monosacárido formado por 6 átomos de carbono y forma parte del grupo de los azúcares o glúcidos más sencillos; es decir, que ya no se puede descomponer en otro compuesto más simple (National Institute of Standards and Technology, 2018).

Monómeros: Son moléculas que se encuentran unidas entre sí por medio de enlaces químicos, el termino monómero se refiere frecuentemente a moléculas orgánicas que forman polímeros sintéticos (SGS, 2018).

Polisacárido: Son moléculas formadas por unión de macromoléculas monosacáridas, unidos por enlaces glucosídicos. Existen dos tipos de polisacáridos, los homopolisacáridos formados por monosacáridos iguales de origen animal o vegetal y los heteropolisacáridos que son polímeros formados por monosacáridos diferentes (Peña, 2004).

Quantum dots: Su traducción al español es “puntos cuánticos”. Los puntos cuánticos son partículas diminutas o nanocristales de un material semiconductor, que presentan propiedades electrónicas únicas, intermedias entre las de los semiconductores en bloque y las moléculas discretas. El resultado más evidente de esto es la fluorescencia, donde los nanocristales pueden producir colores distintivos determinados por el tamaño de las partículas.

Quitosano: También denominado chitosán, es un polisacárido lineal de alto peso molecular compuesto por cadenas de β -(1-4) D-glucosamina (unidades deacetiladas) y N-acetil-D-glucosamina (unidad acetilada). Se obtiene por la desacetilación parcial de quitina, la cual es polisacárido muy abundante en la naturaleza, principalmente en crustáceos, insectos y hongos (Marisela Rincón, Gisela Páez, Edixon Guitierrez, 2012).

Queratosis: Escamosidad en la piel que se puede convertir en cáncer. Habitualmente se forma en áreas expuestas al sol, como la cara, el cuero cabelludo, las manos o el pecho. Es más común en personas con piel de color claro (Instituto Nacional de Cáncer, 2018).