



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DESARROLLO DE UN FILTRO DE HUESO ANORGÁNICO DE BOVINO PARA LA ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA TRATADA DEL SECTOR DE TOACASO-COTOPAXI

CARLOS FABIÁN ORBEA HINOJOSA

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA APLICADA

Riobamba-Ecuador

Marzo 2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado “DESARROLLO DE UN FILTRO DE HUESO ANORGÁNICO DE BOVINO PARA LA ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA TRATADA DEL SECTOR DE TOACASO-COTOPAXI”, de responsabilidad del Sr. Carlos Fabián Orbea Hinojosa, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

	Tribunal:	Luis Eduardo Hidalgo Almeida
Ing. Luis Hidalgo Almeida, PhD.		
PRESIDENTE		FIRMA
Quim. Patricio Espinoza Montero, PhD.		
DIRECTOR		FIRMA
Dr. Jorge Silva Yumi, PhD.		JORGE EFREN SILVA YUMI
MIEMBRO		FIRMA
Ing. Nelly Flores Tapia, PhD.		NELLY ESTHER FLORES TAPIA
MIEMBRO		FIRMA

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Carlos Fabián Orbea Hinojosa, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el Trabajo de Titulación Modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



escaneado el código QR por:
CARLOS FABIAN
ORBEA HINOJOSA

Carlos Fabián Orbea Hinojosa

No. cédula 0502417

DEDICATORIA

Éste trabajo de investigación le dedico a mi hermano Job Noé (+) que me enseñó, impulsó e inspiró a que los sacrificios llevan a alcanzar metas.

Gracias ñaño.

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento a mis padres. Que se sacrifican por mantener el bienestar de la familia.

Al contingente de personas que colaboraron al desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

A todos, mi eterna gratitud.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	vi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema de Investigación.....	3
1.1.1 Situación Problemática	3
1.1.2 Formulación del problema.....	5
1.1.3 Preguntas directrices.....	5
1.2 Justificación de la investigación.	5
1.2.1 Justificación Teórica.....	5
1.2.2 Justificación Práctica	6
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Hipótesis	8
CAPÍTULO II.....	9
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Bases Teóricas.....	11
2.1.1 Procesos de remoción de arsénico en aguas contaminadas	11
2.1.2 Adsorción.....	12
2.1.3 Isotermas de adsorción de Freundlich	13
2.1.4 Isotermas de adsorción de Langmuir	14
2.1.5 Remoción de Arsénico por Adsorción.....	15
2.1.6 Hidroxiapatita	17

2.2.1	Filtración.....	18
2.2.2	Características del lecho filtrante.....	19
2.2.3	Características de la operación	19
2.2.4	Características del afluente	20
2.2.5	Tipos de filtros.....	20
2.2.6	Según la dirección de flujo	20
2.2.7	Según su velocidad de filtración.....	21
2.2.8	Según la fuerza impulsora	21
2.2.9	Según los mecanismos de remoción predominantes.....	21
2.2.10	Según el tipo de lecho filtrante	22
CAPÍTULO III.....		23
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
3.1	Diseño de la Investigación.....	23
3.2	Tipo de investigación.....	23
3.3	Métodos y técnicas de investigación.....	23
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos primarios y secundarios	24
3.4.1	Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios.....	24
3.4.2	Instrumentos para recolección de datos primarios y secundarios	24
3.4.3	Tamaño de la muestra.....	25
3.5	Planteamiento de la hipótesis.....	25
3.6	Identificación de variables	25
3.6.1.	Variables independientes	25
3.6.2.	Variables dependientes	25
3.7	Procedimiento experimental	26
3.7.1	Elaboración de secciones de la diáfisis libre de grasa y tejido.	26
3.7.2	Molienda de las secciones de diáfisis libres de grasa y tejidos.....	26
3.7.3	Tamizado del polvo de diáfisis	27
3.7.4	Calcinación de las partículas retenidas en la malla # 150. 65 micras.	28

3.7.5	Adsorción de arsénico contenido en el agua tratada a escala de laboratorio.	28
3.7.6	Medición de la concentración de arsénico en agua tratada de Toacaso.....	29
3.7.7	Caracterización del hueso anorgánico.	30
3.7.8	Diseño y construcción del filtro captador de arsénico.	32
3.7.9	Capacidad de adsorción.	34
CAPÍTULO IV.....		36
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1	Obtención de hueso anorgánico.	36
4.2	Experimentación realizada en laboratorio	39
4.2.1	Resultados de la medida de concentración de arsénico.	39
4.2.2	Selección de la muestra con la más alta concentración de arsénico en Toacaso.	39
4.2.3	Selección del tratamiento más eficiente de adsorción.	42
4.2.4	Tiempo de equilibrio bajo condiciones de agitación en orbital shaker.....	43
4.3	Isotermas de adsorción.....	44
4.3.1	Isoterma de Freundlich para la adsorción de arsénico sobre hueso anorgánico en agitación de orbital shaker.....	45
4.3.2	Isoterma de Langmuir para la adsorción de arsénico sobre hueso anorgánico en agitación de orbital shaker.....	46
4.4	Experimentación realizada en el filtro	46
4.4.1	Medición de arsénico en agua tratada que atraviesa el filtro, empleando la muestra de hueso anorgánico del tratamiento BT.Y.t ₂	46
4.5	Tiempo de equilibrio.....	47
4.5.1	Para pruebas en el agua que atraviesa el filtro.....	47
4.6	Caracterización del hueso anorgánico.	49
4.6.1	Microscopía SEM-EDS	50
4.6.2	Difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés).....	51
4.6.3	Espectroscopía Infrarrojo. FT-IR.....	53
4.7	Análisis estadístico	53
4.7.1	Prueba de Wilcoxon.....	55

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA.....57

CONCLUSIONES 59

RECOMENDACIONES 60

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-4.	Datos del muestreo de agua en 5 distintos puntos de la Parroquia Toacaso.....	40
Tabla 2-4.	Tratamientos que determinan el más eficiente en adsorción de arsénico	42
Tabla 3-4.	VARIABLES aplicadas en los tratamientos	43
Tabla 4-4.	Concentración de arsénico en el agua empleando el filtro.....	47
Tabla 5-4.	Análisis de la composición del hueso anorgánico por SEM-EDS	51
Tabla 6-4.	Anova general de los resultados para análisis en reactor Batch	54
Tabla 7-4.	ANOVA para los tratamientos del hueso anorgánico obtenido a 450°C.....	54
Tabla 8-4.	ANOVA para los tratamientos del hueso anorgánico obtenido a 600°C.....	54
Tabla 9-4.	ANOVA para los tratamientos del hueso anorgánico obtenido a 750 °C.....	55
Tabla 10-4.	Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon.....	55
Tabla 11-4.	Estadísticos de prueba.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2.	Isoterma de Langmuir.....	14
Figura 1-3.	Circuito para la automatización del filtro para proveer de agua al hogar.....	33
Figura 1-4.	Secciones de diálisis bovina sin tejidos.....	36
Figura 2-4.	Desprendimiento de tejidos y grasa a través de hervido.....	37
Figura 3-4.	Secado de diálisis en estufa a 98°C.....	37
Figura 4-4.	Diálisis secas y sin tejidos.....	38
Figura 5-4.	Puntos de muestreo para análisis de arsénico en agua de Toacaso.....	41
Figura 6-4.	Tiempo de equilibrio con agitación en orbital shaker	43
Figura 7-4.	Tiempo de equilibrio y capacidad de adsorción en orbital shaker.....	44
Figura 8-4.	Curva de equilibrio de la adsorción a escala de laboratorio	45
Figura 9-4.	Isoterma de Freundlich de la adsorción de arsénico sobre el	45
	hueso anorgánico.....	45
Figura 10-4.	Isoterma de Langmuir de la adsorción de arsénico sobre el	46
	hueso anorgánico.....	46
Figura 11-4.	Tiempo de equilibrio de la adsorción del tratamiento BT.Y.t ₂ , en el filtro.....	48
Figura 12-4.	Tiempo de equilibrio y capacidad de adsorción del tratamiento	49
	en el filtro	49
Figura 13-4.	Microscopía SEM de hueso anorgánico. Con aumentos (a) 267X; (b) 533X; (c) 1,03KX y (d) 107KX.....	50
Figura 14-4.	Difractograma de rayos X del hueso anorgánico del tratamiento BT.Y.t ₂	52
Figura 15-4.	Espectro FT-IR del hueso anorgánico del tratamiento BT.Y.t ₂	53

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Espectrofotómetros de Absorción Atómica

ANEXO B. Agitador mecánico del tipo orbital shaker

ANEXO C. Espectrómetro de infrarrojo con transformada de Fourier FTIR

ANEXO D. Microscopio SEM-EDS

ANEXO E. Difractómetro de Rayos X DRX

ANEXO F. Molinos trituradores

ANEXO G. Serie de tamices de mallas #250, #150 y #80

ANEXO H. Mufla para calcinación

ANEXO I. Aspecto del hueso anorgánico luego de la calcinación

ANEXO J. Datos experimentales de modelos isotérmicos de equilibrio.

ANEXO K. Implementación del filtro en un hogar de Toacaso

ABREVIATURAS

HA	Hidroxiapatita
Hae	Hidroxiapatita no estequiométrica
FTIR	Espectrometría de infrarrojo con Transformada de Fourier
XRD	Difracción de rayos X.
SEM	Microscopía electrónica de barrido
SAA	Espectrofotómetro de absorción atómica
q_e	Cantidad de soluto adsorbido por gramo de adsorbente en equilibrio, ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).
$Q_{\text{máx}}$	Cantidad de adsorbato a completar la cobertura de monocapa, ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).
K	Constante que indica la afinidad del adsorbente por el adsorbato, ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$).
Ce	Concentración del adsorbato en disolución, ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue desarrollar un filtro de hueso anorgánico de bovino, como adsorbente, para remover arsénico del agua tratada de Toacaso-Ecuador. Empleándose diáfisis bovina seca y sin tejidos, molido y tamizado el material. Las partículas de 63 micras se calcinaron a: 450 °C, 600 °C y 750 °C. Se evaluó la adsorción en muestras de 50 mL de agua tomada de la red pública (concentración de arsénico = 0,306 mg·L⁻¹) en un reactor tipo Batch bajo agitación mecánica a tres tiempos diferentes (10, 20, 30 min) y tres distintas masas (0,1; 0,2; 0,3 g) de hueso anorgánico calcinado. La muestra de hueso con mayor adsorción se caracterizó mediante espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier, difracción de rayos X y microscopía electrónico de barrido. La cuantificación de arsénico se realizó por espectrofotometría de absorción atómica. La muestra calcinada a 600 °C empleando 0,2 g por 20 min de agitación a 150 rpm arrojó los mejores resultados. Se construyó e instaló en un hogar un filtro cilíndrico con capacidad depuradora de 10 L· día⁻¹, conteniendo el material de mayor capacidad de adsorción. Removiendo el 67,97 % de arsénico, siendo insuficiente y que evidencia la necesidad de disponer de un filtro con contenido de hueso anorgánico obtenido a otras temperaturas de calcinación.

Palabras clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <ARSÉNICO (As)>, <BOVINO>, <HUESO ANORGÁNICO>, <ADSORCIÓN>, <FILTRO>, <CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO>, <CARACTERIZACIÓN>.



Elaborado e insertado automáticamente por
LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS



0026-DBRAI-UPT-IPEC-2021

ABSTRACT

The objective of the present research was to develop an inorganic bovine bone filter, as an adsorbent, to remove arsenic from the treated water of Toacaso-Ecuador. Using bovine diaphysis dry and without fabrics, ground and sieved the material. The 63-micron particles were calcined at 450 ° C, 600 ° C and 750 ° C. The adsorption was evaluated in samples of 50 mL of water taken from the public network (arsenic concentration = 0,306 mg · L⁻¹) in a Batch type reactor under mechanical agitation at three different times (10, 20, 30 min) and three different masses (0,1; 0,2; 0,3 g) of inorganic bone calcined. The bone sample with the highest adsorption was characterized by Fourier transform infrared spectrometry, X-ray diffraction and scanning electron microscopy. Arsenic quantification was performed by atomic absorption spectrophotometry. The sample calcined at 600 ° C using 0,2 g for 20 min of stirring at 150 rpm gave the best results. A cylindrical filter with a purification capacity of 10 L · day⁻¹ was built and installed in a home, containing the material with the highest adsorption capacity. With the removing of 67,97% of arsenic, it was insufficient and evidencing the need to get a filter with inorganic bone content obtained at another calcination temperatures.

Keywords: <CHEMICAL TECHNOLOGY AND ENGINEERING>, <ARSENIC (As) >, <BOVINO>, <ANORGANIC BONE>, <ADSORPTION>, <FILTER>, <ARSENIC CONCENTRATION>, <CHARACTERIZATION>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Actividades industriales, agropecuarias o mineras, la tecnología, el uso de fertilizantes ocasionan que se deposite metales pesados en el suelo que terminan incorporándose en aguas de ríos, posteriormente sean captados por vegetales, alimentos y animales, provocando potenciales riesgos en la naturaleza que originan en riesgos a la salud humana y animal. (Londoño, Londoño y Muñoz, 2016). Actualmente, las empresas comercializadoras de agua potable se encuentran en un grave dilema al encontrar más demanda por el líquido vital y por otro lado el aumento de la contaminación del recurso (Minaverry y Cáceres, 2016).

Moreno y Ramos (2018) indican. “La contaminación del agua con metales pesados es un problema potencial de salud pública, debido a su toxicidad” (p 51). El aumento de las actividades humanas ha modificado el ciclo global de los metales pesados, los no metales y metaloides. Los contaminantes del orden metálico son muy perjudiciales para la salud de seres vivos y su presencia se vale de determinaciones analíticas instrumentales. Un ejemplo de esto es el metaloide ubicuo arsénico que no es un contaminante emergente, porque se conoce su conducta como tal, y se lo mide por absorción atómica. El arsénico puede ser removido efectivamente del agua por varios métodos para mejorar la calidad de vida de las personas. Chávez y Miglio (2011) manifiestan. “El consumo frecuente de agua contaminada con arsénico podría producir cáncer a la vejiga, pulmón, piel, riñón, hígado y próstata” (p 308).

Uno de los retos ambientales que se prioriza mundialmente es la reducción de la concentración de arsénico en el agua de consumo humano. Entre otras opciones convencionales, se plantea realizar la adsorción sobre hueso anorgánico. Esta experimentación cumple las características de ser amigable con el ambiente, sustentable y económica. Los tratamientos de agua terciario tienen como propósito específico reducir la concentración de arsénico en agua de consumo humano que previamente ha sido tratada. El análisis del mineral con espectrometría infrarroja FTIR que corrobora la ausencia de materia orgánica, la difracción de rayos X que evidencia la funcionalidad química del componente del hueso anorgánico a través de los grupos funcionales propios del

mineral y la microscopía electrónica de Barrido (SEM) para visualizar el relieve de las partículas del mineral permiten la caracterización del mineral.

Una evaluación de las isothermas de Freundlich y Langmuir es de gran importancia para conocer la capacidad adsorbente de arsénico por parte del hueso anorgánico. Con espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros se permite medir la concentración de arsénico en el agua antes y después de la reacción de adsorción entre el arsénico como adsorbato en el agua tratada y el adsorbente es el hueso anorgánico, reacción realizada en reactor Batch. Considerando que la HA es el mayor constituyente inorgánico de los huesos, se aprovecha la alta disponibilidad del material óseo para su obtención. El análisis elemental comparativo permite el análisis de su obtención o no.

La Hidroxiapatita denotada con las siglas HA para esta investigación, también puede ser sintética por reacción estequiometria con sus precursores, sin embargo, la HA proveniente de la calcinación ósea presenta menor superficie de contacto y por aquello menor degradación.

En nuestra región no existen estudios experimentales en los que se hayan empleado algún método que determinen el beneficio de la reducción de la concentración de arsénico en el agua de consumo humano empleando desperdicios óseos de bovinos como material de partida, tampoco ha existido intenciones de emplear filtros adsorbentes; precedente que justifica este estudio.

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Situación Problemática

Según el reporte de la Organización Mundial de la Salud en el 2018:

El consumo excesivo de agua tratada contaminada con arsénico, llamadas aguas arsenicales, se ha convertido en un problema catalogado como atentado a la salud de la humanidad y con calidad de preocupación global. La exposición prolongada al arsénico a través del consumo de agua y alimentos contaminados puede causar cáncer y lesiones cutáneas. Asociado también a problemas de desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes. El arsénico está presente de forma natural en altas concentraciones en las aguas subterráneas, es muy tóxico en la forma inorgánica, la mayor amenaza para la salud pública reside en la utilización de agua contaminada para beber, preparar alimentos y regar cultivos alimentarios. En 2010, el Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios reevaluó los efectos del arsénico en la salud humana, una de sus conclusiones fue que en el caso de algunas regiones del mundo donde las concentraciones de arsénico inorgánico en el agua de bebida superan los 50-100 $\mu\text{g} \cdot \text{litro}^{-1}$ hay cierta evidencia de efectos adversos, pero en otras regiones, donde las concentraciones están entre 10 a 50 $\mu\text{g} \cdot \text{litro}^{-1}$, existe el riesgo de efectos adversos pero presentarían niveles de incidencia bajos, que serían difíciles de detectar dentro de un estudio epidemiológico. (Organización Mundial de la Salud, 2018)

Al menos 4 millones de residentes de Argentina, Chile, México, El Salvador, Nicaragua, Perú y Bolivia están expuestos a concentraciones peligrosas del mismo. Los factores geológicos naturales son los responsables de la mayoría de la contaminación de arsénico en Latinoamérica. Las industrias de minería y refinación de minerales son responsables de gran parte del problema en Chile, Bolivia y Perú. En Brasil, los procesos electrolíticos en la producción de metal contribuyen al problema. Una fuente pequeña son los pesticidas en México. Aunque por lo general, la mayoría del arsénico en el agua superficial y subterránea de América Latina proviene de minerales producidos por vulcanismo Terciario y Cuaternario de las Montañas de los Andes. (Organización Mundial de la Salud, 2018)

Medina, Robles, Mendoza y Torres (2018) afirman que en Ecuador se han detectado niveles elevados no solo en pescado, sino también en leche de vaca, granos y hortalizas, incluidas la papa, cebolla, remolacha, calabaza, rábano, col y frijoles. La cerveza y el vino también contribuyen a la ingesta de arsénico en la dieta. (Medina *et al.*, 2018)

La región interandina de Sudamérica ha sido objeto de estudio para analizar la problemática con respecto a la presencia de Arsénico. Bundschuh, Pérez y Litter (2008) afirman que “en el área de estudio comprendida entre paralelos 1°11’ N y 1°30’S, que incluye cinco provincias: El Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua, cubriendo una superficie de 31.477 km² (...), así se encontró en la provincia de Cotopaxi concentraciones de 4 a 45 ppb de arsénico en fuentes de aguas geotermiales”. (Bundschuh *et al.*, 2008).

