



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR  
FILTRACIÓN CON HUESOS DE POLLO COMO MATERIAL FILTRANTE**

**Hernán Humberto Velásquez Navarro**

Asesorado por el Ing. Adrian Antonio Soberanis Ibañez

Guatemala, agosto de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR  
FILTRACIÓN CON HUESOS DE POLLO COMO MATERIAL FILTRANTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**HERNÁN HUMBERTO VELÁSQUEZ NAVARRO**

ASESORADO POR EL ING. ADRIAN ANTONIO SOBERANIS IBAÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR FILTRACIÓN CON HUESOS DE POLLO COMO MATERIAL FILTRANTE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de julio de 2015.



**Hernán Humberto Velásquez Navarro**



Guatemala, 29 de julio de 2015

Ingeniero

**VICTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ**

**DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

USAC

Respetable Señor Director:

Me dirijo a usted para informarle que a la presente fecha he revisado y aprobado el  
INFORME FINAL de trabajo de graduación, titulado:

**“EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR FILTRACIÓN CON HUESOS  
DE POLLO COMO MATERIAL FILTRANTE”**

del estudiante universitario **HERNÁN HUMBERTO VELÁSQUEZ NAVARRO**, con Número de  
carnet **2010-20691**, de quien estoy fungiendo como ASESOR.

Agradeciendo su atención a la presente, le saluda atentamente.

**Adrian Soberanis**  
Ingeniero Químico  
Colegiado 1515

Adrian Antonio Soberanis Ibañez

Ingeniero Químico, colegiado No. 1515



Guatemala, 06 de agosto de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.045.2015.

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **066-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por el estudiante universitario: **Hernán Humberto Velásquez Navarro**.  
Identificado con número de carné: **2010-20691**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR FILTRACIÓN  
CON HUESOS DE POLLO COMO MATERIAL FILTRANTE**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adrian Antonio Soberanis Ibañez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.104.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala; luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **HERNÁN HUBERTO VELÁSQUEZ NAVARRO** titulado: "EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR FILTRACIÓN CON HUESOS DE POLLO COMO MATERIAL FILTRANTE". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*




Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, agosto 2015

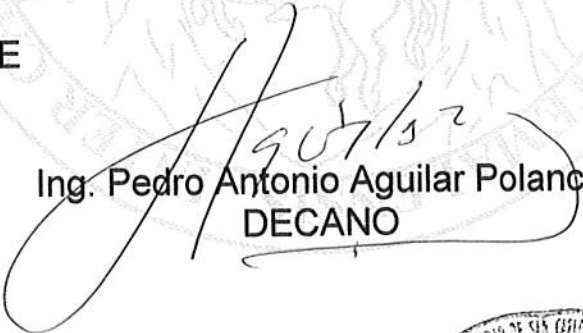
Cc: Archivo  
VMMV/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR FILTRACIÓN CON HUESOS DE POLLO COMO MATERIAL FILTRANTE**, presentado por el estudiante universitario: **Hernán Humberto Velásquez Navarro**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
DECANO

Guatemala, agosto de 2015



/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios y la Virgen María**

Infinitas gracias por la vida, por todas las bendiciones dadas y por las que en el futuro vendrán.

### **Mi padre**

Hernán Humberto Velásquez Méndez (q. e. p. d.) por sus sabios consejos, su apoyo, su inquebrantable fortaleza, enseñarme la responsabilidad y por acompañarme hasta donde la vida le dio la oportunidad, te agradezco con todo mi corazón. Espero te sientas orgulloso, hoy por fin podemos decir misión cumplida.

### **Mi madre**

Gumercinda Luz Navarro Velásquez, por su amor, su cariño, su lucha incansable, por todas sus oraciones, por confiar en mí y por enseñarme que se puede seguir adelante por sobre la adversidad. Te amo.

### **Mis hermanos**

Capitán Alexander Edilzar, Licda. Sandra Janeth e Inga. Gladis Elizabeth Velásquez Navarro, por su ejemplo, su apoyo incondicional y enseñarme que no existen los imposibles.

**Mi hermanita**

Andrea Isabel Velásquez Navarro (q. e. p. d.),  
ángel que desde el cielo me acompaña. Gracias  
por enseñarme a apreciar la vida.

**Mis abuelos**

Eulogio Velásquez y Gregoria Méndez  
(q. e. p. d.) Santiago Navarro y Luisa Velásquez  
(q. e. p. d.). En recuerdo a su memoria,  
peticiones al Divino Creador por el eterno  
descanso de su alma.

**Mis sobrinos**

Manyuri Andrea, Alexander Emmanuel  
Velásquez Gómez y Paola Michelle Pelaez  
Velásquez, por los momentos de felicidad y  
alegría que me han dado. Con todo cariño.

**Mis amigos y amigas**

Por estar en las buenas y en las malas,  
brindarme su amistad, enseñarme el valor del  
apoyo mutuo, así como el de la sinceridad.

**San Pedro Sac. San  
Marcos**

La tierra que me vio nacer, llevo conmigo el  
precedente de la humildad y del sacrificio

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad San Carlos de Guatemala</b>	Gloriosa y tricentenaria casa de estudios por permitirme llamarme con orgullo sancarlista.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por el conocimiento brindado, por recibirme en sus aulas y formarme como profesional.
<b>Departamento de Física</b>	Por haberme dado una oportunidad laboral, un ambiente agradable de trabajo y la oportunidad de conocer a personas únicas.
<b>Ing. Adrian Soberanis</b>	Por su asesoría, amistad y apoyo.
<b>Ing. Victor Monzón</b>	Por su orientación como revisor y como profesor a lo largo de la carrera.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis.....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Metales pesados.....	3
2.1.1. Hierro.....	3
2.1.2. Zinc.....	4
2.1.3. Aluminio.....	4
2.1.4. Plomo .....	5
2.2. Filtración .....	5
2.2.1. Clasificación de la filtración .....	5
2.2.2. Variables que afectan la filtración .....	7
2.3. Adsorción.....	8
2.3.1. Tipos de adsorción .....	9
2.3.1.1. Adsorción física .....	9
2.3.1.2. Quemisorción.....	9
2.4. Intercambio Iónico .....	10
2.4.1. Resina de intercambio iónico.....	10

2.5.	Intercambio iónico en columnas .....	11
2.5.1.	Expresión de la cantidad de resina .....	12
2.5.2.	Etapas del proceso.....	12
2.5.2.1.	Empaquetamiento de la columna .....	12
2.5.2.2.	Acondicionamiento del intercambiador.....	13
2.5.2.3.	Etapa de carga .....	13
2.5.2.4.	Etapa de regeneración .....	13
2.6.	Desproteneización.....	14
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
3.1.	Variables .....	15
3.1.1.	Variables de control.....	16
3.1.2.	Variables dependientes y respuesta .....	16
3.1.3.	Variables independientes .....	17
3.1.4.	Variables de medición .....	18
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	18
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	19
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	19
3.4.1.	Materia orgánica.....	19
3.4.2.	Materia inorgánica.....	19
3.4.3.	Cristalería y equipo .....	20
3.5.	Técnica cuantitativa.....	20
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	20
3.6.1.	Realización de la torta de filtración con huesos de pollo.....	21
3.6.2.	Recolección de materia prima (huesos de pollo).....	22
3.6.3.	Procedimiento de la desproteización .....	22
3.6.4.	Trituración de los huesos de pollo.....	22

3.6.5.	Realizar de la torta de filtración con los huesos de pollo .....	22
3.6.6.	Determinación de la eficiencia de remoción de metales pesados. ....	23
3.6.7.	Preparación de las soluciones a utilizar.....	24
3.6.8.	Preparación de las soluciones de acuerdo al pH establecido .....	24
3.6.9.	Realizar la filtración con la torta elaborada anteriormente .....	24
3.6.10.	Análisis de concentración final al volumen filtrado ....	24
3.6.11.	Determinación de corridas a realizar .....	25
3.6.12.	Determinación de la eficiencia de remoción en función del pH.....	26
3.6.13.	Comparación de la remoción obtenida con cada metal evaluado .....	26
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información ..	26
3.8.	Análisis estadístico .....	29
3.8.1.	Plan de análisis de los resultados .....	31
3.8.2.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables .....	31
3.8.3.	Programas a utilizar para análisis de datos .....	31
4.	RESULTADOS .....	33
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	39
	CONCLUSIONES .....	43
	RECOMENDACIONES .....	45
	BIBLIOGRAFÍA .....	47