En la ciudad de Latacunga se ha realizado análisis de aguas de manantiales, Cumbal, Vallejo, Rodríguez y López (2010) manifiestan que el agua embotellada San Felipe en esta ciudad aledaña a la parroquia Toacaso, presenta una concentración sobre la Norma ecuatoriana, esto es de 10 ppb. (Cumbal *et al.*, 2010).

Diario La Hora de Latacunga afirma que “en total son 20 mil habitantes que consumen el agua proveniente de 15 fuentes que llegan desde los Ilinizas y una de estas tiene 20 veces más arsénico de lo permitido por las normas internacionales” (...) (La Hora, 2018, p.12).

Según Pincha, G (2014), la parroquia Toacaso está ubicada en la parte noroccidental del cantón Latacunga en las faldas de los Ilinizas con una población de más de 8000 habitantes en una extensión de 21,32 km² Actualmente existe cierta preocupación del gobierno parroquial en cuanto al agua de consumo humano ya que la cobertura del servicio de agua potable es deficiente y el agua que consume la población es solamente agua entubada que se conduce por medio de una infraestructura en mal estado y a la que no se le da mantenimiento, además la parroquia cuenta con 75 concesionarios de uso doméstico con un caudal de 57,94 litros por segundo, de diferentes vertientes legalmente registradas.

SENAGUAS, en el 2018 reporta que se ha entregado un Kit para análisis de arsénico a la GAD de Toacaso, para que se realicen los análisis de arsénico en las aguas de consumo y ya en marzo del 2019 Olmedo Iza, coordinador Zonal de Senagua, informó sobre la posible

presencia de arsénico en el agua para el consumo humano en las parroquias de Toacaso, Tanicuchí, Guaytacama y Pastocalle pero, luego de realizar diagnósticos y a través de consultorías privadas se ha determinado que existe dicho elemento contaminante en las aguas de Toacaso. Esto podría generar enfermedades como cáncer de estómago porque por mucho tiempo la población ha consumido agua entubada (...). (La Gaceta, 2018, p.7, SENAGUAS, 2019, El Comercio, 2019).

1.1.2 *Formulación del problema*

En la parroquia Toacaso – Ecuador el agua de consumo humano presenta concentraciones inadecuadas de arsénico debido a que los métodos convencionales de potabilización no han retenido el metaloide, y no se han planteado alternativas para su reducción o eliminación del agua tratada.

1.1.3 *Preguntas directrices*

¿Cómo se relacionan las características del hueso anorgánico con su capacidad de adsorber arsénico de agua tratada?

¿Qué modelo isotérmico le corresponde a la adsorción de arsénico del agua tratada, sobre hueso anorgánico producida por tratamiento de hueso bovino?

¿Cómo influye el diseño de un filtro que contiene hueso anorgánico y que es instalado en un hogar de la parroquia Toacaso, en la reducción de la concentración de arsénico

1.2 *Justificación de la investigación.*

1.2.1 *Justificación Teórica*

Londoño., *et al* (2016) aseguran que, el desarrollo de las sociedades actuales ha propiciado el aumento exagerado de metales pesados: mercurio, plomo, arsénico, cadmio, cobre, cromo, esto a cuenta de la industrialización (Londoño *et al.*, 2016). Mendoza *et al.*, (2017) aseguran que, la exposición humana y ambiental a metales pesados y metaloides puede tener causas naturales como la erosión de suelos ricos en estos elementos y su transportación a los cuerpos de agua o causas antropomórficas como la generación eléctrica, los residuos sólidos de procesos industriales, las baterías no recicladas, los

materiales de la industria de la fundición y la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en agricultura (Mendoza *et al.*, 2017).

Los métodos convencionales utilizados para eliminar el arsénico de las soluciones acuosas son: precipitación, coagulación-filtración, ósmosis inversa, intercambio iónico y la adsorción. De estos, la adsorción es eficiente y económica, con lo que viene a ser una técnica prometedora. De las cuales esta investigación quiere hacer hincapié en el proceso de adsorción (Rodríguez, *et al* 2017).

La gran accesibilidad de materiales óseos como desperdicios que se mantienen en el ambiente, permiten que se los considere como materias primas útiles y con rentabilidad para propósitos que se permiten indicar en esta investigación. El alto contenido de HA se puede aprovechar ya que este mineral tiene componentes químicos que le permiten reducir iones metálicos liberados.

1.2.2 Justificación Práctica

Existen lugares en donde la única fuente de agua para consumo humano contiene arsénico, por lo que es importante analizar mecanismos descontaminantes, evaluando la eficiencia y buscando identificar los factores que benefician la remoción de arsénico del agua (Franco y Carro, 2014). Los compuestos de arsénico trivalentes más tóxicos que los pentavalentes en formas inorgánicas más tóxicas que las orgánicas, se encuentran ampliamente distribuidos en el medio ambiente (Medina *et al.*, 2018).

En Ecuador existen múltiples estudios sobre las concentraciones de Arsénico en distintos tipos de aguas, sin embargo, no existen estudios prácticos y ejecutados que permitan su remoción parcial o total. Por aquello, este estudio representa una alternativa amigable para remoción de arsénico, debido a su descomplicada, económica y de fácil uso para la población de Toacaso. A través del diseño de un filtro se prueba la capacidad de adsorción dentro de él para eliminar el arsénico con una alta reactividad bajo condiciones naturales con bajos consumos de energía y de fácil remoción del adsorbente y fácil mantenimiento.

Al ser un proyecto de carácter preventivo familiar-domiciliar en una zona rural que busca solucionar problemas de afectación a la salud a futuro, se ha considerado factores como:

- ✓ Fácil manejo donde el usuario no requiera conocimientos técnicos avanzados ni armar estructuras complejas.
- ✓ Evitar usar reactivos químicos que puedan exponer a los miembros de la familia en especial a niños.
- ✓ Que el propio usuario maneje sin procedimientos técnicos complejos ni costosos de operación, mantenimiento y reparación.
- ✓ Robustez para que el funcionamiento y eficiencia no se vea afectado por cambios que existan durante la operación.
- ✓ Cantidad de agua que proporcione a los usuarios del hogar, pero en tiempos cortos tanto de preparar el agua antes verterla al filtro, como de espera para obtener el agua tratada.
- ✓ Poca o nula afectación al ambiente sin tener que generar residuos que se desechen.

Siguiendo las condiciones del proceso metodológico en esta investigación se deja sentadas las bases teóricas para el estudio y desarrollo de filtros que permitan evaluar las variables que inciden en el adsorbente: tipo y origen, tiempo de contacto con el adsorbato, las concentraciones de arsénico en agua tratada y las condiciones de regeneración o sustitución del adsorbente bajo procesos de ensuciamiento o envenenamiento que lo afectan.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un filtro de hueso anorgánico (73% Hidroxiapatita) para la adsorción de arsénico presente en aguas de fuentes naturales en la Parroquia Toacaso- Cotopaxi.

1.3.2 Objetivos específicos

El objetivo general se cumplirá al cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Obtener el hueso anorgánico de diátesis bovina, mediante procedimientos de calcinación-extracción, para emplearlo como captador del arsénico dentro de un filtro.
- Caracterizar el compuesto extraído por calcinación mediante FTIR, SEM y Rx para conocer su composición.

- Diseñar y construir el filtro a escala de laboratorio, probar la eficiencia de adsorción de arsénico con muestras sintéticas y muestras reales.
- Comparar el contenido de arsénico antes de la implementación del filtro de hueso anorgánico con el contenido de arsénico después de la implementación del filtro de hueso anorgánico.

1.4 Hipótesis

Con la implementación del filtro de hueso anorgánico proveniente de la diáfisis bovina, se adsorberá el arsénico presente en el agua tratada de la parroquia Toacaso-Cotopaxi.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

Mendoza *et al.*, (2017) aseguran que, la exposición humana y ambiental a metales pesados y metaloides puede tener causas naturales como la erosión de suelos ricos en estos elementos y su transportación a los cuerpos de agua o causas antropomórficas como la generación eléctrica, los residuos sólidos de procesos industriales, las baterías no recicladas, los materiales de la industria de la fundición y la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en agricultura (Mendoza *et al.*, 2017). Existen metales que son esenciales en la dieta humana, su deficiencia o exceso ocasionan problemas de salud. Otros en cambio no cumplen una función fisiológica conocida, alteran la salud y se los evita, como es el caso del arsénico (Londoño *et al.*, 2016).

La OMS (2018), dio a conocer que 1100 millones de personas carecen de acceso a agua tratada, y un número mayor, consume agua contaminada; cada año se registran cerca de 4 000 millones de casos de diarrea, el 88,0 % de estos se atribuyen al consumo de agua insalubre y a deficiencias de saneamiento e higiene (OMS, 2018).

El metaloide arsénico se encuentra presente en aguas de fuentes naturales en Toacaso-Ecuador, las concentraciones varían con la época desde 0,028 mg· L⁻¹ en el primer trimestre del año; 0,040 mg· L⁻¹ en el segundo trimestre del año; en el tercer trimestre del año llega a alcanzar 0,0636 mg· L⁻¹; hasta 0,108 mg· L⁻¹ en agosto, valores medidos en el transcurso de esta investigación. La contaminación por arsénico tiene origen natural y antropogénico, Escalera y Orchamea (2017) afirman que, a nivel mundial, la presencia de arsénico en aguas de consumo humano representa un problema de salud pública, debido a que su ingesta genera varios tipos de enfermedades (Escalera y Ormachea, 2017). Franco y Carro (2014) aseguran que el arsénico y sus compuestos son cancerígenos para los humanos y hay evidencia epidemiológica de alteraciones a la salud por el consumo prolongado de aguas arsenicales. Existen lugares donde la única fuente de agua para bebida contiene arsénico en solución, por lo tanto, es necesario estudiar mecanismos de remoción. (Franco y Carro, 2014). Por ser un elemento propio de la corteza terrestre, no se puede degradar ni destruir, su comportamiento químico define su biodisponibilidad y toxicidad (Bulgariu y Bulgariu, 2012).

Saha J.C, Saha K.C, Dikshit y Banduopadhyay (2010) aseguran que el arsénico es un elemento que plantea muchas preocupaciones al medio ambiente y a la salud humana, su presencia y movilidad en suelos, aguas subterráneas y aguas superficiales es un peligro para la salud pública (Saha *et al.*, 2010). Las rocas de la sucesión Cretácico Superior-Mioceno Medio constituyen un “almacén” de arsénico potencialmente movilizable a las aguas subterráneas (Sahún, Gómez, Lillo y del Olmo, 2004). Existe riesgo de que la población de Toacaso-Ecuador en edades de entre 1 a 60 años se enferme con arsenicosis por contaminación con arsénico, a través del consumo de agua o de los alimentos y se tendría que el porcentaje de población en riesgo es del 85,14 %.

A pesar de que los problemas ambientales de arsénico se deben a la movilización en condiciones naturales, las actividades mineras, la combustión de combustibles fósiles, el uso de pesticidas, herbicidas y aditivos de arsénico, desecantes de cultivos crean también impactos adicionales (Mohan y Pittman Jr, 2007). El arsénico existe en agua subterránea de pozos perforados o en agua contaminada con desechos industriales, así los alimentos quedan contaminados por el riego, incluyendo pesticidas o agroquímicos a base de arsénico, además que los cultivos se encuentran en estratos de tierra conteniendo arsénico. (Saha *et al.*, 2010).

El As es altamente tóxico, contaminando fuentes de agua para consumo, proviniendo principalmente de actividades antropogénicas o depósitos terrestres naturales (Ato, Quansah y Luginaah, 2014). Ma, Lei E, Lei M, Liu y Chen (2017) aseguran que el arsénico se retiene en la superficie del suelo y se transporta a capas más profundas con el drenaje de las minas o en el agua de irrigación y los coloides (Ma *et al.*, 2017). El agua con arsénico existe en el agua subterránea de fuentes naturales y genera un problema ambiental por su movilidad de forma natural en el suelo, aguas subterráneas y superficiales en Toacaso; de ahí que se reevalúa los efectos nocivos de la exposición humana al arsénico.

El arsénico (III) es un ácido duro y se compone de complejos con oxígeno y nitrógeno. A la inversa, el arsénico (V) se comporta como un ácido blando, formando complejos con sulfuros. Las formas inorgánicas de arsénico existen con mayor frecuencia en los suministros de agua. El arsénico es especialmente sensible a la movilización a Ph 6,5–8,5. Dos formas son comunes en las aguas naturales: arsenito (AsO_3^{3-}) y arsenato (AsO_4^{3-}), conocido como arsénico (III) y arsénico (V). (Mohan y Pittman, 2007).

Chutia, Kato, Toshinori y Satokawa (2009) aseguran que el arsénico (III) predomina en condiciones normales y es termodinámicamente más estable que el arsénico (V), el cual es menos tóxico, esto convierte al arsénico (III) en la causa de los principales contaminantes en las aguas subterráneas (Chutia *et al.*, 2009). Las especies pentavalentes predominan y son estables en ambientes aeróbicos ricos en oxígeno. Los arsenitos trivalentes predominan en aguas subterráneas de ambientes anaeróbicos (Mohan y Pittman Jr, 2007). El hombre puede entrar en contacto con arsénico al presentarse en forma de polvos, humos o neblinas (Saha *et al.*, 2010).

Putila y Lan (2011) afirman que la arsenicosis es una enfermedad crónica que resulta por beber agua con altas concentraciones de arsénico por largo tiempo (de 5 a 20 años). En las poblaciones que consumen agua con concentraciones en más de 1 parte por millón de arsénico, se incrementa la incidencia de cáncer al 25% del total de las enfermedades. Actualmente, más de 35 países en desarrollo consumen agua contaminada con arsénico (Putila y Lan, 2011). De acuerdo a la OMS y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés: Environmental Protection Ambiental), el límite permisible de As en agua de consumo es de $0,01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (OMS, 2018).

2.1. Bases Teóricas

2.1.1 *Procesos de remoción de arsénico en aguas contaminadas*

Amin *et al.*, (2006) afirman que en las aguas subterráneas y superficiales existen las formas inorgánicas predominantes Arsenito [As (III)] y Arseniato [As (V)]. La especie As (V) existe como oxianiones (H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-}) a Ph neutro, mientras que para As (III) la especie predominante es la especie neutra H_3AsO_3 (Amin *et al.*, 2006) manifiesta que existen variados procesos con sus tecnologías empleados para la remoción de arsénico del agua, pudiendo ir desde tratamientos en plantas potabilizadoras convencionales y métodos domiciliarios, hasta tecnologías in situ.

Al darse la contaminación por arsénico del agua para consumo, se debe proponer tomar acciones correctivas para reducir o eliminarla, por debajo de los límites que indica la Norma Técnica ecuatoriana NTE INEN 1108:2011 agua. Métodos tradicionales para descontaminar, tratan efluentes industriales con altas concentraciones de metales pesados, pero con desventajas de altos costos, grandes espacios de operación y generación de más sustancias tóxicas (Moreno y Ramos., 2018).

La eliminación de arsénico del agua, usando tecnologías rentables ha atraído una gran atención en los últimos 20 años (Roy *et al.*, 2013).

Para el ser humano, concentraciones bajas de arsénico (del orden de los $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), constituyen un riesgo para la salud. Por lo que, a través de la investigación se pretende dar una perspectiva general, acerca del fenómeno de adsorción usando hueso anorgánico, para retirar del agua de consumo la mayor cantidad posible de Arsénico. Por su alta toxicidad, la presencia de arsénico en el agua de consumo, es un riesgo a la salud pública. La Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), ubica al arsénico en el grupo 1, que son los promotores de cáncer para humanos. (IARC, 2016).

Los procesos actualizados son: oxidación, precipitación, coagulación y ablandamiento con cal, ósmosis inversa, micro filtración, nanofiltración, adsorción, tratamientos biológicos y fitorremediación, electrodiálisis y electrocinética, entre otros. (Sims *et al.*, 2015) (Litter *et al.*, 2010) (Franco & Carro, 2014). Roy, Kubar, Bhattacharya, Das B y Das K (2013) aseguran que de entre estas tecnologías, la adsorción es la más empleada, porque es muy simple, rentable y ecológica (Roy *et al.*, 2013).