APÉNDICES.....49

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Resinas en columnas.....	11
2.	Comparación columna de laboratorio y columna industrial.....	12
3.	Procedimiento para la realización de la torta de filtración.....	21
4.	Determinación de la eficiencia de la remoción de metales pesados.....	23
5.	Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de hierro.....	34
6.	Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de zinc.....	35
7.	Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de aluminio.....	36
8.	Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de plomo.....	37
9.	Comparación de la máxima remoción obtenida en función del metal evaluado.....	38

### TABLAS

I.	Determinación de variables de control a escala laboratorio.....	16
II.	Determinación de las variables dependientes a escala laboratorio.....	17
III.	Determinación de variables independientes a escala laboratorio.....	17
IV.	Determinación de las variables de medición a escala laboratorio.....	18



V.	Datos experimentales obtenidos de la remoción de metales pesados en agua.....	27
VI.	Tabulación de valores con respecto a la temperatura y tiempo.....	27
VII.	Resultados obtenidos con espectrofotómetro de absorción atómica a temperatura de 25 °C y un tiempo de 10 minutos después del inicio de la filtración.....	28
VIII.	Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de hierro .....	33
IX.	Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de zinc .....	34
X.	Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de aluminio .....	35
XI.	Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de plomo.....	36
XII.	Máximos valores para porcentajes de remoción de acuerdo al metal evaluado .....	37

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grados centígrados
g	Gramo
HAP	Hidroxiapatita
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mg/L	Miligramo por litro
min	Minutos
%R	Porcentaje de remoción
pH	Potencial de hidrógeno
t	Tiempo



## GLOSARIO

<b>Carga hidrostática</b>	Es la parte de la presión debida al peso de un fluido en reposo.
<b>Desproteínización</b>	La eliminación de la proteína a partir de una estructura biológica.
<b>Eficiencia</b>	Capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función.
<b>Flujo</b>	Movimiento de un fluido.
<b>Pirometalurgia</b>	Rama de la metalurgia y de la electrometalurgia, consistente en la obtención y refinación de los metales utilizando calor.
<b>Proteína</b>	Son moléculas formadas por cadenas lineales de aminoácidos.
<b>Remoción</b>	Acción y efecto de remover o removerse.
<b>Reticulación</b>	Es una reacción química presente en la química de los polímeros, implica la formación de una red tridimensional formada por la unión de las diferentes cadenas poliméricas homogéneas.

**Solución**

Es una mezcla de dos o más componentes, perfectamente homogénea ya que cada componente se mezcla íntimamente con el otro, de modo tal que pierden sus características individuales.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación tuvo por objetivo evaluar el diseño de un sistema de filtración para la remoción de metales pesados en agua, mediante el uso de huesos de pollo como agente filtrante, utilizando para su estudio sales de hierro, zinc, aluminio y plomo, y así determinar cuál de ellos se favorece en mayor proporción en cuanto al porcentaje de remoción.

El problema en estudio fue enfocado a la descontaminación de agua. También al uso de huesos de pollo como material filtrante, debido a que son considerados como residuos alimenticios, de esta manera se aprovecharán los mismos utilizándolos en un proceso útil.

Se hizo hincapié en la temática que se llevó a cabo para obtener datos experimentales en función de las variables a controlar, dichos parámetros fueron: concentración inicial, temperatura, niveles de pH y tratamientos previos como la desproteínización de los huesos de pollo.

Se determinó la concentración final de las soluciones por medio de las lecturas realizadas con espectrofotometría atómica. Asimismo, se analizó la remoción del contenido de metales en función del pH de la solución analizada, por medio de gráficas que muestran dicho comportamiento.

Los resultados finales fueron comparados y expuestos de tal manera que se logró determinar con cuál de los metales analizados es más eficiente la filtración.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar una evaluación del diseño de un sistema de filtración para la remoción de metales pesados en agua, mediante el uso de huesos de pollo como agente filtrante.

### **Específicos**

1. Elaborar una torta de filtración usando como material huesos de pollo triturados.
2. Determinar la eficiencia de remoción de metales pesados (Fe, Zn, Al, Pb) por medio de espectrofotometría de absorción atómica.
3. Analizar la eficiencia de remoción de los metales evaluados en función del pH de la solución analizada.
4. Comparar la remoción obtenida con el agente filtrante (hueso de pollo) y establecer con cuál de los metales evaluados es más efectivo dicho agente.



## **Hipótesis**

La aplicación de métodos de filtración en el agua mediante el uso de huesos de pollo como agente filtrante reduce la concentración de metales pesados.

## INTRODUCCIÓN

Dada las diferentes impurezas que se encuentran en el agua debido a la contaminación por descarga de efluentes que no se tratan adecuadamente, estos pueden ser una gran fuente de contaminación para los recursos hídricos de Guatemala.

La contaminación de agua ha llevado a desarrollar diferentes métodos para la eliminación de impurezas que puedan encontrarse en ella.

Actualmente para el tratamiento de agua en general se deben cumplir los siguientes criterios: combinación de barreras múltiples para alcanzar bajas condiciones de riesgo, tratamiento integrado para producir el efecto esperado y tratamiento por objetivo (cada etapa del tratamiento tiene una meta específica relacionada con algún tipo de contaminante), en el último caso el objeto de investigación es reducir los contaminantes de tipo metálico usando recursos domésticos disponibles y aprovechando los desechos alimenticios (en este caso los huesos de pollo).

El trabajo a realizar tiene como fin principal evaluar la remoción de los metales pesados del agua, usando como agente filtrante los huesos de pollo. Esto se quiere alcanzar debido a la importancia de conservar el medio ambiente y utilizar un residuo alimenticio como beneficio para el ser humano, por lo que para evitar dañar el entorno y a las personas que viven en él, se planea utilizar elementos que se puedan tener al alcance de cualquier persona.

El método propuesto consiste en la utilización de huesos de pollo como agente filtrante, para reducir la concentración de metales pesados presentes en el agua residual.

## 1. ANTECEDENTES

El primer intento de tratamiento de agua por filtración que tuvo éxito, fue en una pequeña planta de carbón vegetal, arena y grava, construida en 1855, para satisfacer los requisitos del municipio de Elizabeth, Nueva Jersey. Hacia el fin de 1860, ya se habían construido 136 plantas en los Estados Unidos y 10 en Canadá.

Durante los primeros quince años del siglo pasado se dieron grandes pasos en la construcción de numerosas plantas de filtración. El período que va de 1919 hasta la actualidad, ha sido el de perfeccionamiento de la operación y se prestó mucha atención al acondicionamiento apropiado del agua para la filtración.

En 1997, Carina Elizabeth Pacay Macz en su trabajo de graduación a nivel licenciatura, titulado *Análisis comparativo del diseño de sistemas de filtración para la potabilización de agua* estudió dos sistemas de filtración, uno de ellos fue filtración por presión y el otro filtración por gravedad; determinando que el sistema que se adapta de mejor manera a las necesidades evaluadas es el filtro por gravedad debido al mayor porcentaje de remoción alcanzado.

Asimismo, en 2012 Edward Mauricio Berrios Mendez, en su trabajo de graduación a nivel licenciatura, titulado *Eliminación de hierro ferroso por medio de oxidación y filtración multimedia, de agua de pozo utilizada en sistema de riego por goteo*, evaluó la eficiencia de la remoción de hierro ferroso utilizando soluciones de hipoclorito de sodio y aire, concluyendo que el hipoclorito de sodio en un 0,5 por ciento en peso reduce en un 86,56 por ciento el contenido

inicial de hierro ferroso en agua, mientras que usando como agente reductor el aire, la cantidad de hierro ferroso solamente se redujo en un 6,45 por ciento.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Metales pesados**

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para el ser humano. Muchos de los metales que tienen una densidad alta no son especialmente tóxicos y algunos son elementos esenciales en el ser humano, independientemente de que a determinadas concentraciones puedan ser considerados como tóxicos.

La toxicidad de los metales traza es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación.

#### **2.1.1. Hierro**

Debido a que la producción de hierro y acero se basa fundamentalmente en procedimientos pirometalúrgicos, las cuestiones de la contaminación atmosférica son prioritarias. Además de numerosos contaminantes gaseosos, las emisiones de polvo juegan un papel especial, no solo porque se generan en grandes cantidades, sino también por el hecho de que contienen algunas sustancias peligrosas para los seres humanos y el medio ambiente.