Roy, Kumar, y Shreya (2013) aseguran que la eliminación de arsénico del agua, usando tecnologías rentables ha atraído una gran atención en los últimos 20 años (Roy *et al.*, 2013). Chutia, Kato, Kojima y Satokawa (2009) aseguran que un método para descontaminar arsénico debe ser: simple, de bajo costo, alta eficiencia, enfoque rural, basado en materiales locales y de fácil acceso (Chutia *et al.*, 2009).

2.1.2 Adsorción

Nam *et al.* Manifiestan. La adsorción es una técnica de tratamiento eficaz que se emplea para eliminar microcontaminantes. (Nam *et al.*, 2015). En este proceso de investigación es importante analizar la fisorción y quimisorción para concluir si ha ocurrido atracciones electrostáticas o formación de nuevos enlaces entre el arsénico total del agua de consumo y la superficie de la HA que es insoluble en el agua. En la adsorción de un sistema sólido-líquido, el soluto se acumula en la superficie del sólido adsorbente, esta superficie influye en la concentración de soluto presente en la solución, ya que ésta va disminuyendo. Por tanto, la velocidad de adsorción disminuye a medida que lo hace la diferencia de concentración entre ambas fases, mientras que la velocidad de desorción ira aumentando. (Asqui, 2018). En determinado las velocidades de adsorción y desorción se igualarán,

llegando al equilibrio de adsorción, un equilibrio dinámico, en donde el adsorbente no admitirá más acumulación de soluto. Este equilibrio es la cantidad de soluto adsorbido por masa de adsorbente (q_e), en función de la concentración de soluto en solución (C_e), las representaciones gráficas reciben el nombre de isotermas de adsorción, y se las realiza a temperatura constante (García, 2014).

Para determinar el mecanismo por el cual los iones orgánicos e inorgánicos se adsorben en la interface mineral/agua se hace una combinación de estudios de adsorción mediante isotermas de adsorción (Martínez, 2012). Asqui (2018) considera. “La isoterma de adsorción proporciona información cualitativa del proceso de adsorción. Los isotermas más comúnmente usados para tratar datos experimentales de determinado estudio fueron desarrollados por Freundlich y Langmuir.” (Asqui, 2018).

2.1.3 Isotermas de adsorción de Freundlich

La sustancia que recibe a otra en su superficie se llama adsorbente, y la sustancia que es adsorbida se llama adsorbato. En el equilibrio y a temperatura constante, la relación entre la cantidad de adsorbato adsorbido (x) y la concentración de la solución C se conoce como isoterma de adsorción. La cantidad adsorbida aumenta con la concentración de adsorbato. La gradual saturación de la superficie del adsorbente hace que la cantidad adsorbida se incremente menos de lo que indicaría la proporcionalidad a la concentración. Y matemáticamente la isoterma viene dado por la ecuación 1 conocida como la ecuación de Freundlich.

$$\frac{x}{m} = K.C^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec. 1.}$$

Dónde m es la masa del adsorbente, n y K son constantes para el sistema. n es siempre menor que la unidad.

Logarítmicamente se tiene la ecuación 2:

$$\log \frac{x}{m} = \frac{1}{n} \log C + \log K \quad \text{Ec. 2.}$$

Por lo tanto, al representar $\log (x \cdot m^{-1})$ en función de $l \text{ } ^\circ\text{C}$ dará una recta de pendiente igual a $1 \cdot n^{-1}$ y ordenada en el origen $\log K$. La gráfica se denomina isoterma de adsorción y es la relación entre la cantidad de adsorbato adsorbida en una interface y la actividad del adsorbente a una temperatura constante del sistema adsorbato/adsorbente.

2.1.4 *Isotermas de adsorción de Langmuir*

Es uno de los primeros modelos de ecuaciones empíricas que trata de interpretar los fenómenos de adsorción. Su fundamento menciona que una superficie homogénea del adsorbente proporciona una cantidad no ilimitada de sitios activos para que ocurra la adsorción. La relación entre la concentración de adsorbato adsorbido y su concentración en el fluido, a temperatura constante es lo que se conoce como isoterma de adsorción. Este tipo de adsorción se presenta en mono capa (mono molecular) debido a que la interacción química ocurre por el cambio de configuraciones electrónicas entre la superficie del adsorbente y una primera capa de moléculas de adsorbato. La figura 1-2 indica la tendencia de mantener la cantidad de adsorbato constante sobre la superficie del adsorbente cuando se alcance una concentración de equilibrio con la disolución. Y las moléculas adsorbidas no interaccionarán entre ellas. El límite de capacidad del adsorbente es cuando la monocapa está completa (región asintótica en la gráfica).

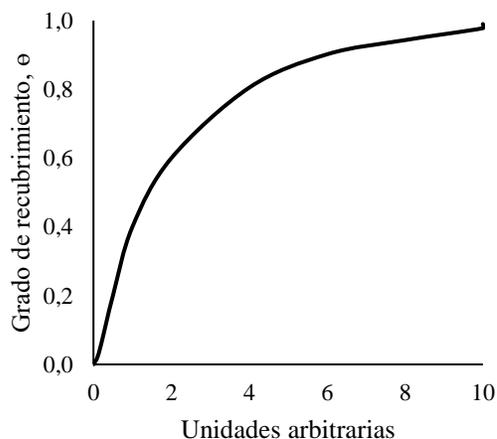


Figura 1-2. Isoterma de Langmuir

Fuente: Carballo L., (2002)

La ecuación 3 define los términos bajo los cuales se rige un fenómeno de quimisorción sobre una superficie homogénea

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} \cdot K \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e} \quad \text{Ec 3.}$$

Dónde:

q_e : cantidad de soluto adsorbido por gramo de adsorbente en el equilibrio con C_e , ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

$q_{m\acute{a}x}$: cantidad de adsorbato a completarla cobertura de monocapa, ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

K : constante que indica la afinidad del adsorbente por el adsorbato, ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$).

C_e : Concentración del adsorbato en disolución, ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

Para la forma linealizada de la isoterma de Langmuir se tiene la ecuación 4:

$$q_e^{-1} = (q_{m\acute{a}x} \cdot K)^{-1} \cdot (C_e)^{-1} + q_{m\acute{a}x}^{-1} \quad \text{Ec 4.}$$

Los valores de $q_{m\acute{a}x}$ y K se los obtienen de la gráfica de q_e^{-1} en función de C_e^{-1} .

En otras investigaciones se han evaluado los parámetros de capacidad de adsorción del hueso anorgánico mediante isotermas de Freundlich y Langmuir para deducir fenómenos de quimisorción y fisorción mediante la determinación de los coeficientes de correlación lineal. Londoño *et al* aseguran que, el desarrollo de las sociedades actuales ha propiciado el aumento exagerado de metales pesados: mercurio, plomo, arsénico, cadmio, cobre, cromo, esto a cuenta de la industrialización (Londoño *et al.*, 2016).

2.1.5 Remoción de Arsénico por Adsorción.

El arsénico tiene cuatro estados de oxidación (-3, 0, +3 y +5). En el ambiente el arsénico más común presenta los estados de oxidación +3 y +5, como oxianiones llamados arsenito (H_3AsO_3 o H_2AsO_3^- a $\text{pH} \sim 9-11$) y arseniato (H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} a $\text{pH} \sim 4-10$) siendo las formas más comunes en el agua potable. Diferentes formas de arsénico tienen diferentes toxicidades, siendo el gas arsina la

forma más tóxica de los oxianiones inorgánicos. El arsenito es la forma más tóxica y arseniato las menos tóxicas (Kumar, 2015). Para nuestro país en desarrollo y sin la tecnología necesaria resulta un problema enfrentar eliminar el arsénico en su totalidad. El reto se constituye en remover el arsénico a la concentración que permite la norma INEN, por ello las tecnologías para descontaminar metales pesados en general son poco frecuentes. La absorción fúngica o bacteriana se ha hecho presente y como alternativa se tiene la adsorción.

Los procesos de adsorción sobre materiales granulares adsorbentes son eficaces para la remoción selectiva del arsénico y operan a pH variable, no hay la necesidad de la regeneración del material usado y logran reducir consistentemente la concentración de arsénico por debajo de los valores estándar. (Escalera y Ormachea, 2017). Martinson y Reddy (2009) afirman que se ha estudiado ampliamente óxidos de metales como aluminio, hierro, titanio, circonio y manganeso como adsorbentes para eliminar el arsénico del agua. Pero la eliminación efectiva del arsénico por adsorción depende de: la cinética de reacción, la sensibilidad al pH, el estado de oxidación del arsénico y la presencia de aniones comunes en competencia. Estos factores obstaculizan la efectividad de muchos adsorbentes de arsénico (Martinson y Reddy, 2009). Mendoza *et al.*, (2011) aseguran que la adsorción es uno de los procesos de separación más eficientes para eliminar arsénico V en solución (Mendoza *et al.*, 2011).

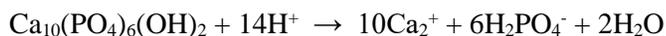
Las técnicas de adsorción son simples y convenientes y tienen el potencial de regeneración y operación sin lodos, se emplea reactivos químicos eficientes para la oxidación de arsénico (III) a arsénico (V), pero estos generan problemas derivados de productos secundarios y agentes residuales que elevan los costos de operación, por lo tanto, es necesario remover simultáneamente arsénico (III) y (V) (Amin *et al.*, 2006).

Durante las últimas dos décadas, la biosorción ha recibido mucha atención debido a la diversidad de los materiales adsorbentes disponibles, como la biomasa fúngica o bacteriana y los biopolímeros de alginato o quitosano. Como alternativa a estos métodos de tratamiento, la adsorción ha sido reconocida como una técnica efectiva para el tratamiento de agua contaminada con arsénico. (Boddu *et al.*, 2008)

2.1.6 *Hidroxiapatita*

Akram *et al.*, (2014) afirman que, el hueso y los dientes de los mamíferos están compuestos de Ca (24% en peso), P (10% en peso), proteínas (22% en peso). Apatita es el nombre general que se usa para la clase de minerales Ca-P con fórmula general $A_4B_6(MO_4)_6X_2$, donde A y B se consideran calcio (Ca), MO_4 es el grupo fosfato $(PO_4)^{3-}$ y X es el grupo Hidroxilo (OH^-) . La HA es un biomaterial sintético, que es químicamente similar al componente mineral de los huesos y tejidos duros en los mamíferos. La HA con una relación Ca/P de 1,67 exhibe una biocompatibilidad y bioactividad excepcional. La HA sintetizado desde fuentes orgánicas naturales no es estequiométrico, debido a la presencia de trazas de iones en el medio natural (Akram *et al.*, 2014)

Meza, Figueroa, Flores y Piña (2011) afirman que la HA es el principal componente inorgánico de los huesos y dientes de animales vertebrados que les proporciona la dureza y resistencia. De fórmula general $Ca_{10-x}(PO_4)_{6-x}(OH)_{2-x}$, donde $0 \leq X \leq 1$. Si $X = 0$, la HA se denomina estequiométrica. La HA no es soluble en agua, solo en ácidos, de acuerdo a lo reportado por Meza en el 2011 (Meza *et al.*, 2011).



La HA de calcio, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, es un importante material inorgánico en biología y química, con características de: estructura superficial disponible para adsorción, capacidad de intercambio iónico, así como a su biocompatibilidad, afinidad de adsorción, osteoconducción, propiedades de biorresorción y su característica para establecer enlaces con moléculas orgánicas de diferentes tamaños que le han otorgado a este material especial atención en las últimas dos décadas. Además, este material puede ser matriz eficiente de purificación de agua y está siendo muy estudiado en la eliminación de tierras raras y metales pesados (Barka *et al.*, 2010). La HA tiene gran capacidad para recuperar metales pesados de aguas residuales y suelos contaminados con iones como: Pb (II), Zn (II), Cu (II), Cd (II) y Co (II) los cuales se adsorben y precipitan sobre la superficie de la HA. Los iones a ser recuperados, por ejemplo, arsénico, reemplazarán los iones Ca, OH^- o PO_4^{3-} en la estructura cristalina, los dos últimos mediante sustitución tipo A o tipo B, respectivamente. (Akram *et al.*, 2014).

Sobczak, Kowlaski, Wzorek (2009) afirman que existen algunos métodos para extraer HA de los huesos de animales: descomposición térmica, proceso de agua subcrítica e hidrólisis alcalina. (Sobczak *et al.*, 2009)

El tipo de materia prima del hueso y las condiciones del proceso inciden en las propiedades fisicoquímicas (entre otras, la relación molar Ca/P y la morfología de la superficie) del hueso anorgánico y su contenido de HA. La fase mineral de los huesos es una HA no estequiométrica (HA), es decir, HA cuya relación molar de calcio a fósforo es diferente de 1,67. (Sobczak *et al.*, 2009). El componente mineral del hueso es una HA no estequiométrico con iones como Na^+ , Zn^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Si^{2+} , Ba^{2+} , F^- , CO_3^{2-} , etc., en trazas. Los métodos y los diferentes materiales sintéticos requieren un estricto control sobre los parámetros del proceso para producir una HA estequiométrica de alta calidad (Akram *et al.*, 2014). El compuesto modelo correspondiente a una fase mineral de los huesos es una HA no estequiométrica (HAe), es decir, HAe cuya relación molar de calcio a fósforo es diferente de 1,67 (Agnieszka *et al.*, 2009).

Un alto contenido de HA del hueso anorgánico se puede conseguir de su calcinación, la misma que sirve para eliminar los componentes orgánicos y destruir los patógenos; la ceniza, en cambio, contiene el componente mineral del hueso. Una conversión completa de 1,6 kg de hueso compacto puede producir hasta 1 kg de HA. Los cristales de HA existen en diferentes formas, sea como agujas, bastones, esferas, etc., los que se sintetizan a partir de cenizas de hueso natural o de productos químicos sintéticos. Las propiedades, la eficiencia, la pureza de fase y la distribución del tamaño de la HA extraído de los huesos, dependen de la técnica de extracción, la temperatura de calcinación y la naturaleza de los huesos. Los cristales de apatita que se extraen de sistemas biológicos son diferentes en muchos aspectos de los cristales sintetizados utilizando precursores sintéticos. (Akram *et al.*, 2014)

2.2.1 Filtración

La filtración es una operación unitaria en donde una mezcla sólido-líquido atraviesa un medio de porosidad intermedia para separar los sólidos, los filtros retendrán las partículas y, al mismo tiempo, permitirán el paso del agua, liberándola así de la materia en suspensión (MES). Pero la filtración es un tratamiento de pulimento y no el corazón del proceso de purificación, la filtración puede presentarse en dos zonas definidas:

•*Filtración en superficie*: se presenta cuando las partículas en suspensión son más grandes que el tamaño de los poros del medio filtrante y quedan retenidas sobre la superficie del lecho. Este mecanismo de remoción es quizá el menos relevante.

•*Filtración en volumen o en profundidad*: se presenta cuando las partículas suspendidas tienen tamaños menores que los poros del medio filtrante, penetrándolo, pero quedan, posteriormente, retenidas en él, mediante la conjugación de mecanismos de remoción propios de los medios o lechos porosos.

El medio filtrante y las prácticas de operación, conjugadas con las características del afluente definirán la eficiencia del proceso de filtración. (Lozano y Lozano, 2015)

2.2.2 *Características del lecho filtrante*

Éstas definen la eficiencia del proceso y el comportamiento de la pérdida de carga; están representadas en:

1. Porosidad y conductividad hidráulica del lecho.
2. Tipo de material filtrante.
3. Filtrabilidad o capacidad de retención de sólidos (es función de las tres anteriores).
4. Capacidad de almacenamiento (es función de las cuatro anteriores).
5. Profundidad del lecho.

2.2.3 *Características de la operación*

Éstas definen especialmente el dimensionamiento de las unidades y dependen de:

1. Tasa de filtración o carga hidráulica.
2. Pérdida de carga (es una consecuencia de las características del medio filtrante y del afluente).
3. Tiempo de carrera (está ligado de manera directa a la pérdida de carga).

2.2.4 *Características del afluente*

Afectan la eficiencia del proceso y la dinámica de la operación. Están dadas por:

1. Concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) o Material en Suspensión.
2. Tamaño y concentración de los flóculos remanentes.
3. Resistencia de los flóculos remanentes.
4. Carga eléctrica de los flóculos remanentes.
5. Propiedades físicas del agua.

2.2.5 *Tipos de filtros*

Las unidades de filtración pueden clasificarse de diferentes maneras.

2.2.6 *Según la dirección de flujo*

Según la dirección de flujo se clasifican en:

- Ascendentes
- Descendentes
- Flujo mixto

Los filtros más usados son los de flujo descendente. En la actualidad, los filtros de flujo ascendente no son recomendables y desaparecieron por la dificultad de efectuar un lavado efectivo (imposibilidad de generar expansión y fluidización del lecho filtrante), y los de flujo mixto, conocidos como AKX en Rusia, fueron descontinuados por dificultades iguales a los de flujo ascendente y, especialmente, porque su extraña y poco fundamentada configuración no aportaba ninguna ventaja concreta.

2.2.7 *Según su velocidad de filtración*

Dependiendo de la velocidad de trabajo, los filtros pueden ser:

- Rápidos
- Lentos

Los filtros rápidos engloban a los filtros de alta tasa. Los filtros rápidos manejan tasas de filtración elevadas del orden de $120 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ para lechos de arena (filtros rápidos) y velocidades entre 180 y $480 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ para filtros de antracita sola y duales de arena y antracita (filtros de alta tasa en ambos casos). La filtración lenta en arena, que es un tratamiento de tipo biológico, maneja tasas muy bajas del orden de $2 \text{ a } 5 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ y, en condiciones favorables, hasta $10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. No obstante, Lozano-Rivas desarrolló, en 2003, la tecnología conocida como “fibrofiltración biológica”, en la que reemplazó los lechos granulares de arena por lechos de fibras sintéticas y logró velocidades de filtración del orden de $24 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ y hasta de $50 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ en condiciones óptimas de operación y baja turbiedad en el afluente.

2.2.8 *Según la fuerza impulsora*

Los filtros se pueden clasificar en unidades:

A presión.

A Gravedad.

Los filtros a presión son filtros cubiertos, cerrados herméticamente, en donde la fuerza de empuje que lleva al agua a discurrir a través del lecho, se logra por la presión hidráulica a la que está sometida la unidad. En el caso de los filtros a gravedad, su superficie se encuentra expuesta y el empuje está dado por el efecto de la acción de la gravedad sobre la masa de agua sobrenadante.

2.2.9 *Según los mecanismos de remoción predominantes*

Estas unidades se clasifican en:

Biológicos. La filtración propiamente dicha. El filtro biológico más que un filtro, puede ser considerado un sistema completo de tratamiento en donde se efectúa la remoción de materia y el abatimiento de organismos patógenos por acción bacteriana; esto ocurre en las unidades de filtración lenta en arena (FLA) y en las unidades de Fibrofiltración biológica. Las unidades de filtración, propiamente dicho, se refieren a filtros rápidos y de alta tasa en donde no se presenta una acción biológica considerable, pero se da la conjugación de los demás mecanismos de remoción descritos.

2.2.10 *Según el tipo de lecho filtrante*

- Granulares (Un solo medio y duales)

- Fibrosos

Los filtros de lechos granulares son los más usados en las plantas convencionales y hacen referencia al uso de medios filtrantes porosos como la arena y la antracita. Estos materiales filtrantes pueden emplearse como medios únicos (arena sola o antracita sola) o en combinación (lechos duales de arena y antracita). Los lechos fibrosos son los medios filtrantes propuestos por Lozano-Rivas (2003), los cuales consisten en capas de fibras sintéticas, colocadas una sobre otra, que dieron paso a la tecnología de la “Fibrofiltración Biológica”, reconocida como la alternativa quizá más económica y eficiente para la potabilización de agua para países en desarrollo. Estos medios fibrosos han sido probados en filtros rápidos con resultados deficientes y, de momento, no es viable su aplicación en unidades de alta tasa. (Lozano & Lozano, 2015)

Castellar, Cardozo, Suarez y Vega (2013) afirman que los estudios de la eficacia de adsorción en disolución para la eliminación de sustancias específicas se los realiza por lotes, es decir en forma discontinua. Estos experimentos consisten en colocar el adsorbente en suspensión con la disolución que contiene la sustancia a remover con agitación para alcanzar el equilibrio y mantener en suspensión el adsorbente. En virtud de que los procesos industriales trabajan en condiciones continuas no es adecuado trabajar en columnas de lecho fijo. (Castellar *et al.*, 2013)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Diseño de la Investigación

Para el presente estudio, el tipo de investigación es experimental porque se empleó la diáfisis de los residuos óseos bovinos a distintas temperaturas de calcinación en el laboratorio, es decir se manipuló las variables bajo condiciones de control. Del tipo prospectivo porque los datos se registraron al hecho de que iban ocurriendo. Es un estudio diseñado transversalmente porque se concentró en analizar la adsorción que tiene el arsénico sobre el hueso anorgánico en el 2019, extraída de diáfisis bovina de origen doméstico.

3.2 Tipo de investigación

Este estudio presenta las instancias de ser aplicativa y experimental:

- ✓ **Aplicativa:** porque recogió conocimientos de anteriores investigaciones que analizaron la capacidad de adsorción que tienen los materiales adsorbentes de metales en agua tratada.
- ✓ **Experimental:** porque las pruebas de laboratorio dejaron apreciar las metas relevantes del objeto de estudio para apreciar las incidencias de las condiciones sobre los resultados.

3.3 Métodos y técnicas de investigación

Esta investigación empleó el método deductivo porque persiguió el conocimiento de analizar cómo influyó el factor temperatura de calcinación de diáfisis bovina (seca y sin tejidos) en la extracción del hueso anorgánico para ser empleado como adsorbente en un filtro, aprovechando un residuo cotidiano muy común, en un propósito de bienestar comunitario. Método analítico debido a que la filtración será profundizado en un análisis cinético de adsorción, y un análisis térmico de

calcinación para obtener hueso anorgánico y a la correlación entre esta obtención y la capacidad de adsorber arsénico de aguas tratadas en un filtro.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos primarios y secundarios

3.4.1 *Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios*

Los ensayos experimentales realizados en el laboratorio para conseguir los datos primarios de curvas isotérmicas, gráficas de FTIR, microscopía SEM, concentración de arsénico en agua tratada por Absorción Atómica y gráfica de XRD (por sus siglas en inglés) corroboraron que el trabajo investigativo fue de carácter experimental. La información Bibliográfica y la técnica de la entrevista se emplean para la obtención de los datos secundarios.

3.4.2 *Instrumentos para recolección de datos primarios y secundarios*

Las técnicas con sus respectivos instrumentos empleados para la recolección de datos fueron:

Espectrofotómetro de Absorción Atómica SAA (marca: PerkinElmer; serie: AS 800; accesorio: Autosampler) y Espectrofotómetro de Absorción Atómica SAA (marca: Varían; modelo: SpectrAA220; accesorio: Autosampler, código: AA1). Anexo A.

Agitador orbital shaker (marca: Stuart; serie: SSM1; velocidad máxima de agitación: 300 rpm). Anexo B.

Espectrómetro Infrarrojo con Transformadas de Fourier FTIR (marca: Jasco; serie: FT· IR⁻¹-4100). Anexo C.

Microscopio electrónico de barrido SEM (marca TESCAN modelo MIRA 3). Anexo D.

Difractómetro de rayos X. (marca PANalytical modelo EMPYREAN). Anexo E

El software PSPP se utilizó para definir que el tipo de estadística a aplicar en la investigación es deductivo. El software utilizado para el procesamiento de datos y para el análisis de varianza es Excel.

3.4.3 *Tamaño de la muestra*

Se aprecia que los desperdicios óseos de diáfisis bovina se encuentran en una masa no determinada en las poblaciones y se toma muestras en una cantidad suficiente para obtener cuarenta gramos de hueso anorgánico para tratar el agua de consumo en la alimentación de una familia de cinco miembros con tres comidas diarias, por un consumo de diez litros de agua de Toacaso-Cotopaxi. Valores que no son constantes y son estimados de acuerdo a una encuesta realizada. Las muestras de agua consisten en ser evaluadas en el pre y post tratamiento en el filtro y son necesarias para llevar a cabo los análisis de concentración de arsénico en el agua tratada de Toacaso, esto es un mililitro para la lectura en el espectrofotómetro de Absorción Atómica.

3.5 **Planteamiento de la hipótesis**

Con la implementación del filtro de HA proveniente de la diáfisis bovina, se adsorberá el arsénico presente en el agua tratada de la parroquia Toacaso-Cotopaxi.

3.6 **Identificación de variables**

3.6.1. *Variables independientes*

Para la investigación experimental, se considera como variable independiente a la temperatura de calcinación del hueso anorgánico, la masa y tiempo de HA empleados para la adsorción.

Para la investigación aplicada, se considera como variable independiente a la implementación del filtro.

3.6.2. *Variables dependientes*

Para la investigación experimental se considera como variable dependiente a:

La concentración de arsénico adsorbido del agua tratada.

Para la investigación aplicada, se considera como variables dependientes a:

Características del diseño del filtro.

Eficiencia de adsorción del filtro.

3.7 Procedimiento experimental

Para la acumulación de restos de diáfisis bovina se trabajó de forma mecánica de tal forma que se encuentre libre de tejido, piel, cabello y médula hematopoyética. La diáfisis bovina es obtenida de las extremidades anteriores de ganado vacuno maduro de aproximadamente 4 años, y se descartó las secciones que componen la metáfisis y epífisis.

3.7.1 *Elaboración de secciones de la diáfisis libre de grasa y tejido.*

En la sierra de corte de carne se realizó cortes de tal forma que se eliminó las secciones que no pertenezcan a la diáfisis, luego se dividió ésta, en secciones de aproximadamente cuatro centímetros. Esto llevó a obtener cilindros que fueron segmentados transversalmente empleando cuchilla o hacha de acero inoxidable.

Se sometió a ebullición durante 30 minutos en agua destilada para la desproteización. Hubo el desprendimiento del resto de tejido de la parte externa y la grasa de la parte interna de las secciones de diáfisis. Una vez frías se enjuagaron con agua destilada a temperatura ambiente y luego un enjuague con una solución de Hidróxido de Sodio de concentración 0,025 M.

Se dejó secar a temperatura ambiente y se colocó en una estufa para el secado a 98 °C por una hora, se obtuvo secciones secas de color blanco y libre de humedad, grasa y tejidos. Dando una masa de 1894,5 gramos de cuatro diáfisis delanteras de bovino maduro de 4 años de edad.

3.7.2 *Molienda de las secciones de diáfisis libres de grasa y tejidos.*

Por la alta dureza de las secciones de diáfisis se debe reducir en forma progresiva el tamaño empleando secuencialmente los siguientes molinos:

Molino de martillos (marca: Karl Kolb; tamaño de partícula: 2-6 mm)

Molino de cuchillas (marca: Thomas; tamaño de partícula: 2-6 mm)

Molino de corte (marca: Retsch; serie: SM 300; tamaño de partícula: 0,25 – 20 mm)

Molino ultracentrífugo (marca: Retsch; Serie: ZM 200; tamaño de partícula: 10 mm – 40 μ m)

Molino de bolas (construcción artesanal; tamaño de partícula: 63 μ m)

Los molinos se muestran en el Anexo F.

3.7.3 Tamizado del polvo de diáfisis

Se consiguió reducir el tamaño de las secciones de diáfisis realizando el tamizado haciendo uso de tres tamices que fueron construidos de forma artesanal con las siguientes mallas de acero inoxidable:

Malla ac. inox. Mesh # 80 hilo 0,12mm 1,0mt c316 (tamaño de orificio 0,120 milímetros).
Reteniendo 476,9 g.

Malla ac. inox. Mesh # 150 hilo 0,065mm 1,0mt c316 (tamaño de orificio 0,065 milímetros).
Reteniendo 506,9 gramos

Malla ac. inox. Mesh # 250 hilo 0,040mm 1,0mt c316 (tamaño de orificio 0,040 milímetros).
Reteniendo 92,9 gramos.

Los 621,1 gramos restantes se tratan de partículas de mayor y menor tamaño a las mallas descritas. Se considera como pérdidas adicionales a las que se suman a las que van reteniendo los molinos.

El proveedor de las mallas fue la empresa Acerimallas RUC 0992339594001.½ 7,5 vía Daule. Ciudadela Santa Cecilia manzana. 1 solar 2 (frente Hilantex) pbx 042-261758.

El equipo de tamizaje se muestra en el Anexo G.

3.7.4 *Calcinación de las partículas retenidas en la malla # 150. 65 micras.*

Se seleccionó las partículas retenidas en este tamaño de mallas porque la calcinación las reduce de tamaño; en la literatura de investigaciones previas se indica que la adsorción de metales se lleva de mejor manera en partículas que van de entre 63 y 70 micras. Se las calcinó siguiendo el siguiente protocolo:

Durante dos horas cada una, las temperaturas de calcinación que se sometieron tres porciones equitativas de la masa de 506,9 gramos son: 450 °C, 600 °C y 750 °C; se las realizó en la mufla localizada en el laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica del Chimborazo. Para evitar la desnaturalización del hueso anorgánico se aplica rampas de temperatura de 0,5 °C por minuto. Al final se obtuvo un polvo fino blanco. La mufla empleada se presenta en el anexo H.

Post calcinación se conservaron las muestras en un desecador hasta su enfriamiento. El comportamiento de la pérdida de masa y tamaño se pudo evaluar empleando balanza analítica y las mallas de los tamices respectivamente. Además, se evaluó la adsorción por parte del polvo de hueso obtenido con la realización de la simulación en el laboratorio como se detalla a continuación.

3.7.5 *Adsorción de arsénico contenido en el agua tratada a escala de laboratorio.*

La siguiente descripción indica las condiciones que se emplearon para encontrar la muestra de hueso anorgánico proveniente de las tres temperaturas de calcinación (450, 600 y 750 °C) que tenga la más alta eficiencia de adsorción de arsénico del agua tratada a los tiempos y masas planteados.

Para la reacción de adsorción de arsénico sobre el hueso anorgánico se utilizó el agitador orbital shaker (marca: Stuart; serie: SSM1; velocidad máxima de agitación: 300 rpm), Anexo B. Se colocaron 50,0 mililitros de agua tratada de Toacaso en recipientes de vidrio con tapa hermética, que funcionaron como reactor Batch.

A cada uno de tres recipientes se añadió 0,1 gramos del hueso anorgánico obtenido por calcinación a las tres temperaturas, a otros tres recipientes se añadieron a cada uno 0,2 gramos del mismo hueso anorgánico, de igual manera a cada uno de tres recipientes se añadió 0,3 gramos del mismo hueso

anorgánico obtenido a las tres temperaturas de calcinación. Los nueve frascos se ajustaron a las barras de sujeción del orbital shaker y se agitó por diez minutos a 150 rpm. Como se describe en el anexo B.

El paso anterior se repitió para nueve recipientes, pero el tiempo de agitación fue de 20 minutos. Y la operación se repitió para 30 minutos de agitación. Todos siempre a 150 rpm.

El hueso anorgánico insoluble en agua se filtró en papel filtro cuantitativo, el filtrado se conserva en tubos de ensayo con tapa. Aquí cabe recalcar que el papel filtro analítico de 0,1 mm de poro no tiene la capacidad de retener el arsénico.

Las muestras de agua recolectadas se conservan en refrigeración para las mediciones de concentración de arsénico como se describe a continuación.

3.7.6 *Medición de la concentración de arsénico en agua tratada de Toacaso.*

El siguiente procedimiento se empleó para medición de arsénico en las muestras de agua de la comunidad de Toacaso, existiendo dos instancias de muestreo; el primer análisis sirve para realizar los tratamientos de adsorción sobre hueso anorgánico a escala de laboratorio y el segundo análisis para el análisis de la eficiencia del filtro, a escala de hogar en condiciones reales.

La medición de la concentración de arsénico se realizó en el equipo Espectrofotómetro de Absorción Atómica SAA (marca: PerkinElmer; serie: AS 800; accesorio: Autosampler) que se encuentra en el Laboratorio del CENCINAT de la ESPE Matriz. Sangolquí. El procedimiento se detalla a continuación:

- ✓ Verificar las conexiones a los gases de argón y acetileno con una presión de salida de entre 12 a 15 psi. Verificar que el recipiente contenedor de desechos se encuentre con la manguera de salida en su interior. Verificar que las mangueras de fluidos no se encuentren obstruidas y correctamente conectadas en las celdas FIAS.
- ✓ Insertar la lámpara correspondiente a la medición de arsénico.

- ✓ Colocar la solución correspondiente a HCl al 10%. Y la solución del reductor de NaBH₄, que se prepara añadiendo dos lentes de NaOH a un gramo de NaBH₄ y se afora a 500,0 mL. Esta solución de reductor se prepara instantes antes de las mediciones.
- ✓ Encender: el estabilizador, ups, la válvula y el ordenador con el software propio para el espectrofotómetro.
- ✓ Fijar la temperatura del horno de grafito a 900 °C
- ✓ La muestra se prepara añadiendo a 1 ml de la muestra, 1 mL de HCl concentrado, 1 mL de la mezcla KI al 5% (m· v⁻¹) y ácido ascórbico al 5% (m· v⁻¹). Esperar 45 minutos a temperatura ambiente y diluir A 10 mL.
- ✓ Realizar la curva de calibración con las soluciones de estándar de arsénico.
- ✓ Realizar las mediciones y reportar.

3.7.7 *Caracterización del hueso anorgánico.*

Microscopía SEM-EDS.

Para conocer la morfología superficial y el análisis elemental del mineral con el hueso anorgánico se emplea microscopía SEM.EDS. Un haz de electrones que se desplaza por una determinada superficie de la muestra, se tiene una fuente de electrones. Los lentes electromagnéticos direccionan un haz paralelo que pasa a través del campo magnético provocado por las bobinas de deflexión, que hacen posible el barrido de la muestra, línea por línea de la muestra, en donde por el efecto del choque se desprenden electrones secundarios de las mismas líneas de la muestra; los electrones secundarios de rebote son recogidos por un detector y la señal es transformada en una señal electrónica y mediante sensores se puede receptar la señal eléctrica de la morfología superficial al realizar aquella aplicación. El microscopio SEM-EDS se encuentra en el Laboratorio de Caracterización de Nanomateriales del CENCINAT. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Matriz. Sangolquí. La operación dada por el laboratorio se detalla a continuación. La muestra se coloca sobre un porta muestras para microscopia electrónica de barrido utilizando una cinta de doble faz de carbono.

- ✓ Las observaciones en el SEM se realizaron con el detector de electrones retrodispersados (BSE) y el detector de electrones secundarios (SE).
- ✓ El análisis EDS se realiza usando un detector BrukerX-Flash6|30 con una resolución dE

123 eV a MnK α en 20 puntos aleatorios de la muestra.

Difracción de Rayos X. XRD.