### **2.1.2. Zinc**

El zinc es un elemento que se puede acumular en diversos medios naturales como el agua, aire y suelo, y los organismos que los reciben adquieren severas enfermedades, tiene una larga persistencia, debido a los componentes con los que este puede actuar en su alrededor.

En la actualidad, una de las sustancias altamente contaminantes es el zinc, del cual existen diversas fuentes de contaminación y la mayoría han sido introducidas por medio de actividades antropogénicas, trayendo como consecuencia el decaimiento de los ecosistemas y graves efectos en el crecimiento de los seres vivos incluyendo al propio ser humano.

### **2.1.3. Aluminio**

El aluminio es el mineral más usado para la producción de productos de uso cotidiano. Con él se fabrican utensilios de cocina, latas para los refrescos, papel de aluminio, revestimientos de las viviendas, fabricación de electrodomésticos, recipientes, entre otros. Este mineral no se encuentra tal cual en la naturaleza, sino que se fabrica a partir de otros minerales y es el proceso de extracción de estos minerales y la transformación de los mismos en aluminio, lo que produce la contaminación.

La contaminación del aluminio es preocupante pues la industria del aluminio vierte millones de toneladas al año de gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono, que contribuyen al calentamiento global. Además del dióxido de carbono la fundición del aluminio también produce óxido de azufre y óxido de nitrógeno, gases muy tóxicos presentes en la lluvia ácida.

#### **2.1.4. Plomo**

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública.

Entre las principales fuentes de contaminación ambiental destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje y, en algunos países, el uso persistente de pinturas y gasolinas con plomo. Más de tres cuartas partes del consumo mundial de plomo corresponden a la fabricación de baterías de plomo-ácido para vehículos de motor.

### **2.2. Filtración**

La filtración ha evolucionado como un arte práctico, en vez de desarrollarse como una ciencia teórica. Sin embargo, la teoría de la filtración ha recibido una atención continua desde hace medio siglo.

#### **2.2.1. Clasificación de la filtración**

La filtración y los filtros se pueden clasificar en varias formas:

- Por la fuerza impulsora: se induce el flujo a filtrar por el medio filtrante mediante la carga hidrostática (gravedad), presión sobreatmosférica o vacío aplicada corriente arriba del medio filtrante, presión subatmosférica aplicada corriente abajo del citado medio o fuerza centrífuga a través de este último.



- Por el mecanismo de filtración. Aunque el mecanismo para la separación y acumulación de sólidos no se comprende claramente, dos modelos suelen ser considerados y constituyen la base para la aplicación de la teoría al proceso de filtración. Cuando los sólidos quedan detenidos en la superficie de un medio de filtración y se amontonan unos sobre otros para formar una torta de creciente espesor, la separación es conocida como filtración de torta. Cuando los sólidos quedan atrapados dentro de los poros o cuerpo del medio de filtración, se le denomina medio filtrante de profundidad, o filtración clarificadora.
- Por la función. La meta del proceso de filtración puede ser la obtención de sólidos secos, líquido clarificado o ambas cosas. La recuperación de buenos sólidos se obtiene mejor mediante la filtración de torta, mientras que la clarificación del líquido se logra ya sea por la filtración de profundidad o de torta.
- Por ciclo operacional. Los filtros pueden ser intermitentes o continuos y los filtros por lotes se pueden manejar con una fuerza impulsora de presión constante, a velocidad constante o en ciclos variables, con respecto tanto a la presión como a la velocidad. El ciclo por lotes puede variar grandemente, dependiendo del área de filtrado y la carga de sólidos.
- Por la naturaleza de los sólidos. La filtración de tortas puede incluir una acumulación de sólidos substancialmente incompresibles, que corresponden, más o menos, en la filtración de medio de filtro, a partículas deformables y rígidas. El tamaño de partículas o de agregados de partículas puede ser del mismo orden de magnitud que el tamaño de poros mínimos de la mayor parte de los medios de filtración.

### **2.2.2. Variables que afectan la filtración**

- El efecto de la presión, se modifica en la mayor parte de las filtraciones industriales, en donde la compresibilidad de la torta se encuentra por lo común entre 0,1 y 0,8 MPa. Además, la resistencia del medio de filtración reduce los efectos de las variables respectivas.
- El espesor de la torta es un factor importante para determinar la capacidad y el diseño de un filtro y el ciclo de operación depende de ella. La teoría de la filtración demuestra que, desdeñando la resistencia de las telas, la velocidad promedio de flujo durante una filtración es inversamente proporcional a la cantidad de torta depositada.
- El efecto de la viscosidad es como la indican las ecuaciones de velocidad: la velocidad de flujo de filtrado en cualquier instante es inversamente proporcional a la viscosidad de filtrado.
- El efecto de la temperatura sobre la velocidad de filtración de sólidos incompresibles es evidente, sobre todo, mediante su efecto sobre la viscosidad. La viscosidad de la mayor parte de los líquidos disminuye notablemente al elevarse la temperatura. Por ende, las temperaturas más altas permiten velocidades más elevadas de filtración; para el caso del agua, un aumento de 20 a 60 °C duplicaría la velocidad de flujo.
- El efecto del tamaño de partículas sobre la resistencia de la torta es muy notable. Incluso los cambios pequeños en el tamaño de partículas afectan la resistencia de la torta, y cambios mayores afectan la compresibilidad. El tamaño menor de partículas da como resultado

velocidades más bajas de filtración y contenido más alto de humedad en la torta; pero a veces, también una mayor eficiencia de lavado.

- El efecto del tipo de medio filtrante, no se reconoce con frecuencia en forma completa. En la selección del medio para una filtración dada, se debe alcanzar un equilibrio entre un tejido tan abierto como sea factible, para reducir los atascamientos y tan apretado como sea necesario, para evitar la purga excesiva de partículas finas.
- La cantidad de proteína, debido a que el agente filtrante es una sustancia orgánica, la misma contiene proteínas, las cuales pueden ser liberadas después de que el agente filtrante retenga los metales pesados, por tal motivo los huesos deben desproteinizarse antes de usarlos como filtro.

### **2.3. Adsorción**

Las operaciones de adsorción explotan la capacidad especial de ciertos sólidos para hacer que sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie de la misma. De esta forma, pueden separarse unos de otros los componentes de soluciones gaseosas o líquidas.

Cuando la mezcla por separar se pone en contacto con otra fase insoluble, el sólido adsorbente, y en el que la distinta distribución de los componentes originales entre la fase adsorbida en la superficie sólida y el fluido permite que se lleve a cabo una separación.

### **2.3.1. Tipos de adsorción**

Se debe distinguir para principiar entre dos tipos de fenómenos de adsorción: físicos y químicos.

El tipo de adsorbente utilizado depende de la solución por tratar. Con frecuencia, las soluciones acuosas se tratan con carbón activado, preparado especialmente para el uso que se le va a dar; los líquidos orgánicos, como aceites, generalmente se tratan con adsorbentes inorgánicos, como arcillas. A veces se utilizan adsorbentes mixtos. Se desea elevada selectividad frente al soluto que se va a separar, con el fin de reducir la cantidad de sólido que se agregará. De cualquier manera, el adsorbente se aplica en forma de un polvo molido muy finamente, de ordinario lo más finamente posible para que pase a través de una malla 200; con frecuencia es más fino todavía.

#### **2.3.1.1. Adsorción física**

También llamada adsorción de “van der Waals”, fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida.

#### **2.3.1.2. Quemisorción**

También llamada adsorción activada, es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La fuerza de la unión química puede variar considerablemente y puede suceder que no se formen compuestos químicos en el sentido usual; pero, la fuerza de adhesión es generalmente mucho mayor que la observada en la adsorción física.

## **2.4. Intercambio iónico**

El intercambio iónico es una operación unitaria, que tiene como función la separación, que está basada en la transferencia de materia fluido-sólido. Que involucra la transferencia de uno o más iones, de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido de la materia. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, siendo los más habituales los basados en resinas sintéticas.

El intercambio iónico está basado en la adsorción, que es un proceso de separación de ciertos componentes de una fase fluida hacia la superficie de un sólido adsorbente. Generalmente pequeñas partículas de adsorbente se mantienen en un lecho fijo mientras que el fluido pasa continuamente a través del lecho hasta que el sólido está prácticamente saturado y no es posible alcanzar ya la separación deseada, con lo cual el lecho se ha de regenerar.