Para conocer las caracterizaciones estructurales del hueso anorgánico se realizó una difracción de rayos X (XRD) en un equipo Difractómetro, la técnica se basa en que la estructura cristalina de un sólido interacciona con una fuente de rayos X que es una fuente de radiación electromagnética, esta estructura cristalina emite señales luego de ocasionar una dispersión, manteniendo la longitud de onda de la radiación en las tres direcciones del espacio, las ondas son recibidas por receptores que transforman las señales en eléctricas, previamente existiendo una interferencia constructiva de las ondas que están en fase. El equipo de difracción de rayos X se encuentra en el Laboratorio de Caracterización de Nanomateriales del CENCINAT. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Matriz. Sangolquí. El procedimiento dado por el laboratorio para las medidas se detalla a continuación.

- ✓ Pevio al análisis, el equipo fue acondicionado en modo normal por 45 minutos.
- ✓ Las muestras se colocan en porta muestras para difracción de rayos X en modo spinner.
- ✓ Operando en una configuración θ - 2θ (geometría Bragg-Brentano).
- ✓ Equipar con tubo de Rayos X de cobre. Se utiliza un voltaje de 45 kV y corriente 40 mA (K α radiación $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$).

Espectroscopia Infrarrojo. FT-IR

Las caracterizaciones composicionales se realizaron mediante transformada de Fourier en el infrarrojo (FT-IR) en un equipo Spectrum BX-II. Se identificó los grupos funcionales componentes del hueso anorgánico. Se fundamenta en emitir radiación infrarroja sobre la muestra, la cual absorbe la energía del infrarrojo y se produce vibración. Cada enlace absorbe la radiación infrarroja con distinta frecuencia y se los puede identificar empleando la biblioteca del software del equipo FT-IR.

Para verificar la eliminación de materia orgánica y el estudio de la composición química luego de la calcinación del hueso, se empleó el espectrofotómetro de infrarrojo con transformadas de Fourier FT-IR marca: Jasco; serie: FT-IR-4100 en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} , el cual se encuentra en el

laboratorio de Química Orgánica de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. El procedimiento se detalla a continuación.

- ✓ Limpiar el porta muestras con mucho cuidado usando algodón empapado de alcohol, se deposita una masa de aproximadamente 0,3 gramos del hueso anorgánico tamizado a 63 micras.
- ✓ Cerrar la escotilla y se realiza la lectura empleando el software con las condiciones de barrido del blanco.
- ✓ De acuerdo a la necesidad se modifica las escalas de los resultados del espectro, eliminando el ruido y normalizándolo.

3.7.8 *Diseño y construcción del filtro captador de arsénico.*

El filtro dispone de una parte estructural en la que va adaptada una sección con componentes electrónicos con un sencillo circuito.

Los controles funcionan con un potencial de 12 voltios. Caudal de agua tratada de 15 L· min⁻¹. Y capacidad de tratamiento de 10 litros, que son constantes y permanecen en contacto con el hueso anorgánico. Los materiales empleados y su disposición se describen a continuación:

- ✓ En la parte inferior de un balde plástico de 16 litros se disponen dos tuberías de media pulgada que sirven para la entrada y salida del agua tratada.
- ✓ Dentro del balde se adapta un recipiente reportero pequeño con tapa, ubicado por sobre 5 centímetros del nivel de los 10 litros, este sirve para contener el empaquetamiento del hueso anorgánico. Este recipiente tiene perforaciones pequeñas en la parte inferior.
- ✓ En una malla de acero inoxidable de 63 micras que se adaptó en forma de sobre se empaqueta 40 gramos del polvo de hueso anorgánico de más de 63 micras de tamaño. El sobre es elaborado con dos hojas de malla de 12 centímetros selladas con hilo.
- ✓ Como agitador se tiene una bomba sumergible de pecera depositada en el fondo del balde, conectada con dos mangueras grado alimenticio que trabajan como entrada y salida. La entrada del agua es la que capta del balde y la manguera de salida se adapta por la tapa al recipiente que contiene el hueso anorgánico empaquetado.
- ✓ Externamente, por la pared del balde está la placa electrónica que contiene el circuito tiene los componentes que activan automáticamente una electroválvula para la entrada de agua hacia el

balde, así se compensa el agua que se va consumiendo para la preparación de alimentos. La placa tiene encendida la bomba sumergible para mantener la agitación permanentemente.

✓ El filtro así dispuesto se conecta a la toma de agua que ingresa a la cocina, interviniendo la conexión en donde el filtro sirve a la vez como reservorio.

✓ Para la parte electrónica de automatización se empleó los siguientes componentes:

1 resistencia R1 de 2,2 K ohm.

1 resistencia R2 de 1,0 K ohm.

1 transistor Q1. 2N3904.

1 transistor Q2. TIP31.

Una fuente de voltaje de 12 voltios a 3 Amperios.

Un sensor digital de nivel de agua.

Una electroválvula CONN-SIL2 de 12 voltios a 1 Amperio.

Una bomba de agua de 12 voltios a 300 mAmperios.

Para el diseño de la placa electrónica de control se utilizó el programa Proteus 8 Profesional con el circuito que se indica en la Figura 1-3.

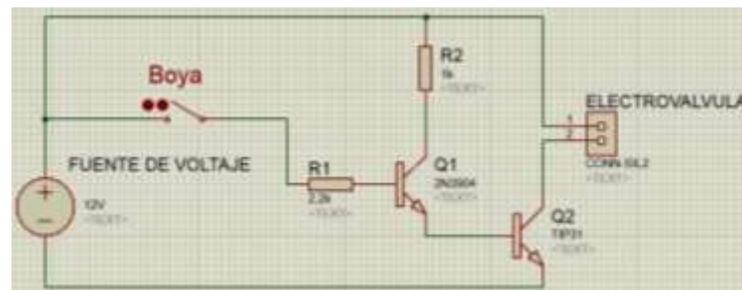
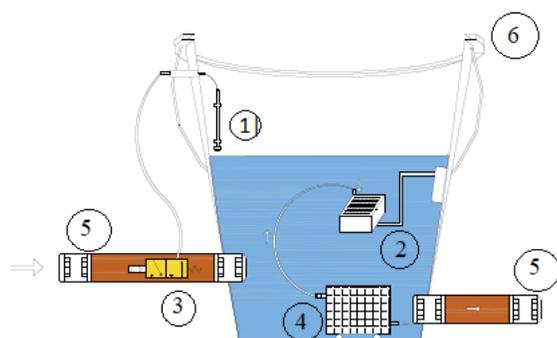


Figura 1-3. **Circuito para la automatización del filtro**

Fuente: EID. Electronic. Investigation. Design

La entrada del flujo de agua hacia el filtro se activa si el sensor de nivel activa la electroválvula. La bomba sumergible mantiene el agua en permanente agitación. El ciclo de muestreo consiste en recoger seis muestras en el lapso de tres días, su implementación visualizar en la figura del anexo K.



1. Sensor de nivel de líquidos
2. Recipiente contenedor de hueso anorgánico
3. Electroválvula
4. Bomba sumergible
5. Tuberías alimentación y descarga de agua
6. Recipiente del filtro

Esquema 1. Reactor batch empleado en la adsorción

Fuente: Diseñado en AUTOCAD. Empresa D-Sing

3.7.9 Capacidad de adsorción.

Una vez conocida la muestra de hueso anorgánico que más porcentaje de adsorción de arsénico tuvo del agua tratada, se empleó dicha muestra para implementarlo en el filtro y de donde se realizó el análisis de capacidad de adsorción empleando los mismos modelos de isotermas.

El tiempo de saturación del hueso anorgánico obtenido se llegó a conocer tomando muestras en un ciclo de muestreo durante el funcionamiento del filtro. Este planteamiento permitió llevar a cabo un análisis de los factores que determinan la eficiencia del filtro.

Se emplea una balanza analítica marca CAMRY serie ACS-30-JC21 que se encuentra en el laboratorio de química analítica de la ESPOCH para conseguir la masa de hueso anorgánico que se sumergió en el filtro con agua.

Las concentraciones finales e iniciales se determinaron empleando el método de absorción atómica con un espectrofotómetro Varían; modelo: Spectr AA220. La masa del adsorbente permanece constante.

Isotermas de Freundlich.

La adsorción de arsénico que se da en una superficie heterogénea de hueso anorgánico, considerando que ocurre en multicapas y de distinta manera en cada punto se encuentra regida por la ecuación 1. Y la forma linealizada regida por la ecuación 2.

Isotermas de Langmuir

En este modelo se asume que la adsorción del arsénico ocurre en una superficie homogénea, esta superficie del hueso anorgánico dispone de una cantidad definida de sitios para la adsorción, por lo que solo una sola molécula es adsorbida en una sola capa monomolecular y es constante en la etapa de desorción. Las ecuaciones 3 y 4 demuestran el alcance de los equilibrios de adsorción y desorción en las condiciones del filtro.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo describe los resultados de cuatro instancias que han permitido llegar a la instalación del prototipo de filtro captador de arsénico en un hogar de la comunidad de Toacaso. En la primera parte se habla de los resultados de la obtención del hueso anorgánico, la segunda parte se describe los resultados la remisión de arsénico en un reactor Batch a escala de laboratorio empleando el prototipo de filtro de hueso anorgánico, al que se designa con la serie FCAs-20.1, en la tercera parte se habla sobre los resultados de la caracterización microscópica y de grupos funcionales del hueso anorgánico, se hace una discusión comparativa con los resultados en HA reportados. La caracterización se realizó en una muestra del hueso anorgánico que mejores resultados entregó en la segunda parte; esto es, del tratamiento codificado BT.Y.t2, siendo uno de los 27 tratamientos del hueso anorgánico que mayormente captó arsénico a escala de laboratorio en reactor Batch. Finalmente, en la cuarta parte se describe el resultado de la instalación del filtro que contiene hueso anorgánico. Con estos resultados se logró cumplir con los objetivos planteados.

4.1 Obtención de hueso anorgánico.

La diáfisis es la materia prima de la cual se consigue polvo de hueso anorgánico. Inicialmente, las diáfisis fueron sometidas a corte y desprendimiento de tejidos mecánicamente, Figura 1-4.



Figura 1-4. Secciones de diáfisis bovina sin tejidos

Realizado por: Carlos Orbea, 2019

El desprendimiento de la grasa y el tejido hematopoyético de las secciones de diáfisis bovina se realizaron en agua destilada en ebullición como indica la Figura 2-4. Luego del desprendimiento de los tejidos y grasa, el hueso toma el nombre de hueso anorgánico.



Figura 2-4. Desprendimiento de tejidos y grasa a través de hervido

Realizado por: Carlos Orbea, 2019.

El secado se realizó en una estufa a 98 °C durante una hora, procedimiento que se indica en la figura 3-4.



Figura 3-4. Secado de diáfisis en estufa a 98 °C

Realizado por: Carlos Orbea, 2019.

Las secciones deshidratadas y frías dieron un peso de 1894,5 gramos. Su aspecto se visualiza en la fotografía de la figura 4-4.



Figura 4-4. Diáfisis secas y sin tejidos

Realizado por: Carlos Orbea, 2019

Las secciones de hueso se encuentran sin humedad y con un bajo porcentaje de materia orgánica, dicha materia se elimina en la etapa de calcinación.

La trituración en los molinos y el tamizado permitió obtener partículas de hueso seco que pasaron por la malla de 63 micras en el tamiz. Los molinos empleados se pueden apreciar en el anexo F. La molienda generó combinación de partículas de distinto tamaño. Dando una masa de 477,0 gramos. La separación de partículas distintas a 63 micras se realizó con el tamizaje mediante el juego de tres tamices que se indican en el anexo F. La masa total de las partículas retenidas en la malla de 63 micras se dividió en tres porciones de 159,0 gramos y se sometió respectivamente a calcinación en las tres distintas temperaturas de 450 °C, 600 °C y 750 °C. El aspecto de la calcinación del hueso anorgánico obtenido se observa en el anexo I.

El rendimiento de obtención de hueso molido a partir del hueso deshidratado es del 91,2%, ya que se inicia con 1894,5 g deshidratado, y se obtiene 1727,8 g de hueso molido fino, luego de la molienda en los cinco molinos. El rendimiento de obtención de hueso anorgánico es del 27,6 %, ya que se inicia con 1727,8 g de hueso molido y se obtiene 477,0 g.

En el filtro se dispuso de un empaquetamiento del hueso adsorbente en una malla de acero inoxidable número 250 de forma cuadrada de 12,0 centímetros de lado en forma de bolsa que se consiguió formar cociendo con hilo. Presumiblemente se puede disponer de varios empaquetamientos como el descrito.

4.2 Experimentación realizada en laboratorio

4.2.1 *Resultados de la medida de concentración de arsénico.*

4.2.2 *Selección de la muestra con la más alta concentración de arsénico en Toacaso.*

La norma técnica utilizada para el muestreo del agua tratada de Toacaso es la Norma Técnica ecuatoriana NTE INEN 2169-2013 agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras tercera revisión. Y conservadas a congelación hasta su análisis como indica el protocolo de conservación para mediciones de arsénico.

En Toacaso existen 17 vertientes naturales, con distintas concentraciones de arsénico, algunas superan la concentración de la norma mencionada y el caudal de unas sirven de efluentes para otras vertientes, formando una compleja red. En Toacaso hay dos plantas de tratamiento para agua de consumo humano, pero no hay información certera de cuáles son las vertientes que sirven como abastecimiento para las dos plantas. Por ello se procedió a seleccionar cinco puntos cercanos a la planta de tratamiento del sector sur. El protocolo se aplicó para la medición de concentración de arsénico en agua tratada de Toacaso-Cotopaxi llevado a cabo por el recorrido que comprende desde las vertientes de captación, pasando por la planta de tratamiento y llegando a los hogares. La tabla 1-4 muestra los resultados de las concentraciones y las ubicaciones referenciales de las muestras.

Tabla 1-4. Datos del muestreo de agua en 5 distintos puntos de la parroquia Toacaso

Muestra	Día	Hora	Coordenadas	Referencia	Concentración As, mg· L ⁻¹
1	13/08/2019	16:30	0°44'54'' S 78°42'55'' O	De la vía a Sigchos. Hogar con una vertiente distinta	0,268
2	13/08/2019	17:15	0°44'55'' S 78°42'28'' O	Del primer ramal de la vertiente de captación.	0,306
3	13/08/2019	17:30	0°44'58'' S 78°42'24'' O	Del segundo ramal de la vertiente. Previo al ingreso a la planta de tratamiento	0,164
4	13/08/2019	17:36	0°44'58'' S 78°42'24'' O	De la válvula previo al ingreso a los tanques de tratamiento	0,205
5	13/08/2019	17:04	0°45'15'' S 78°41'54'' O	De un hogar que consume el agua tratada	0,108

Realizado por: Carlos Orbea, 2019.

Bajo los criterios de que no hay claridad de antecedentes de este tipo de investigación, tampoco información validera de los puntos más afectados por la incidencia de aguas arsenicales, y los documentos de análisis del agua con los que cuenta el representante del gobierno en la parroquia Toacaso-Cotopaxi son desactualizados. Los cinco puntos de muestreo siguen una trayectoria que permita obtener información de concentración de arsénico desde donde las vertientes proveen de agua para la planta de tratamiento, hasta el consumidor final, esto es en un hogar de la parroquia. La muestra uno es en un hogar de la parroquia que se provee de agua de otra vertiente, esto sirve para análisis comparativo y a futuro investigaciones más amplias. Los puntos de muestreo se indican en la Figura 5-4.



Figura 5-4. Puntos de muestreo para análisis de arsénico en agua de Toacaso

Realizado por: Carlos Orbea, 2020. En GOOGLE EARTH. ©GOOGLE 2020

La muestra 2 presentó la mayor concentración de arsénico (0,306 ppm) y la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1108:2011 cuarta revisión indica que debe tener 0,01 ppm para agua potable. El dato 0,306 ppm de concentración de arsénico es el que se consideró como referencial para reportar los porcentajes de adsorción de arsénico en el agua tratada a escala de laboratorio en reactor Batch. Eligiéndose el valor para fijar el criterio de adsorber la mayor cantidad posible de arsénico sobre el hueso anorgánico ya que dichas concentraciones son mucho más peligrosas y además existen épocas en las que las concentraciones pueden ser mayores como indican más adelante los resultados. Para no tener que emplear sustancias reguladoras dentro del filtro se ha omitido el valor de pH del agua y con esto se llegó a cumplir el principio de ser un método domiciliario convencional y con perspectiva rural. De acuerdo al desempeño y principio del filtro se diagnostican ventajas de ser simple, rentable y ecológico persiguiendo los siguientes principios de la Química Verde: principio 1 porque al emplear residuos óseos previene la generación de dichos residuos al ambiente; principio 3-4 porque la síntesis de hueso anorgánico es haber obtenido una sustancia de nula o baja toxicidad manteniendo su eficacia; principio 7 porque el material empleado para la elaboración del filtro es renovable y no agotable; principio 9-10 debido a que el catalizador para la adsorción es de origen natural y es biodegradable y el principio 11 porque su diseño permite el control y seguimiento de la concentración de arsénico en el agua de consumo en tiempo real.

4.2.3 Selección del tratamiento más eficiente de adsorción.

La concentración de arsénico al realizar la adsorción en muestras de 50,0 mL de agua de la muestra 2 en reactor Batch, con tratamientos entre las variables temperatura de calcinación, masa de hueso anorgánico y tiempo de agitación. Obteniéndose 27 resultados, estos se presentan en la tabla 2-4.