### **2.4.1. Resina de intercambio iónico**

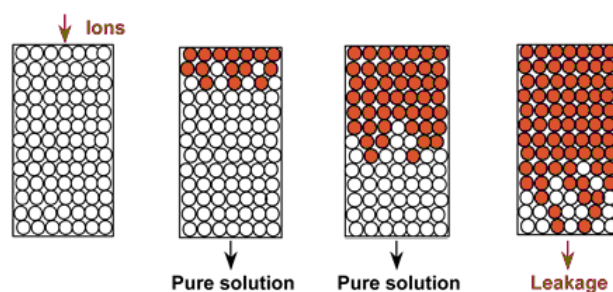
Una resina de intercambio iónico se considera como una estructura de cadenas hidrocarbonadas a las que se encuentran unidos de forma rígida los grupos iónicos libres. Estas cadenas están unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que proporciona rigidez a la resina y donde el grado de reticulación o entrecruzamiento determina la estructura porosa interna de la misma. Como los iones deben difundirse en el interior de la resina para que ocurra el intercambio, la selección del grado de reticulación puede de alguna manera limitar la movilidad de los iones participantes.

El funcionamiento de la resina también depende del pH del medio en el cual se utilice, la efectividad del intercambio iónico está en función de los valores del pH de la solución, algunas resinas funcionan mejor con valores de pH altos y otras con valores de pH bajos.

## 2.5. Intercambio iónico en columnas

Tanto en el laboratorio como en plantas industriales, las resinas funcionan en columnas. El agua o la solución de tratar pasa a través de la resina. En la figura 1 se ve la resina fresca, y luego cargada poco a poco con los iones de la solución de tratar. Iones cargados inicialmente en la resina migran en la solución tratada. Al final de la operación, algunos de estos iones "oscuros" escapan en la solución tratada (aparición de la fuga, o fin del ciclo) y se para la fase de agotamiento. Para este estudio la resina utilizada serán huesos de pollo.

Figura 1. Resinas en columnas

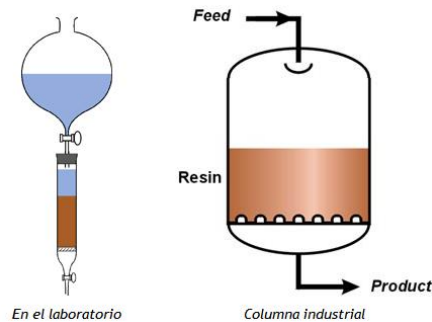


Fuente: *El intercambio iónico, principios básicos*. [http://dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html).

Consulta: julio de 2015.

Las imágenes siguientes ilustran una columna de laboratorio y una columna industrial simplificada.

Figura 2. **Comparación columna de laboratorio y columna industrial**



Fuente: *El intercambio iónico, principios básicos*. [http://dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html).

Consulta: julio de 2015.

### **2.5.1. Expresión de la cantidad de resina**

Para el diseño de una columna de intercambio iónico, lo importante es el volumen de resina y no su masa. Las resinas tienen distintos valores de densidad, así que estas se venden por unidad de volumen, en litros o metros cúbicos, o en pies cúbicos en los Estados Unidos. Muchas de las propiedades de las resinas se expresan también por volumen.

### **2.5.2. Etapas del proceso**

El proceso para la elaboración de una columna de intercambio iónico se divide en 4 etapas, las cuales se describen a continuación:

#### **2.5.2.1. Empaquetamiento de la columna**

Se introduce la resina de intercambio iónico en el interior de la columna evitando la formación de bolsas de aire entre sus partículas para obtener un

lecho uniforme. Esta operación se realiza habitualmente lavando el intercambiador con agua destilada que además resulta útil para eliminar posibles impurezas y para provocar el fenómeno de hinchamiento.

#### **2.5.2.2. Acondicionamiento del intercambiador**

Muchas resinas comerciales se venden en una forma iónica que puede no ser la adecuada para el tratamiento que se desea realizar. Por ejemplo: una resina básica fuerte que tenga como contraión un grupo  $OH$  y que por necesidades del proceso sea deseable tener un ion  $Cl$ . En la etapa de acondicionamiento se procede a cambiar el contraión de la resina poniéndola en contacto con una disolución concentrada del ion que se desea tener.

Una vez que se ha conseguido este objetivo y la resina está en la forma iónica deseada, debe eliminarse el exceso de esta disolución lavando la resina con agua destilada.

#### **2.5.2.3. Etapa de carga**

En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y la resina. La disolución a tratar se introduce en la columna y fluye gradualmente a través de la resina.

#### **2.5.2.4. Etapa de regeneración**

La etapa de regeneración consiste en devolver la resina saturada a su forma iónica inicial, empleando una disolución concentrada en el ion originariamente asociado a la resina. Esta etapa es importante en el proceso de



intercambio iónico, ya que el buen funcionamiento de la resina en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente.

## **2.6. Desproteneización**

Consiste en tratar la sustancia a estudio con una solución acuosa diluida de NaOH a temperatura de 60 °C, con el fin de disolver la proteína. Tratamientos a largo tiempo o a temperaturas muy altas pueden provocar ruptura de las cadenas y la desacetilación parcial del polímero.

El propósito de este proceso es remover la proteína de los huesos de pollo, con ello se pretende evitar que al momento de realizar la filtración las proteínas presentes en la torta de filtración, sustituyan a las partículas de metales presentes en el agua a estudiar.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Las variables que tengan efecto sobre los resultados finales del tema de estudio, se definen por medio de estudios teóricos previos de los fenómenos y comportamientos que puedan ocurrir durante la remoción de metales pesados por filtración con huesos de pollo como material filtrante.

- Concentración inicial de metales (mg/L)
  - Sulfato de hierro (III) ( $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ )
  - Cloruro de zinc ( $\text{ZnCl}_2$ )
  - Sulfato de aluminio (III) ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )
  - Cloruro de plomo (II) ( $\text{PbCl}_2$ )
  
- Concentración de metal en agua después de la filtración (mg/L)
  - Sulfato de hierro (III) ( $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ )
  - Cloruro de zinc ( $\text{ZnCl}_2$ )
  - Sulfato de aluminio (III) ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )
  - Cloruro de plomo (II) ( $\text{PbCl}_2$ )
  
- Volumen de agua a tratar (mL)
- Cantidad de huesos de pollo a utilizar (g)
- Densidad de la capa aparente del filtro

### 3.1.1. Variables de control

Servirán como parámetro durante la experimentación de la remoción de metales pesados.

Tabla I. **Determinación de variables de control a escala laboratorio**

Variable	Dimensional		Factor Potencial de diseño		Factores Perturbadores	
			Constante	Variable	Controlable	No Controlable
Cantidad de materia	Gramos	g		X	X	
Volumen	Mililitros	mL	X		X	
Temperatura	Centígrados	°C	X		X	
Tiempo	Minutos	min		X	X	
pH	-----	----	X		X	

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables dependientes y respuesta

A continuación se describen las variables que fueron dependientes en función a los valores independientes.

Tabla II. **Determinación de las variables dependientes a escala laboratorio**

Variable	Dimensional		Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constantes	VARIABLES	Controlable	No Controlable
Concentración inicial	miligramos /litro	mg/L		X		X
Concentración final	Miligramos /litro	mg/L		X		X
Volumen de muestra	mililitros	mL		X		X

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3. Variables independientes

Se determinan las variables independientes que se utilizaron en la parte experimental.

Tabla III. **Determinación de variables independientes a escala laboratorio**

Variable	Dimensional		Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlable	No controlable
Densidad aparente del medio filtrante	Gramos/ mililitro	g/mL		X		X
Temperatura	Grados centígrados	°C	X			X
Tiempo	minutos	min	X		X	

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.4. Variables de medición

Dichos parámetros fueron los controlados durante la experimentación, con el fin de no alterar los resultados finales.