Tabla 2-4. Tratamientos que determinan el más eficiente en adsorción de arsénico

Tratamiento con masas de HA	Código	ppm. As. Post tratamiento	S.D	% Adsorción
[AT]	AT. X.t1	0,166	2,660	45,752
	AT. X.t2	0,142	0,130	53,595
	AT. X.t3	0,167	0,150	45,425
	AT. Y.t1	0,148	0,190	51,634
	AT. Y.t2	0,107	0,260	65,033
	AT. Y.t3	0,245	0,100	19,935
	AT. Z.t1	0,114	0,120	62,745
	AT. Z.t2	0,158	0,040	48,366
	AT. Z.t3	0,136	0,190	55,556
[BT]	BT. X.t1	0,162	0,400	47,059
	BT. X.t2	0,255	1,880	16,667
	BT. X.t3	0,166	0,150	45,752
	BT. Y.t1	0,173	0,020	43,464
	BT. Y.t2	0,098	0,269	67,974
	BT. Y.t3	0,179	0,590	41,503
	BT. Z.t1	0,166	0,350	45,752
	BT. Z.t2	0,132	0,370	56,863
BT. Z.t3	0,153	0,090	50,000	
[CT]	CT. X.t1	0,221	0,120	27,778
	CT. X. t2	0,153	0,160	50,000
	CT. X. t3	0,284	0,160	7,90
	CT. Y. t1	0,159	0,540	48,039
	CT. Y. t2	0,154	0,170	49,673
	CT. Y. t3	0,226	0,950	26,144
	CT. Z. t1	0,155	0,220	49,346
	CT. Z. t2	0,142	0,220	53,595
	CT. Z. t3	0,243	0,150	20,588

Realizado por: Carlos Orbea, 2019.

Tabla 3-4. Variables aplicadas en los tratamientos

[AT]	[BT]	[CT]
450 °C	600 °C	750 °C
X	Y	Z
0,1 g. HA	0,2 g. HA	0,3 g. HA
t ₁	t ₂	t ₃
10 min	20 min	30 min

Realizado por: Carlos Orbea, 2019.

La tabla 3-4 indica las variables aplicadas en la adsorción. La muestra de hueso anorgánico usado en el tratamiento BT.Y.t₂ se seleccionó para la caracterización.

4.2.4 *Tiempo de equilibrio bajo condiciones de agitación en orbital shaker.*

En la figura 4-6 se aprecia gráficamente la disminución de la concentración de arsénico en función del tiempo cuando se ha fijado a 150 rpm el orbital shaker. En los primeros cuatro tiempos del ciclo existe adsorción de arsénico sobre el hueso anorgánico en el flujo de agua en las condiciones de agitación de un orbital shaker. A los 20 minutos es cuando se alcanza el equilibrio, tiene una remoción del 67,14%, este porcentaje de eficiencia es similar al obtenido en la muestra del hueso anorgánico del tratamiento BT.Y.t₂. Se alcanza el equilibrio entre la adsorción y desorción en las condiciones del filtro y la gráfica se torna lineal.

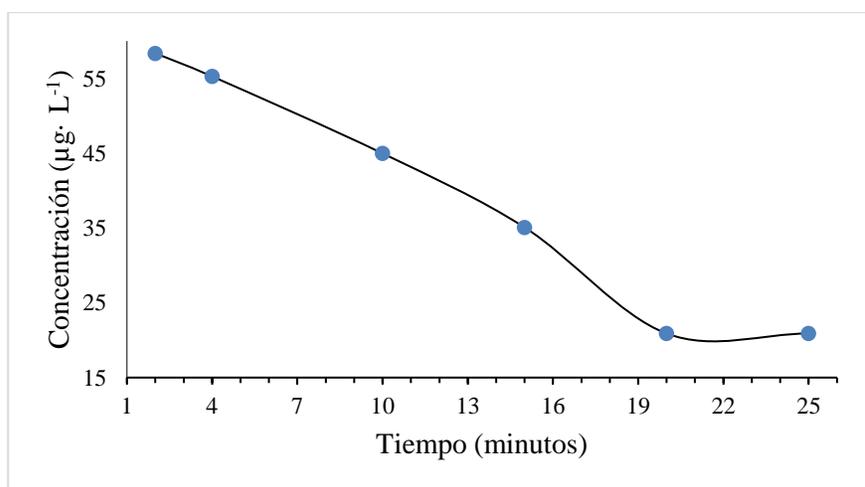


Figura 6-4. Tiempo de equilibrio con agitación en orbital shaker

Realizado por: Carlos Orbea

En la figura 7-4 se aprecia el gráfico no linealizado de los valores de equilibrio del hueso anorgánico como adsorbente de arsénico, en el cual se aprecia que, las concentraciones bajas permiten una mejor adsorción, esto debido a que existen más sitios activos para captar arsénico, por lo contrario, las altas concentraciones saturan la disponibilidad de sitios activos y la adsorción decae. Los datos se encuentran en el anexo L (a).

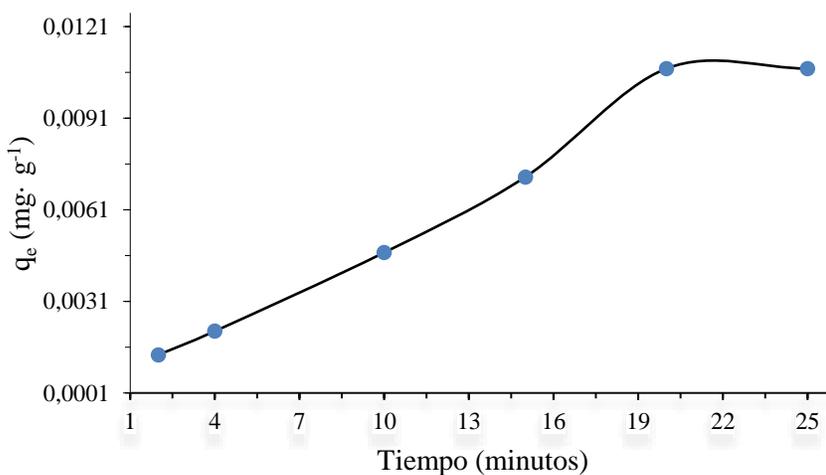


Figura 7-4. Tiempo de equilibrio y capacidad de adsorción en orbital shaker
Realizado por: Carlos Orbea

4.3 Isotermas de adsorción.

Se estableció las capacidades de adsorción en base al tipo de curva de adsorción en forma de L, que son gráficas que se adaptan a los modelos de gráficas de isotermas de Freundlich y Langmuir. Para determinar las isotermas de adsorción se empleó el hueso anorgánico de tratamiento Bt.Y.t₂ en frascos, empleando 50,0 mL de agua tratada de Toacaso con 2,0 gramos de hueso anorgánico, esto significa una dosis del adsorbente de 4,0 g· L⁻¹, empleando 150 rpm de velocidad de agitación los resultados datos de equilibrio del hueso anorgánico como adsorbente de arsénico en agua tratada de Toacaso se verifican en la figura 8-4. Los datos se encuentran en el anexo J (b).

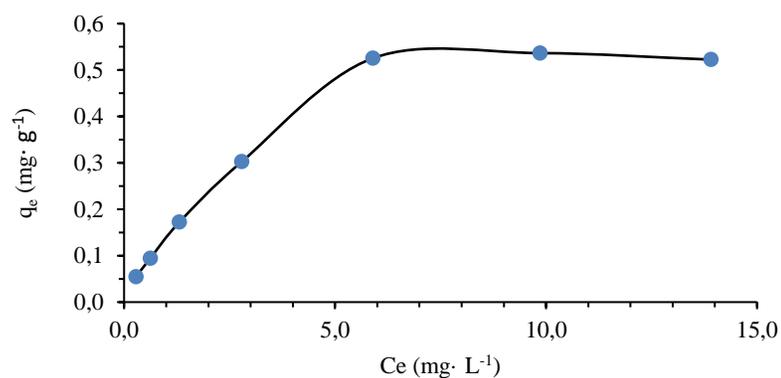


Figura 8-4. Curva de equilibrio de la adsorción a escala de laboratorio

Realizado por: Carlos Orbea

4.3.1 *Isoterma de Freundlich para la adsorción de arsénico sobre hueso anorgánico en agitación de orbital shaker*

En la figura 9-4 se observa la forma linealizada de la isoterma de Freundlich. Este es un modelo matemático con el objetivo de conseguir esta isoterma y sus constantes. Dando como resultados un valor de K igual a 0,135 L· mg⁻¹ y un valor de n igual a 1,613. Los datos se encuentran en el anexo L.

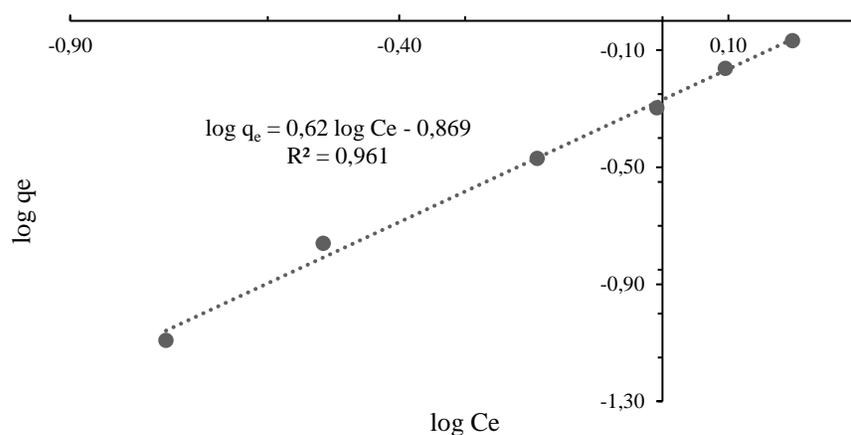


Figura 9-4. Isoterma de Freundlich de la adsorción de arsénico sobre el hueso anorgánico

Realizado por: Carlos Orbea

4.3.2 *Isoterma de Langmuir para la adsorción de arsénico sobre hueso anorgánico en agitación de orbital shaker*

En la figura 10-4 se observa la forma linealizada de la isoterma de Langmuir. Este es un modelo matemático con el objetivo de conseguir esta isoterma y sus constantes. Dando como resultados un valor de K igual a $0,344 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$ y un valor de q_m igual a $0,602 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Los datos se encuentran en el anexo L (d).

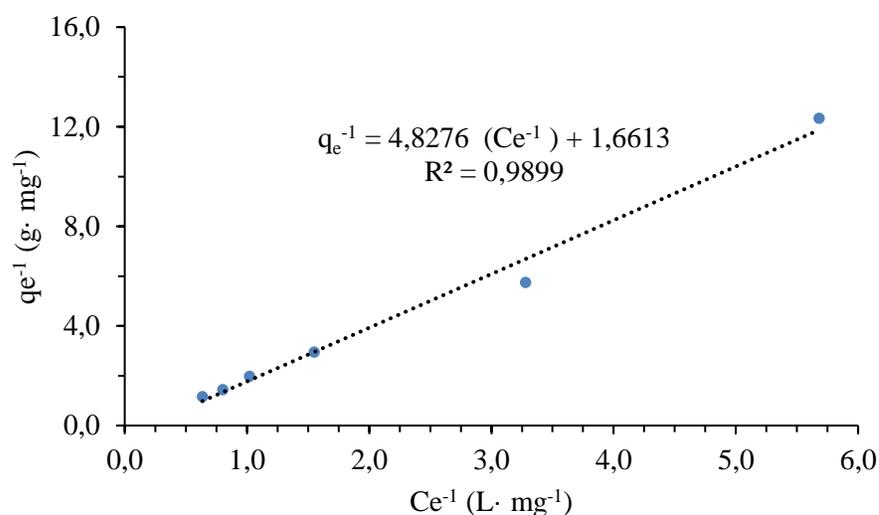


Figura 10-4. Isoterma de Langmuir de la adsorción de arsénico sobre el hueso anorgánico
Realizado por: Carlos Orbea

4.4 Experimentación realizada en el filtro

4.4.1 *Medición de arsénico en agua tratada que atraviesa el filtro, empleando la muestra de hueso anorgánico del tratamiento BT.Y.t₂.*

El filtro fue implementado en un hogar de Toacaso localizado en las calles Princesa Toa y Catzu con coordenadas $0^{\circ}45'23'' \text{ S}$; $78^{\circ}41'15'' \text{ O}$.

Las funciones del filtro son:

- ✓ Receptar agua de la tubería de ingreso que es proveniente de la planta de tratamiento local.
- ✓ Recircular el agua de ingreso para hacer contacto con el hueso adsorbente que se encuentra empaquetado dentro una malla número 250 dentro del reservorio, con agitación y empleando una bomba sumergible y mangueras.
- ✓ Proveer del agua necesaria acorde a la necesidad de la familia a través de la activación de la electroválvula.

El horario de muestreo inicia a las 5:45:00 a.m. del 11 de marzo del presente, esto es el tiempo cero de muestreo. Con agitación permanente durante todo el ciclo de tres días. Culminando el ciclo a las 15:00 del 13 de marzo del presente. Los resultados de la concentración de arsénico para el ciclo luego de pasar el filtro se reportan en la tabla 4-4.

Tabla 4-4. Concentración de arsénico en el agua empleando el filtro

No muestra	Horario de muestreo	Concentración As. mg L ⁻¹	No horas transcurridas	Remoción %	Tiempo de tratamiento (min)
1	11/03/2020 5:45:00 a. m	0,047	0	0,00	0
2	11/03/2020 1:45:00 p. m	0,046	8	2,12	0
3	12/03/2020 5:20:00 a. m.	0,043	23	8,51	35
4	12/03/2020 1:11:00 p. m.	0,040	30	14,89	51
5	13/03/2020 5:30:00 a. m.	0,038	46	19,14	19
6	13/03/2020 1:15:00 p. m.	0,038	53	19,14	45

Realizado por: Carlos Orbea

4.5 Tiempo de equilibrio

4.5.1 *Para pruebas en el agua que atraviesa el filtro.*

En la figura 11-4 se aprecia gráficamente la disminución de la concentración de arsénico en función del tiempo. En los primeros cuatro tiempos del ciclo existe adsorción de arsénico sobre el hueso anorgánico en el flujo de agua en condiciones reales en el hogar de Toacaso. A las 46 horas y 19

minutos, tiempo en el cual se alcanza el equilibrio, tiene una remoción del 19,15%. Se alcanza el equilibrio entre la adsorción y desorción en las condiciones del filtro y la gráfica se torna lineal. Los datos se encuentran en el anexo L (a).

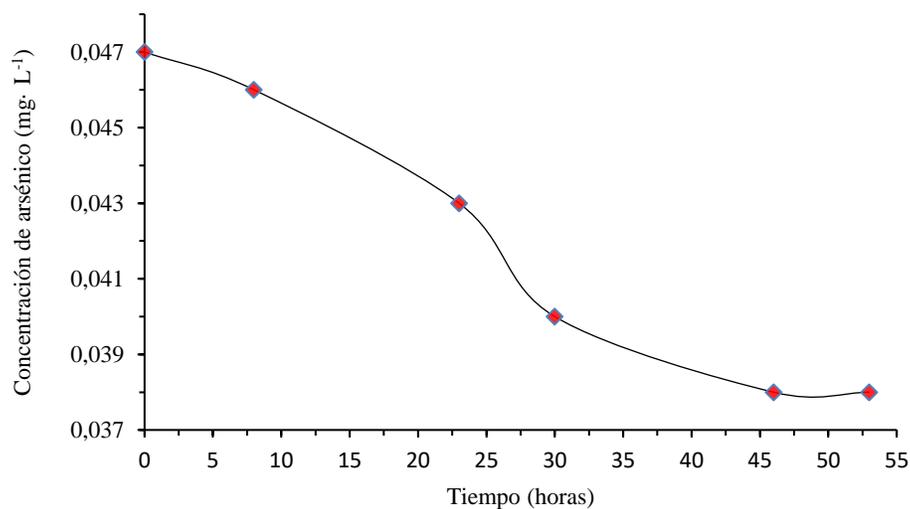


Figura 11-4. Tiempo de equilibrio de la adsorción del tratamiento BT.Y.t2, en el filtro
Realizado por: Carlos Orbea 2019.

Se aprecia que, por la reducción progresiva de la concentración de arsénico ha existido el fenómeno de atracción de moléculas de la superficie del sólido hueso anorgánico (adsorbente), y el elemento arsénico (adsorbato) en el seno del fluido, con una baja eficiencia no apta para reducir la concentración a niveles normados permisibles, se presume que es por el tipo de agitación. La figura 12-4, indica la capacidad de adsorción del hueso anorgánico en función del tiempo de equilibrio. Obteniéndose un valor de 0,00225 mg de arsénico por cada gramo de hueso anorgánico.

$$q_e = \frac{(C_o - C_f)V}{m}$$

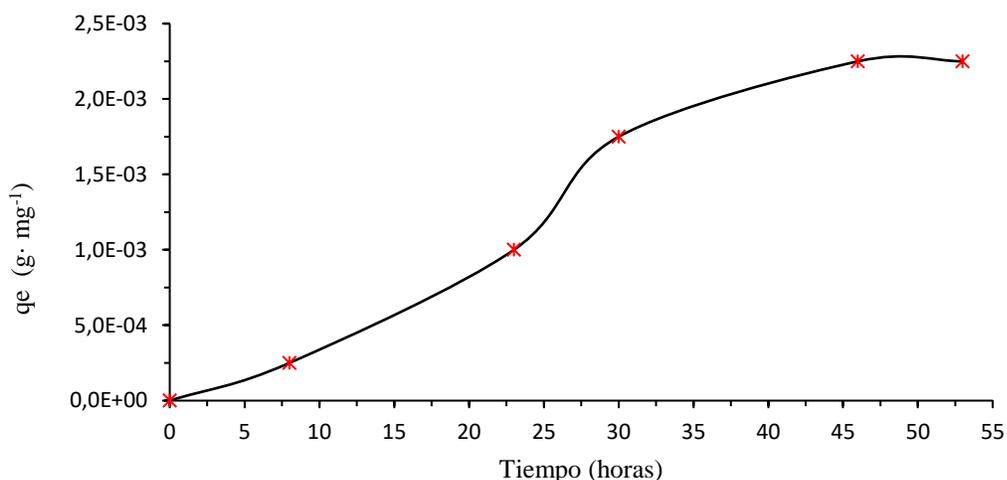


Figura 12-4. Tiempo de equilibrio y capacidad de adsorción del tratamiento en el filtro

Realizado por: Carlos Orbea 2019.