Tabla IV. **Determinación de las variables de medición a escala laboratorio**

Variable	Unidad de Medición		Instrumento de medición
Cantidad de metal inicial	Gramos	G	Balanza
Volumen de muestra inicial	mililitros	mL	Probeta
Concentración inicial	miligramos /Litro	mg/L	-----
Tiempo	Minutos	Min	Cronometro
Temperatura	Celsius	°C	Termómetro
Concentración final	Miligramos /Litro	mg/L	Espectrofotómetro de absorción atómica
pH	-----	-----	Potenciómetro

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación de campo de estudio

- Área: Tratamiento de agua
  - Proceso: evaluación para la remoción de metales pesados (Fe, Zn, Al, Pb) en el tratamiento de aguas, usando huesos de pollo molido, como material filtrante.

La eliminación de metales pesados (Fe, Zn, Al, Pb) en agua para su posterior desecho, comprende la reducción del mismo presente en el agua, por medio de un proceso de filtración.

Para el proceso de filtración debe calcularse la concentración de metales pesados en el agua de ingreso, así como en el agua de egreso, ambos por medio de un análisis de laboratorio designado.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Tesista:  
Bachiller Hernán Humberto Velásquez Navarro
- Asesor:  
Ingeniero Químico Adrian Antonio Soberanis Ibañez  
Colegiado activo núm. 1515

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Fue la materia necesaria para llevar a cabo el proceso de experimentación.

#### **3.4.1. Materia orgánica**

- Huesos de pollo

#### **3.4.2. Materia inorgánica**

- Hidróxido de sodio
- Sulfato de hierro (III) ( $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ )
- Cloruro de zinc ( $\text{ZnCl}_2$ )
- Sulfato de aluminio (III) ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )
- Cloruro de plomo (II) ( $\text{PbCl}_2$ )

### **3.4.3. Cristalería y equipo**

- Espectrófotometro de absorción atómica.
- Balanza marca: Adventur serie: G1231202040133, voltaje 8-14.5V, frecuencia. 50/60 Hz máxima capacidad 150 gramos, lectura mínima 0,001 gramos, hecha en EE.UU.
- Plancha de calentamiento.
- Termómetros de mercurio.
- Balón de aforado de 500 mL.
- *Beackers* de vidrio pyrex de 50 y 100 mL.
- Probetas de 50 y 100 mL.
- Papel mayordomo.
- Recipientes previamente desinfectados.

### **3.5. Técnica cuantitativa**

Existen varias pruebas para determinar metales pesados en agua, las hay con sensibilidad capaz de detectar 0,001 miligramos/litro, hasta las de amplio margen que detectan metal en agua de 0,10 en 0,10 miligramos/litro, sensibilidad. Para la determinación de la concentración se utilizará:

- Concentración en miligramos/litro mediante el análisis hecho por un espectrofotómetro de absorción atómica.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

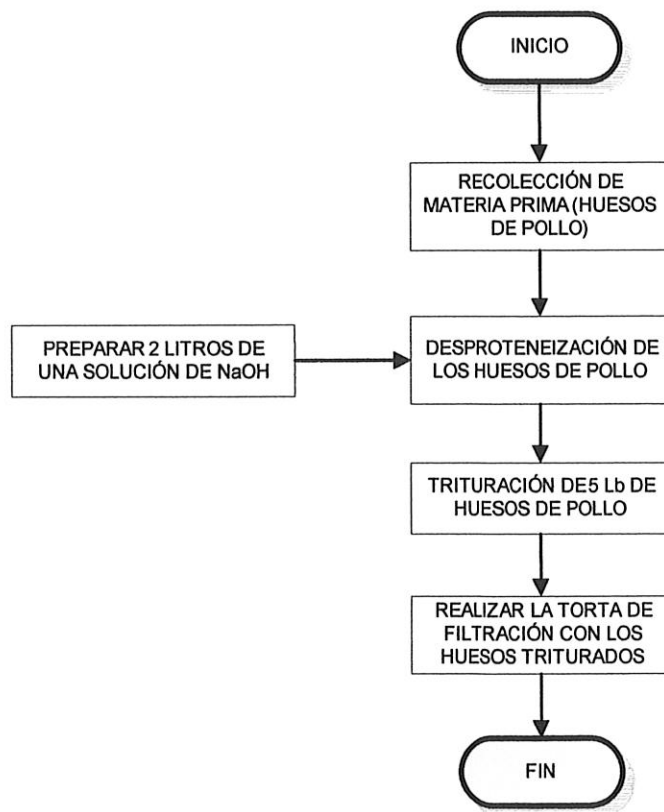
La preparación de las muestras de metales pesados (Fe, Zn, Al, Pb) se realizó en el Laboratorio de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, así como la realización de las

pruebas de remoción de metales pesados. Posteriormente las muestras obtenidas después de la filtración se analizaron por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica para cuantificar la remoción de los metales pesados.

### 3.6.1. Realización de la torta de filtración con huesos de pollo

Se preparó la torta de filtración con huesos de pollo con base en el diagrama que se muestra a continuación:

Figura 3. Procedimiento para la realización de la torta de filtración



Fuente: elaboración propia.



### **3.6.2. Recolección de materia prima (huesos de pollo)**

- Se procedió a la recolección de los huesos de pollo.
- Los residuos de pollo, piel, vísceras y carne fueron separados de sus huesos, para luego ser lavados con abundante agua ozonizada, quitándoles los restos orgánicos que pudieran estar presentes.

### **3.6.3. Procedimiento de la desproteización**

- Se preparó una solución de hidróxido de sodio al 0,5 % g/mL.
- Los huesos se sometieron a cocción con el hidróxido de sodio en una relación 1:10 (g/mL) por 2 horas a 60 °C.
- Se descartó el líquido y luego se lavaron los huesos hasta pH neutro.
- Se secaron los mismos por un tiempo de 1 hora.

### **3.6.4. Trituración de los huesos de pollo**

- Se colocaron los huesos de pollo en la prensa neumática.
- Se colocaron los huesos de pollo en el molino para triturar los mismos.

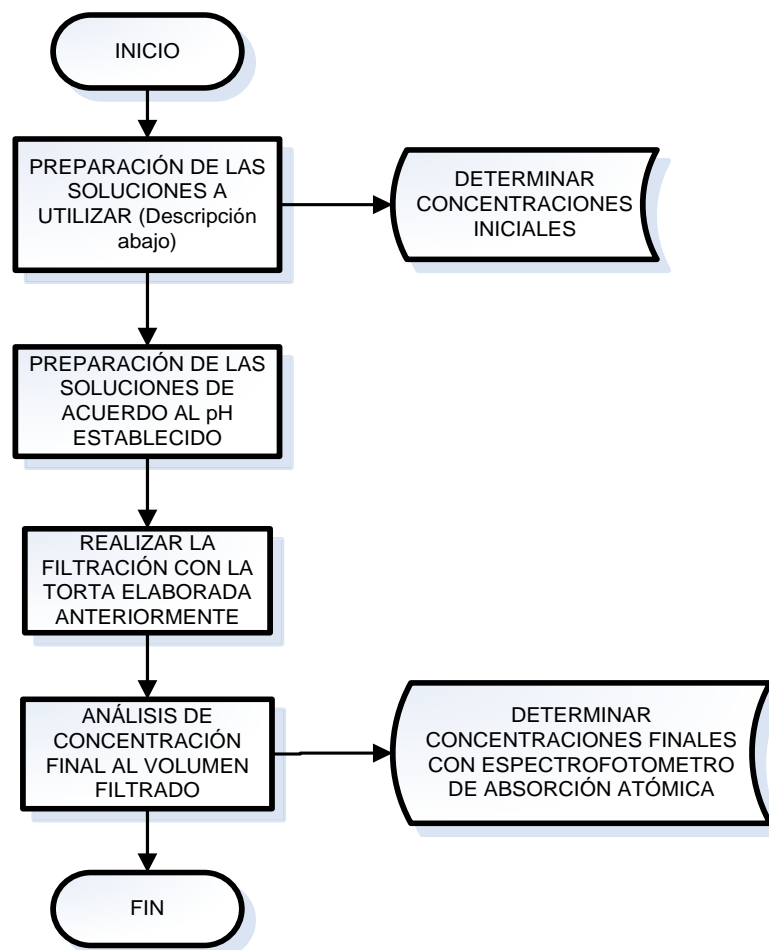
### **3.6.5. Realizar de la torta de filtración con los huesos de pollo**

- Se compactaron los huesos de pollo mediante la prensa neumática.

### 3.6.6. Determinación de la eficiencia de remoción de metales pesados

En el siguiente diagrama se describe el procedimiento para determinar la eficiencia de remoción de metales pesados con base en las lecturas hechas por el espectrofotómetro de absorción atómica.

Figura 4. **Determinación de la eficiencia de la remoción de metales pesados**



Fuente: elaboración propia.

### **3.6.7. Preparación de las soluciones a utilizar**

Se prepararon las siguientes soluciones:

- 3L de solución de sulfato de hierro (III), concentración de 36 mg/L
- 3L de solución de cloruro de zinc, concentración de 21 mg/L
- 3L de solución de sulfato de aluminio (III), concentración de 63 mg/L
- 3L de solución de cloruro de plomo(II), concentración de 14 mg/L

### **3.6.8. Preparación de las soluciones de acuerdo al pH establecido**

Con las soluciones del inciso anterior se prepararon 300 mL de cada una de ellas, variando cada solución desde un pH con valor de 3 hasta un valor de 11.

### **3.6.9. Realizar la filtración con la torta elaborada anteriormente**

Se realizó la filtración de las soluciones elaboradas, mediante una filtración en columna descrita en el marco teórico.

Se utilizaron 20 mL de resina (huesos de pollo) para todas las corridas a realizar, con una densidad aparente de 0,45 g/mL.

### **3.6.10. Análisis de concentración final al volumen filtrado**

- Después de un tiempo de 10 minutos, el volumen obtenido al final de la filtración se destinó a estudio.

- Se calibró el espectrofotómetro de absorción atómica con el uso de soluciones estándar.
- Se toma lectura de la concentración en miligramos/litro del volumen final obtenido.

### 3.6.11. Determinación de corridas a realizar

Para determinar la cantidad de tratamientos a realizar, se asumirá probabilidad de éxito del 90 por ciento, probabilidad de fracaso de un 10 por ciento, con un nivel de significancia del 4 por ciento y un error estimado del 35 por ciento, teniendo:

$$N = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

Donde:

Z = confiabilidad

P = probabilidad de éxito

Q = probabilidad de fracaso (1 -P)

E = error estimado

N = número de tratamientos

De la ecuación anterior se obtiene la cantidad de corridas a utilizar:

$$N = \frac{(1,96)^2 * 0,90 * 0,10}{(0,35)^2}$$

$$N = 2,8224 \approx 3$$

### **3.6.12. Determinación de la eficiencia de remoción en función del pH**

Se prepararon 300 mL de cada una de las soluciones a analizar, las cuales se variarán en función del pH, variando dicho valor desde 3 hasta 11 y posteriormente se realizaron gráficas que presenten el comportamiento de la eficiencia vs el pH del medio.

### **3.6.13. Comparación de la remoción obtenida con cada metal evaluado**

Con el procedimiento detallado en la figura 4 se procedió a encontrar los valores de las concentraciones iniciales y finales para cada metal evaluado (Fe, Zn, Al, Pb), con el fin de determinar con cuál de los metales estudiados es más efectivo el medio filtrante.

## **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Determinación del porcentaje de la remoción de metales pesados en agua.

$$\%R = \frac{|X_f - X_o|}{X_o} * 100$$

Donde:

$X_o$  = concentración inicial de metales pesados (mg/L)

$X_f$  = concentración final de metales pesados (mg/L)

$\%R$  = porcentaje de rendimiento de la remoción de metales (%)

Tabla V. **Datos experimentales obtenidos de la remoción de metales pesados en agua**

Repetición	pH de la muestra	Concentración Inicial (mg/L)	Concentración Final (mg/L)
1	pH <sub>0</sub>	X <sub>0</sub>	X <sub>f0</sub>
2		X <sub>1</sub>	X <sub>f1</sub>
3		X <sub>2</sub>	X <sub>f2</sub>
Promedio	-	-	-
1	pH <sub>1</sub>	X <sub>0</sub>	X <sub>f0</sub>
2		X <sub>1</sub>	X <sub>f1</sub>
3		X <sub>2</sub>	X <sub>f2</sub>
Promedio	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Tabulación de valores con respecto a la temperatura y tiempo**

Metal evaluado	pH	Temperatura (°C)	Tiempo después de la filtración (min)
Metal evaluado (Fe, Zn, Al, Pb)	3	T cte. = 25	10
	4	T cte. = 25	10
	5	T cte. = 25	10
	6	T cte. = 25	10
	7	T cte. = 25	10
	8	T cte. = 25	10
	9	T cte. = 25	10
	10	T cte. = 25	10
	11	T cte. = 25	10

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados obtenidos con espectrofotómetro de absorción atómica a temperatura de 25 °C y un tiempo de 10 minutos después del inicio de la filtración**

Metal a evaluar	pH	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)			
			Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
Fe <sup>+3</sup>	3	10				
	4	10				
	5	10				
	6	10				
	7	10				
	8	10				
	9	10				
	10	10				
	11	10				
Zn <sup>+2</sup>	3	10				
	4	10				
	5	10				
	6	10				
	7	10				
	8	10				
	9	10				
	10	10				
	11	10				
Al <sup>+3</sup>	3	10				
	4	10				
	5	10				
	6	10				
	7	10				
	8	10				
	9	10				
	10	10				
	11	10				
Pb <sup>+2</sup>	3	10				
	4	10				
	5	10				

Continuación de la tabla VII.

	6	10				
	7	10				
	8	10				
	9	10				
	10	10				
	11	10				

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

En el análisis estadístico se realizó un cálculo de promedio para obtener datos más exactos con las corridas inicialmente planteadas. El promedio se calculó de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio

$x_i$  = valor i

n = número de datos

A partir del promedio, también se encuentra la desviación estándar (S) que permite observar la dispersión entre valores para una misma medición respecto al promedio. El cálculo de la desviación estándar se representa por:



$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio

$x_i$  = valor i

n = número de datos

S = desviación estándar

Adicionalmente realizó un análisis *t-Student*, dado que el número total de muestras es <30. Esta distribución muestral tiene como objetivo describir el comportamiento de una población completa (muestras en este caso). Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{S / \sqrt{n}}$$

Donde:

t = valor *t-Student*

$\bar{x}$  = media muestral

$\mu$  = media poblacional

S = desviación muestral

n = número de muestras

### **3.8.1. Plan de análisis de los resultados**

Los resultados obtenidos durante la realización de la experimentación se sometieron a un análisis con programas para lograr ver el comportamiento de los datos obtenidos.

### **3.8.2. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables**

- Análisis con espectrofotómetro de absorción atómica  
Dato de lectura para encontrar concentración final

### **3.8.3. Programas a utilizar para análisis de datos**

- Microsoft Excel 2010: hoja de cálculo electrónica para facilitar operaciones matemáticas.
- Microsoft Visio 2010: software utilizado para facilitar la elaboración de diagramas.



## 4. RESULTADOS

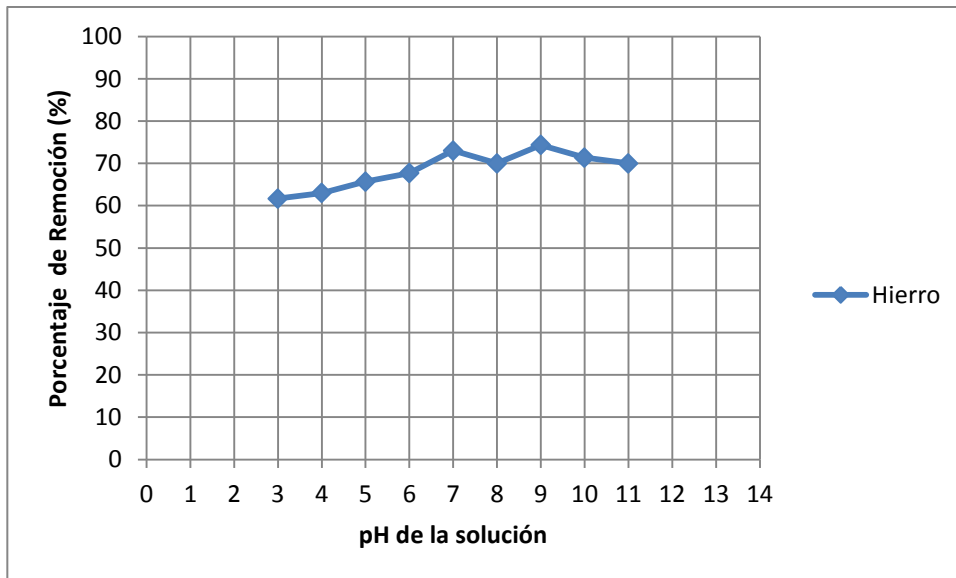
A continuación se presentan los datos obtenidos luego de realizar la experimentación:

Tabla VIII. **Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de hierro**

<b>Metal evaluado</b>	<b>pH</b>	<b>Porcentaje de Remoción (%)</b>
Fe <sup>+3</sup>	3	62
	4	63
	5	66
	6	68
	7	73
	8	70
	9	74
	10	71
	11	70

Fuente: elaboración propia y tabla II, apéndice 2.