El diseño se puede modificar buscando simuPRPlar en dispositivos patentados como el filtro Kanchan con número de patente CN205740528 e ir realizando pruebas con este diseño en el cual no existe agitación permanente. Otra posibilidad es estudiar la posibilidad de realizar un lecho adsorbente empacado con hueso anorgánico, para que con el aprovechamiento de la gravedad se mejore la eficiencia y bajar costos.

La adsorción no es un proceso selectivo. Las cargas superficiales del adsorbente eléctricamente afines a los demás solutos dispersos son interferentes del arsénico en la superficie del adsorbente, habiendo una competencia por ocupar los sitios activos libres.

4.6 Caracterización del hueso anorgánico.

Los resultados de los siguientes ensayos permiten el carácter físico-químico del hueso anorgánico, describir su morfología superficial y los grupos funcionales presentes en el compuesto.

4.6.1 Microscopía SEM-EDS

Este análisis superficial permitió distinguir la morfología, tamaño y distribución de los poros. Se evidenció formas no definidas. En la figura 13-4 se aprecia la imagen microscópica obtenida del hueso anorgánico empleado en el tratamiento BT.Y.t₂.

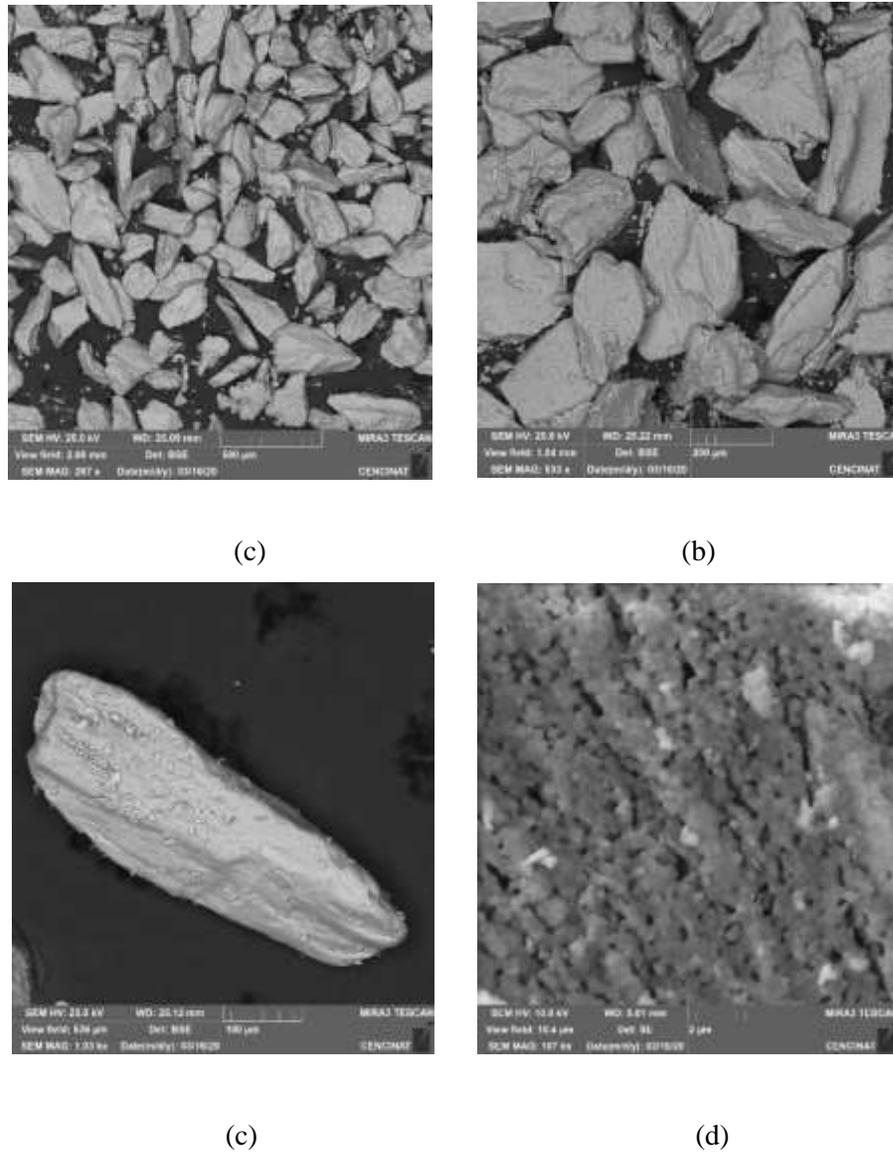


Figura 13-4. Microscopía SEM de hueso anorgánico. Con aumentos (a) 267X; (b) 533X; (c) 1,03KX y (d) 107KX.

Realizado por: Carlos Orbea, 2019

En la figura 4-13 a, se observa gránulos amorfos, mientras que en la figura 4-13 b se evidencia gránulos amorfos de textura plana delgada e irregular. La figura 4-13 c presenta gránulos individuales alargado rectangular puntiagudo, paralelepípedo, de superficie irregular porosa. Existe polidispersión de tamaños. Presencia de incrustaciones laminares pequeñas.

En la figura 4-13 d se aprecia una vista frontal parcial del hueso esponjoso calcinado, magnificación 107 kx, se visualiza la textura interna de un macroporo. Los poros menores están muy interconectados y casi obstruidos con irregularidades en la superficie. Se observa además una superficie irregular porosa granular con poros. Los gránulos forman hileras que se entretajan para formar algunos poros o huecos. El tamaño promedio de la partícula de hueso anorgánico es 0,064 nm determinado con el programa ImageJ. El tamaño promedio del poro es 0,0024 nm determinado con el programa ImageJ. En la tabla 5-4 se reporta del análisis elemental promedio captado en veinte puntos y realizado por el componente del equipo SEM-ED.

Tabla 5-4. Análisis de la composición del hueso anorgánico por SEM-EDS

Spectrum	C	O	Na	Mg	P	Ca
Mean value %:	5,07	51,29	0,89	0,57	15,65	42,52

Realizado por: Carlos Orbea, 2020

Hay alto contenido de Calcio y Oxígeno con bajo contenido de Magnesio en el hueso anorgánico. Presencia de Carbono en forma de carbonatos. La relación Ca/P tiene un valor de 2,12. Se presume que un factor incidente es la alimentación del ganado que en su dieta incluyó alimentos ricos en Calcio que se fijó en parte de su sistema óseo.

4.6.2 Difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés)

Los resultados del difractograma fueron trasladados al programa de licencia libre MATCH 3.0 con el propósito de interpretar y obtener la característica estructural de la sustancia que compone el hueso anorgánico obtenido. El difractograma de la figura 4-14 nos indica los picos de una estructura cristalina de HA en 1 hora de análisis en el difractómetro de Rayos X PANalytical EMPYREAN Series 2 bajo las siguientes consideraciones:

Scan mode: Continuous

Start angle (°): 5,0000

End angle (°): 90,0030

Step size (°): 0,0167

Time per step (s): 40,05

Net time per step (s): 40,05

Scan speed (° · s⁻¹): 0,000417

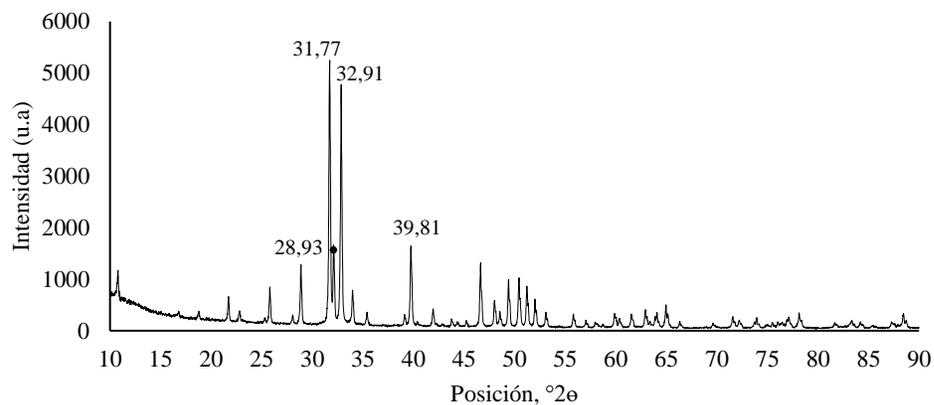


Figura 14-4. Difractograma de rayos X del hueso anorgánico del tratamiento BT.Y.t₂.

Realizado por: Carlos Orbea, 2020

En la figura 14-4 se observa el pico principal de la hidroxiapatita, con la mayor intensidad a $2\theta = 31,77$ correspondiente al plano (211), acompañado por dos de menor intensidad a $2\theta = 32,91$ y $2\theta = 39,81$ correspondientes a los planos (112) y (310) respectivamente. Además, se observa la presencia de un pico a $2\theta = 28,93$ de menor intensidad, evidenciando la presencia de otro fosfato de calcio. A la temperatura de 650 °C hay cristalinidad, esto puede ser asociado al transporte de masa por la coalescencia de los granos.

4.6.3 Espectroscopía Infrarrojo. FT-IR

Para encontrar picos característicos en la sustancia que compone el hueso anorgánico y conseguir la caracterización de su composición química se realizó una espectroscopia infrarroja con Transformadas de Fourier como se indica en la figura 4-15. Se observó que en la muestra se encuentran presentes los modos vibracionales de las bandas cercanas a los grupos fosfatos $(\text{PO}_4)^{3-}$ en el pico 1023 cm^{-1} , se le atribuye al grupo hidroxilo $(\text{OH})^-$ el pico a 633 cm^{-1} y el grupo carbonato $(\text{CO}_3)^{2-}$ en el pico 1411 cm^{-1} característicos de una HA amorfa. Una HA típica muestra bandas para un espectro FTIR en $3.600, 3.569, 3.578, 3.448$ y 633 cm^{-1} correspondientes a grupos OH^- , bandas en $474, 571, 601, 692, 1.032, 1.040, \approx 1.087, 1.092 \text{ cm}^{-1}$ correspondientes a grupos $(\text{PO}_4)^{3-}$ y bandas entre $870, 1.420$ y 1.480 cm^{-1} si la muestra contiene grupo $(\text{CO}_3)^{2-}$ (Marín, Escoba y Ossa, 2008).

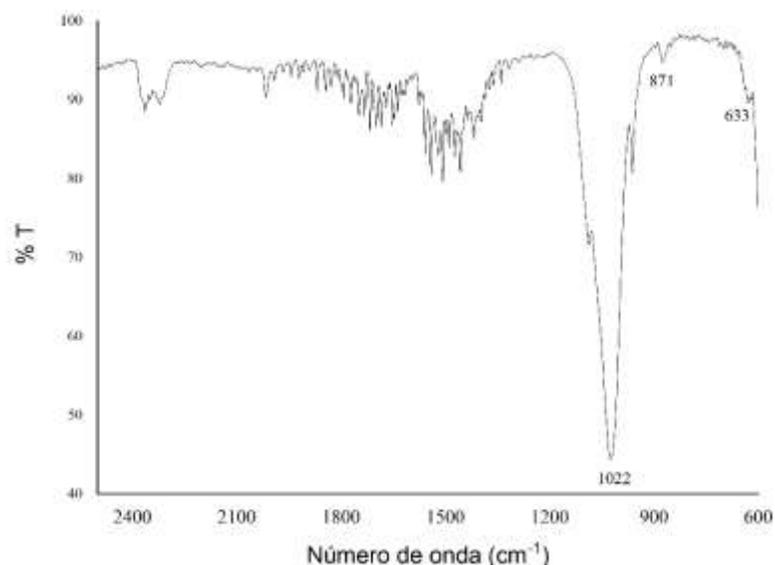


Figura 15-4. Espectro FT-IR del hueso anorgánico del tratamiento BT.Y.t₂.

Realizado por: Carlos Orbea, 2020.

4.7 Análisis estadístico

Los resultados de los 27 tratamientos se analizaron estadísticamente con la opción análisis de datos en Excel para deducir como las condiciones de temperatura de calcinación, masa de hueso anorgánico y tiempo de agitación inciden sobre el porcentaje de adsorción de arsénico sobre el hueso anorgánico. En la tabla 6-4 están los valores de la tabla de ANOVA, donde el valor de

probabilidad es menor al 5% y lleva a concluir que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Tabla 6-4. Anova general de los resultados para análisis en reactor Batch

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	34836,85	2	17418,42	229,37	2,14E-33	3,11
Dentro de los grupos	5923,42	78	75,94			
Total	40760,27	80				

Realizado por: Carlos Orbea, 2020.

En las tablas 7-4, 8-4 y 9-4 se indican las tablas ANOVA para los tratamientos con temperatura de calcinación de 450 °C, 600 °C y 750 °C respectivamente.

Tabla 7-4. ANOVA para los tratamientos del hueso anorgánico obtenido a 450°C

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,53	1	0,53	56,50	1,23E-06	4,49
Dentro de los grupos	0,15	16	0,01			
Total	0,68	17				

Realizado por: Carlos Orbea, 2020.

Tabla 8-4. ANOVA para los tratamientos del hueso anorgánico obtenido a 600°C

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,39	1	0,39	38,39	1,28E-05	4,49
Dentro de los grupos	0,16	16	0,01			
Total	0,56	17				

Realizado por: Carlos Orbea, 2020.

Tabla 9-4. ANOVA para los tratamientos del hueso anorgánico obtenido a 750 °C

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,14	1	0,14	9,13	8,10E-03	4,49
Dentro de los grupos	0,24	16	0,02			
Total	0,38	17				

Realizado por: Carlos Orbea, 2020.

Se distingue que los valores de probabilidad son menores conforme las temperaturas de calcinación son mayores. Todas las probabilidades son inferiores a la probabilidad del análisis ANOVA general.

4.7.1 Prueba de Wilcoxon.

En la tabla 10-4 se presenta el reporte del programa PSPP 23, donde se realizó el análisis W de Wilcoxon para dos muestras emparejadas, el cual es equivalente a realizar un análisis de la curva Z para distribución normal. Con este análisis se permite deducir el tipo de estadística a la cual son correspondientes los tratamientos.

Tabla 10-4. Prueba de Rangos con signo de Wilcoxon

Porcentaje de adsorción Concentración de arsénico	N	Rango promedio	Suma de rangos
Rangos negativos	4 ^a	4,00	16,00
Rangos positivos	23 ^b	15,74	362,00
Empates	0 ^c		
Total	27		

a. Porcentaje de adsorción < Concentración de arsénico

b. Porcentaje de adsorción > Concentración de arsénico

c. Porcentaje de adsorción = Concentración de arsénico

Realizado por: Carlos Orbea, 2020.

En la tabla 11-4 se presenta el reporte del análisis para la curva Z y la simetría de la curva general para los tratamientos cuando los reportes se presentan con dos variables de respuesta que se encuentran emparejadas.

Tabla 11-4. Estadísticos de prueba

	Porcentaje de adsorción – Concentración de arsénico
Z	-4,157 ^b
Sig. Asintótica (bilateral)	0,000

Realizado por: Carlos Orbea, 2020.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

Parámetros que definen las condiciones en la comunidad:

Número de usuarios. $N = 850$ personas

Caudal de entrada a la planta de potabilización. $Q_e = 12 \text{ L} \cdot \text{seg}^{-1}$

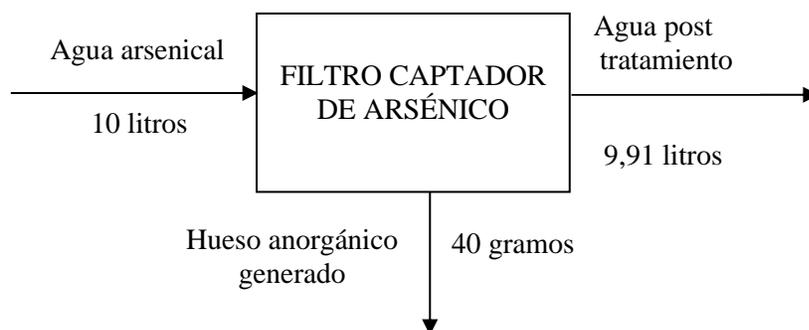
Parámetros de funcionamiento del filtro:

Tiempo de equilibrio. $T_e = 53$ horas

Adsorción de arsénico $A_{ds} = 67,97 \% A_s$

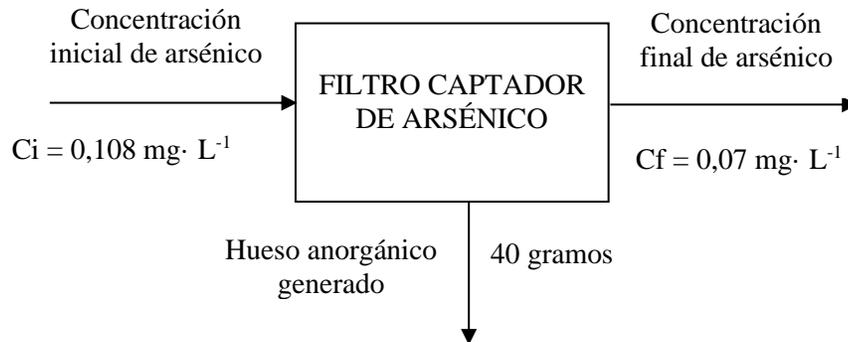
Balance de materia para el flujo de agua.