Figura 5. **Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de hierro**



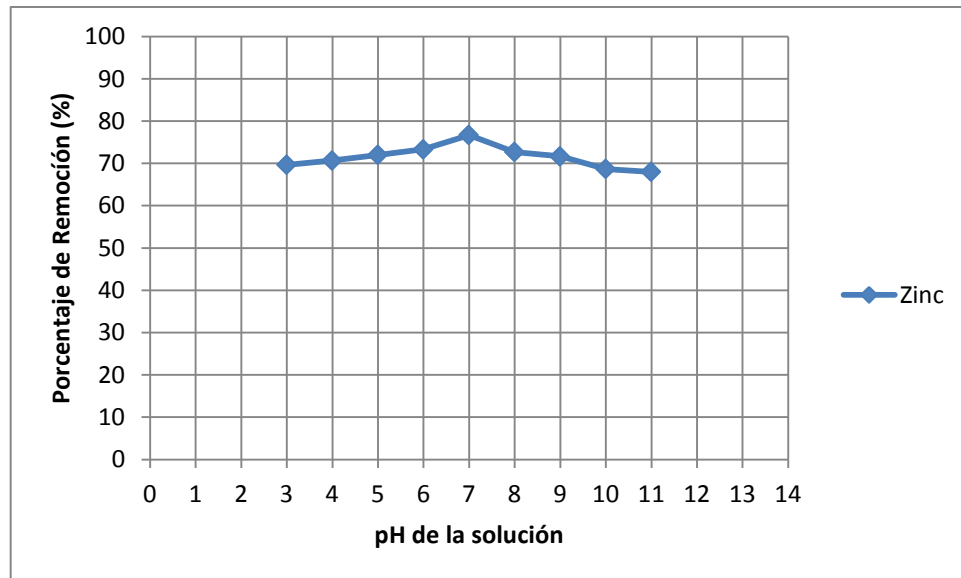
Fuente: elaboración propia y tabla VIII.

Tabla IX. **Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de zinc**

Metal evaluado	pH	Porcentaje de Remoción (%)
Zn <sup>+2</sup>	3	70
	4	71
	5	72
	6	73
	7	77
	8	73
	9	72
	10	69
	11	68

Fuente: elaboración propia y tabla II, apéndice 2.

Figura 6. **Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de zinc**



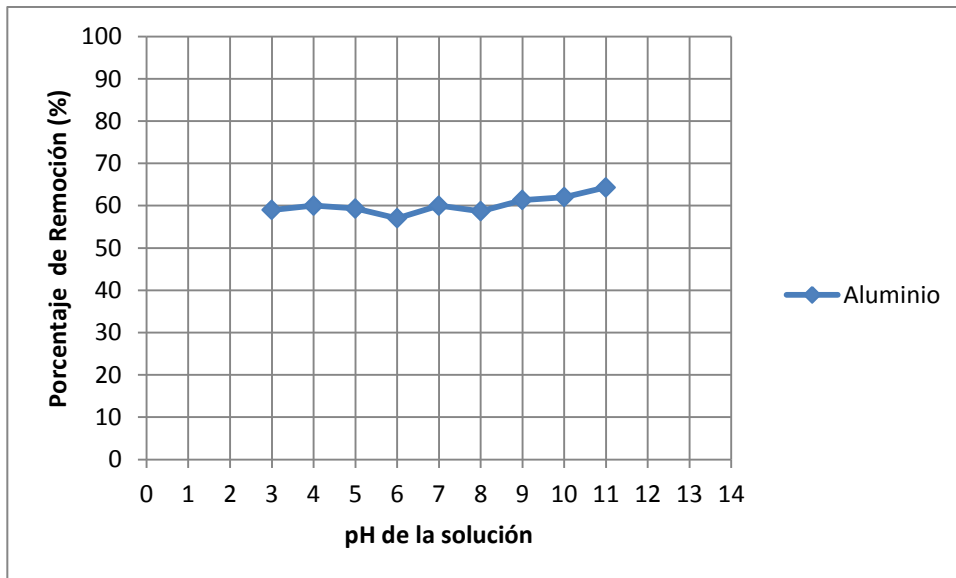
Fuente: elaboración propia y tabla IX.

Tabla X. **Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de aluminio**

Metal evaluado	pH	Porcentaje de Remoción (%)
Al <sup>3+</sup>	3	59
	4	60
	5	59
	6	57
	7	60
	8	59
	9	61
	10	62
	11	64

Fuente: elaboración propia y tabla II, apéndice 2.

Figura 7. **Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de aluminio**



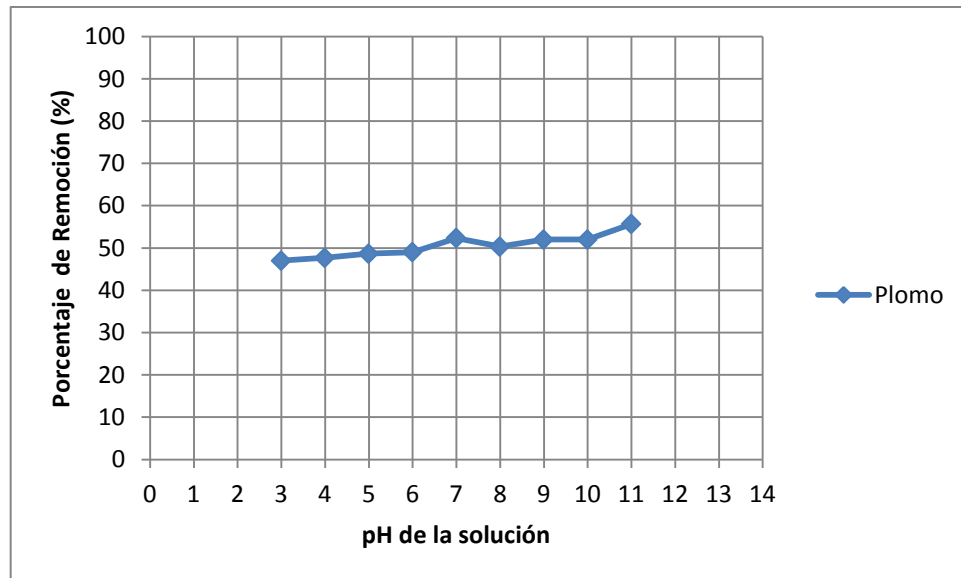
Fuente: elaboración propia y tabla X.

Tabla XI. **Porcentaje de remoción y pH de las soluciones de plomo**

Metal evaluado	pH	Porcentaje de Remoción (%)
Pb <sup>+2</sup>	3	47
	4	48
	5	49
	6	49
	7	52
	8	50
	9	52
	10	52
	11	56

Fuente: elaboración propia y tabla II, apéndice 2.

Figura 8. **Porcentaje de remoción en función del pH de las soluciones de plomo**



Fuente: elaboración propia y tabla XI.