El balance se realizó para cincuenta y tres horas continuas de operación del filtro, referenciando la máxima capacidad de adsorción y su respectivo tiempo de equilibrio.



Balance de materia para la adsorción de arsénico.

El balance se realizó para cincuenta y tres horas continuas de operación del filtro, referenciando la máxima capacidad de adsorción y su respectivo tiempo de equilibrio.



Para abastecer de agua con arsénico removido a la población durante un día, la capacidad del tanque de remoción debe tener la capacidad:

$$\left| \frac{850 \text{ personas}}{24 \text{ horas}} \right| \left| \frac{53 \text{ horas} \cdot 10 \text{ litros}}{5 \text{ personas}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} \right| = 3,75 \text{ m}^3$$

Generando una cantidad de hueso anorgánico luego de la adsorción.

$$3754 \text{ litros} \left| \frac{40 \text{ gramos}}{10 \text{ litros}} \right| \left| \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gramos}} \right| = 15,02 \text{ Kg}$$

CONCLUSIONES.

Mediante procesos de hervido, trituración, molienda, tamizado y calcinación de la diáfisis bovina se obtuvo hueso anorgánico, de alto contenido (73%) del mineral hidroxiapatita que se empleó como captador del arsénico dentro de un filtro. El polvo cristalino de hueso anorgánico es insoluble en agua y es adsorbente de arsénico. La eficiencia de obtención del hueso anorgánico fue de 26,75% en las mejores condiciones.

Mediante FTIR se corroboró la existencia de los grupos funcionales hidroxilo OH^- , fosfato $(\text{PO}_4)^{3-}$ y carbonato $(\text{CO}_3)^{2-}$, pertenecientes a la estructura de la hidroxiapatita. Las micrografías SEM permitieron evidenciar la formación de nanomateriales porosos de tamaño 0,064 nm con porosidades de 0,0024 nm. El espectro de DRX confirma la existencia de Calcio, Fósforo, Oxígeno e Hidrógeno en los ángulos de difracción 31,77; 32,91 y 39,81 característico de la hidroxiapatita, además se pudo evidenciar contaminación por carbono.

El tratamiento realizado a escala de laboratorio con mayor eficiencia de remoción fue empleando el reactor Batch, con 0,2 gramos de hueso (obtenido a 600 °C de calcinación) en 50,0 mL de muestra de agua tratada de la parroquia Toacaso-Cotopaxi, agitando por 20 min a 150 rpm, con lo cual se logró una remoción del 67,947% de arsénico por adsorción.

Los resultados encontrados en este trabajo podrían dar solución problema sanitario, por contaminación del agua con arsénico, de la parroquia Toacaso. Ya que esta tecnología es barata y fácil de implementar.

RECOMENDACIONES.

Realizar estudios de regeneración de los materiales, a fin de optimizar los recursos y disminuir los costos debido a la compra de materiales nuevos.

Se debe realizar condiciones de agitación más intensas, con 200 rpm y durante tiempo más prolongados, por una hora, en todos los tratamientos a escala del reactor discontinuo Batch. Condiciones que no han sido consideradas en las variables de esta investigación pero que pueden aplicarse antes de hacer las mediciones de concentración de arsénico. Para comparar y comprobar una nueva efectividad del hueso anorgánico como adsorbente y vincular con una nueva eficiencia del filtro.

El rendimiento de 26,75 % de hueso anorgánico puede ser elevado al emplear las partículas retenidas en la malla del tamiz de mayor tamaño a 63 micras para ser pulverizadas en el molino de bolas. Y nuevamente repetir el procedimiento desde el tamizaje. Emplear malla número 350 para empaquetar un hueso anorgánico de menor tamaño de partícula tratando de mejorar los rendimientos de obtención de hueso. Las pérdidas en molienda y tamizaje son altas.

La concentración de arsénico de 0,205 ppm en el agua tratada de Toacaso evidencia que no se puede considerar un agua adecuada para el consumo humano. Han existido factores naturales y antropogénicos que son difíciles de suprimir sumado a la cultura tradicional de consumo del agua arsenical en la comunidad lleva a concluir que se debe disponer de métodos accesibles como el filtro de hueso anorgánico con el que se debe desarrollar análisis de mejora de variables que eleven su eficiencia.

Para ampliar y complementar a la presente investigación se debe realizar estudios de regeneración de materiales para reducir el tiempo, y costos invertidos bajo esta forma de producir hueso anorgánico.

BIBLIOGRAFÍA

- AGNIESZKA SOBCZAK*, Z. K. (2009). Preparation of hydroxyapatite from animal bones. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 23-28.
- Akram, M., Ahmed, R., Shakir, I., Aini, W., Ibrahim, W., & Hussain, R. (2014). Extracting hydroxyapatite and its precursors from natural resources. *J Mater Sci*, 1461–1475.
- Amin, M., Kaneco, S., Kitagawa, T., Begum, A., Katsumata, H., Suzuki, T., & Ohta, K. (2006). Removal of Arsenic in Aqueous Solutions by Adsorption onto Waste Rice Husk. *Ind. Eng. Chem. Res.* , 8105-8110.
- Asqui, P. (2018). Estudio de dos sistemas de remoción de fluoruros para su aplicación en zonas andinas: alúmina activada y bentonita modificada. (*tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Barka, N., Qourzal, S., Assabbane, A., Nounah, A., & Ait-Ichou, Y. (2010). Removal of Reactive Yellow 84 from aqueous solutions by adsorption onto hydroxyapatite. *Journal of Saudi Chemical Society*, 263–267.
- Becerril, J. E. (2009). Contaminantes emergentes en el agua. *Revista digital universitaria*, 1-7.
- Bundschuh, J., Perez, A., & Litter, M. (2008). *Distribución del Arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. Buenos Aires: CYTED.
- Carballo, L. (2002). *Introducción a la catálisis heterogénea*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chávez, M., & Miglio, M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Rev Soc Quím Perú*, 307-314.
- Chutia, P., Kato, S., Kojima, T., & Satokawa, S. (2009). Arsenic adsorption from aqueous solution on synthetic zeolites. *Journal of Hazardous Materials. ELSEVIER*, 440-447.
- Cumbal, L., Vallejo, P., Rodriguez, B., & Lopez, D. (2010). Arsenic in geothermal sources at the north-central Andean region of Ecuador: concentrations and mechanisms of mobility. *Environ Earth Sci*, 299–310.
- Equilibrium and kinetics studies of heavy metal ions biosorption on green algae waste biomass. (2012). *Bioresource Technology*., 489-493.
- Escalera, R., & Ormachea, M. (2017). Hidroquímica de la presencia natural de arsénico en aguas subterráneas de áreas suburbanas de Cochabamba-Bolivia y evaluación de la viabilidad técnica de procesos de remoción. *Investigación y Desarrollo*, 27-41.
- Franco, F., & Carro, M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 177-190.

- Gaceta, L. (9 de Octubre de 2018). Agua de tres parroquias posiblemente contaminadas con arsénico. *LA GACETA*, pág. 7.
- García, N. (2014). Una nueva generación de carbones activados da altas prestaciones para aplicaciones medioambientales. (*tesis doctoral*). Universidad de Oviedo, Oviedo.
- Hora, D. L. (18 de Octubre de 2018). Arsénico contamina el agua de las parroquias. *Arsénico contamina el agua de las parroquias*.
- IARC. (2016). *Agents classified by the IARC monographs. Volumes 1-115. Lyon, France*. Obtenido de http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php
- Kumar, C. (2015). Status and mitigation of arsenic contamination in groundwater in India. *The International Journal of Earth & Environmental Sciences*, 1-10.
- Litter, M., Sancha, A. M., & Ingallinella, A. M. (2010). *Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas*. Buenos Aires: CYTED.
- Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 145-153.
- Lozano, A., & Lozano, G. (2015). Potabilización del Agua. Principios de Diseño, Control de Proceso y Laboratorio. En G. L. William Antonio Lozano., *Potabilización del Agua. Principios de Diseño, Control de Proceso y Laboratorio* (págs. 360, 361). Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- Ma, J., Lei, E., Lei, M., Liu, Y., & Chen, T. (2018). Remediation of Arsenic contaminated soil using malposed intercropping of *Pteris vittata* L. y maíz. . *Quemosfera*, 737–744.
- Marín, N., Escobar, D., & Ossa, C. (2008). Síntesis y caracterización de hidroxapatita microporosa, comparación con un producto comercial. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 67-76.
- Martínez, A. (2012). *Fisicoquímica de interfases y superficies*. México: Universidad Autónoma de Coahuila. Facultad de Ciencias Químicas.
- Martinson, C., & Reddy, K. (2009). Adsorption of arsenic(III) and arsenic(V) by cupric oxide nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 406-411.
- Medina, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Ingesta de Arsénico: El Impacto en la Alimentación. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 93-102.
- Mendoza, O., Ramón, S., Barrón, J., Cuevas, H., Escalante, P., & Solano, R. (2017). Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *Salud Pública*, 34-40.
- Meza, D., Figueroa, I., Flores, C., & Piña, M. (2011). Nano hydroxyapatite crystals obtained by colloidal solution. *Revista Mexicana de Física*, 471–474.

- Minaverri, C., & Cáceres, V. (2016). La problemática del arsénico en el servicio de agua en la provincia de buenos aires, Argentina. Análisis de casos jurisprudenciales. *Revista Internacional de Contaminación y Ambiente*, 69-76.
- Mohan, D., & Pittman, C. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 1-53.
- Moreno-Rivas, S. C., & Ramos-Clamont Montfort, G. (2018). Descontaminación de arsénico, cadmio y plomo en agua por biosorción con *Saccharomyces cerevisiae*. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 51-68.
- Nam, S.-W., Jung, C., Li, H., Yu, M., Flora, J. R., Boateng, L. K., . . . Yoon, Y. (2015). Adsorption characteristics of diclofenac and sulfamethoxazole to graphene oxide in aqueous solution. *Chemosphere*, 20-26.
- Organización Mundial de la Salud. (15 de Febrero de 2018). *Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Putila, J., & Lan, N. (2011). Association of Arsenic Exposure with Lung Cancer Incidence Rates in the United States. *Plos. One*, 1-10.
- Rodríguez, H., Peña, M., Ana, G., González, C., Montes, S., & López, G. (2017). Biorremediación de arsénico mediada por microorganismos genéticamente modificados. *Terra Latinoamericana* , 353-361.
- Roy, P., Kumar, N., Bhattacharya, S., Das, B., & Das, K. (2013). Removal of arsenic(III) and arsenic(V) on chemically modified low-cost adsorbent: batch and column operations. *Appl Water Sci*, 293-309.
- Saha, J., Dikshit, A., & Bandyopadhyay, M. (2010). A review of arsenic poisoning and its effects on human health. *Critical reviews in environmental science and technology*, 281-313.
- Sahún, B., Gómez, J., Lillo, J., & del Olmo, P. (2004). Arsénico en aguas subterráneas e interacción agua-roca: un ejemplo en la cuenca terciaria del Duero (Castilla y León, España). *Rev. Soc. Geol. de España*, 137-155.
- Sims, D., Hudson, A., Keller, J., Konstantinos, V., & Konstantinos, M. (2015). Trace element scavenging in dry wash surficial sediments in an arid region of Southern Nevada, USA. *CrossMark*, 1-9.

ANEXOS

ANEXO A. Espectrofotómetro de Absorción Atómica



ANEXO B. Agitador mecánico del tipo orbital shaker



ANEXO C. Espectrofotómetro Infrarrojo FTIR. Para la caracterización del hueso anorgánico.



Realizado por: Carlos Orbea, 2019

ANEXO D. Microscopio SEM-EDS para análisis cristalográfico y análisis elemental.



Realizado por: Carlos Orbea, 2020

ANEXO E. Difractómetro de Rayos X para parámetros cristalográficos.



Realizado por: Carlos Orbea, 2020

ANEXO F. Molinos de trituración.

1. Molino de martillos (marca: Karl Kolb; tamaño de partícula: 2-6 mm)
2. Molino de cuchillas (marca: Thomas; tamaño de partícula: 2-6 mm)
3. Molino de corte (marca: Retsch; serie: SM 300; tamaño de partícula: 0,25 – 20 mm)
4. Molino ultracentrífugo (marca: Retsch; Serie: ZM 200; tamaño de partícula: 10 mm – 40 μm)
5. Molino de bolas (construcción artesanal; tamaño de partícula: $<63 \mu\text{m}$).



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)

Realizado por: Carlos Orbea, 2019

ANEXO G. Tamices de mallas #250, #150 y #80



Realizado por: Carlos Orbea, 2019

ANEXO H. Mufla para la calcinación del hueso anorgánico a 450 °C, 600 °C y 750 °C.



Realizado por: Carlos Orbea, 2019

ANEXO I. Aspecto del hueso anorgánico luego de la calcinación



Realizado por: Carlos Orbea, 2019

ANEXO J. Datos experimentales de modelos isotérmicos de equilibrio.

1) Resultados de tiempo de equilibrio.

a. Valores de condiciones de equilibrio para la construcción de isothermas de adsorción de alúmina activada. Tiempo de equilibrio (53 horas).

Concentración de arsénico, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Tiempo transcurrido, horas
0,047	0
0,046	8
0,043	23
0,040	30
0,038	46
0,038	53

a. Datos experimentales no linealizados de modelos isotérmicos de Freundlich para hueso anorgánico en el filtro.

Condiciones iniciales:

Concentración inicial $C_i = 0,047 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

pH = 6,83

$C_f, \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$C_i - C_f, \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$q_e, \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	tiempo horas
0,047	0,000	0,00000	0
0,046	0,001	0,00025	8
0,043	0,004	0,00100	23
0,040	0,007	0,00175	30
0,038	0,009	0,00225	46
0,038	0,009	0,00225	53

b. Datos experimentales linealizados de modelos isotérmicos de Freundlich para hueso anorgánico en reactor Batch

d. Datos experimentales para las isothermas de los modelos matemáticos para hueso anorgánico en reactor Batch.

Condiciones iniciales:

masa m de hueso anorgánico = 40,0 g $\cdot \text{L}^{-1}$

m, g· L ⁻¹	C ₀ , mg· L ⁻¹	C _f	C _e ⁻¹	Remoción, %	q _e	q _e ⁻¹	log C _e	log q _e
4	5,00	1,575	0,635	68,50	0,8563	1,17	0,197	-0,067
4	4,00	1,245	0,803	68,88	0,6888	1,45	0,095	-0,162
4	3,00	0,980	1,020	67,33	0,5050	1,98	-0,009	-0,297
4	2,00	0,645	1,550	67,75	0,3388	2,95	-0,190	-0,470
4	1,00	0,305	3,279	69,50	0,1738	5,76	-0,516	-0,760
4	0,50	0,176	5,682	64,80	0,0810	12,35	-0,754	-1,092

ANEXO K. Implementación del filtro en un hogar de Toacaso.





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS PARA EL
APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 09 / 03 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Carlos Fabián Orbea Hinojosa
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Instituto de Posgrado y Educación Continua
Título a optar: Magister en Ingeniería Química Aplicada
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.



Firmado digitalmente por:
LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS



0026-DBRAI-UPT-IPEC-2021



Carlos Orbea <carlosorbea79@gmail.com>

RV: TRADUCCIÓN IPEC

Centro de Idiomas <idiomas@espoeh.edu.ec>
Para: Carlos Orbea <carlosorbea79@gmail.com>

5 de marzo de 2021, 10:59

Centro de Idiomas
"Sabes para ser"

De: DORA ALEXANDRA CHUGUIMARCA ONCE <dora.chugumarca@espoeh.edu.ec>
Enviado: viernes, 5 de marzo de 2021, 18:23
Para: Centro de Idiomas <idiomas@espoeh.edu.ec>
Cc: Washington Gustavo Mancero Orcoo <washington.mancero@espoeh.edu.ec>
Asunto: RE: TRADUCCIÓN IPEC

Good evening,

The present email contains the thesis summary which was assigned to me.

Best regards,

Dora Chugumarca BSc
LANGUAGE CENTER PROFESSOR

De: Centro de Idiomas <idiomas@espoeh.edu.ec>
Enviado: lunes, 1 de marzo de 2021, 22:41
Para: DORA ALEXANDRA CHUGUIMARCA ONCE <dora.chugumarca@espoeh.edu.ec>
Asunto: RE: TRADUCCIÓN IPEC

Centro de Idiomas
"Sabes para ser"

De: Carlos Orbea <carlosorbea79@gmail.com>
Enviado: lunes, 1 de marzo de 2021, 12:43
Para: Centro de Idiomas <idiomas@espoeh.edu.ec>
Asunto: TRADUCCIÓN DE RESUMEN

Con un cordial saludo, envío informe del resumen para la traducción.
Atte:
CARLOS FABIAN ORBEA HINOJOSA
992417773
MAESTRIA EN QUIMICA APLICADA
Fonema conorte
0994435548

📎 **SUMMARY Ipec Carlos Orbea.pdf**
📄 Verificar como HTML, Descargar