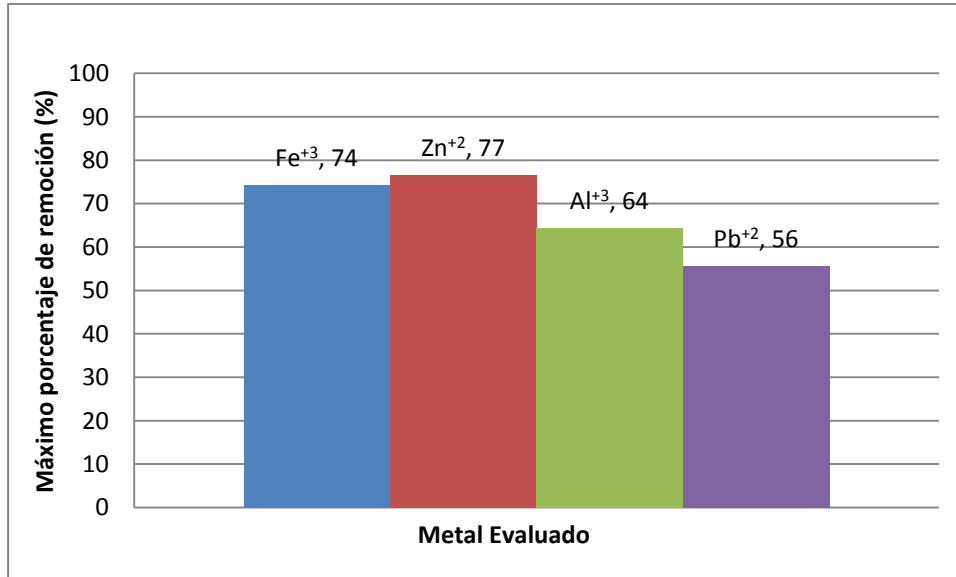
Tabla XII. **Máximos valores para porcentajes de remoción de acuerdo al metal evaluado**

Metal evaluado	Máximo porcentaje de Remoción (%)	pH
Fe <sup>+3</sup>	74	9
Zn <sup>+2</sup>	77	7
Al <sup>+3</sup>	64	11
Pb <sup>+2</sup>	56	11

Fuente: elaboración propia y tablas VIII, IX, X y XI.



Figura 9. **Comparación de la máxima remoción obtenida en función del metal evaluado**



Fuente: elaboración propia y tabla XII.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La tabla VIII expresa el porcentaje de remoción de  $\text{Fe}^{+3}$  después de haber pasado a través del filtro hecho con huesos de pollo, los datos fueron obtenidos mediante la lectura de la concentración final realizada por un espectrofotómetro de absorción atómica.

La figura 5 muestra el porcentaje de remoción en función del pH para el hierro, indicando que el máximo porcentaje de remoción para dicho metal es del 74 % con un pH de 9, el segundo valor más alto se encuentra en un pH de 7 siendo este del 73 % y visualizando la gráfica se observa que los valores más altos de remoción se encuentran cuando los niveles de pH tienden a ser más alcalinos.

La tabla IX presenta el porcentaje de remoción de  $\text{Zn}^{+2}$ , al final de la filtración, la cual expresa que los valores se mantienen en un rango del 68 % al 77 %. La figura 6 muestra que el mayor porcentaje de remoción del zinc se da en la solución que presenta un pH con valor de 7, indicando que dicha remoción del metal es más favorecida cuando el pH de la solución es neutro, mientras que para valores ácidos y alcalinos la eficiencia de remoción tiende a ser más baja.

La tabla X muestra los valores relacionados al porcentaje de remoción de  $\text{Al}^{+3}$ , los valores están en un rango del 57 al 64 %. En la figura 7 se logra observar que los valores tienen altibajos, oscilando alrededor del 60 % de remoción para el  $\text{Al}^{+3}$ , siendo esto un parámetro para indicar que la eficiencia de la remoción no se ve afectada por el cambio del pH de la solución.

Los valores para la remoción del  $Pb^{+2}$  se ven expresados en la tabla XI, los cuales presentan los valores más bajos de remoción con respecto a los otros metales evaluados. En la figura 8 se observa que el porcentaje de remoción en función del pH tiende a aumentar a medida que el pH de la solución tiene valores más altos, indicando que esta remoción se ve beneficiada cuando las soluciones tienen pH más alcalinos.

Tabla XII y figura 9 muestran que el agente filtrante (huesos de pollo) es más efectivo para la remoción de zinc, debido a que presentan que el porcentaje de remoción es más alto para este metal, con un valor de 77 %, quedando en segundo lugar el Hierro con una remoción máxima del 74 %, seguido por el aluminio con un valor del 64 % y en último lugar el plomo mostrando un valor de 56 %. Se infiere que el zinc presenta valores más altos de remoción debido a su baja tendencia a experimentar reacciones de óxido-reducción, con esto se eliminan interferencias que no fueran atribuidas exclusivamente al pH (Dardel, 2015).

Después del análisis de los resultados se encuentra que el material propuesto (huesos de pollo) es una excelente herramienta, útil para el entendimiento del efecto del pH en el proceso de filtración de metales pesados y promueve el uso de biopolímeros naturales presentes en biomasa de desecho para la filtración selectiva a los mismos.

La evaluación del efecto del pH en la filtración, por medio de cationes divalentes y trivalentes, muestra la gran complejidad de la química acuosa de los iones metálicos, cuya especie química predominante, depende fuertemente de la acidez del medio, necesaria para competir con otros iones por los sitios activos en contacto con el material filtrante.

La composición química de los huesos es de un 25 % de agua, 45 % de minerales como fosfato y carbonato de calcio y 30 % de materia orgánica, principalmente colágeno; el colágeno óseo es menos denso que el mineral óseo, desempeña el papel de pegamento del mineral óseo y es el que proporciona la elasticidad de los huesos (Coreño A., J., 2015).

El mineral óseo está formado de hidroxiapatita (HAP) de calcio  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , en otros estudios se hace notar el valor de la hidroxiapatita (HAP) como agente para la remoción de metales, y su afinidad a los distintos metales, "...la HAP presenta una mayor capacidad de adsorción a valores altos de pH. Además, el pH final tiende a estabilizarse alrededor de 8. Esta última observación puede explicarse asumiendo que la HAP puede comportarse como anfótero" (Coreño A., J., 2015).

La hipótesis planteada al inicio de la investigación se toma como válida ya que con el uso de huesos de pollo como material filtrante, se reduce considerablemente la concentración de metales pesados en el agua.



## CONCLUSIONES

1. La elaboración de la torta de filtración con huesos, dio como resultado una resina de intercambio iónico, la cual posee una densidad aparente de 0,45 g/mL, esta resina tiene la característica de poder retener los iones de los metales pesados.
2. Los resultados respaldan la hipótesis planteada, ya que la aplicación de huesos de pollo como material filtrante, reducen la concentración de metales pesados en el agua.
3. La eficiencia de remoción de los metales evaluados (Fe, Zn, Al, Pb) varía en función del pH de la solución analizada, los valores obtenidos de la eficiencia están dentro del rango desde 47 % para el plomo a un pH de 3 hasta un 77 % para el zinc a un pH de 7.
4. Se determinó que el agente filtrante (huesos de pollo) es más efectivo con el zinc, obteniendo valores desde un 68 hasta un 77 % de eficiencia en la remoción.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar este estudio con enfoque hacia la industria, recopilando muestras de aguas residuales provenientes de ella, de tal manera que pueda analizarse bajo condiciones y aplicaciones reales.
2. Hacer un estudio más exhaustivo sobre el método, para que se pueda llegar a conocer el mecanismo de la filtración, si se lleva a cabo por intercambio iónico, conocer que elemento es entregado a cambio de los iones metálicos.
3. Estudiar el método variando los parámetros como el tiempo de filtración y la temperatura de la solución, de esta manera observar los cambios provocados a la remoción de los metales.
4. Estudiar otros tratamientos para la remoción de metales pesados en agua.
5. Estudiar este tipo de filtración con otros metales.





## BIBLIOGRAFÍA

1. BERRIOS MÉNDEZ, Edward Mauricio. *Eliminación de hierro ferroso por medio de oxidación y filtración multimedia, de agua de pozo utilizada en sistema de riego por goteo*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 125 p.
2. COREÑO A. J. *Evaluación de hidroxiapatita nanoparticulada como material adsorbente de iones flúor, plomo y arsénico en soluciones acuosas*. [en línea] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Feb-Ago 2010. <[http://smc.syv.fis.cinve.stav.mx/supyvac/23\\_S/SV23S161.pdf](http://smc.syv.fis.cinve.stav.mx/supyvac/23_S/SV23S161.pdf)> [Consulta: 27 de julio 2015].
3. DICK, James Gardiner. *Química analítica*. México: McGraw-Hill, 1979. 747 p.
4. Dardel. *El intercambio iónico, principios básicos* [en línea]: <[http://dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html)> [Consulta: 14 de julio de 2015].
5. GARY, Christian. *Química analítica*. 6a ed. México. McGraw-Hill, 2009. 856 p.
6. McCABE, Warren L.; SMITH, Julianny; HARRIOT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2000. 1114 p.

7. PACAY MACZ, Carina Elizabeth. *Análisis comparativo del diseño de sistemas de filtración para la potabilización de agua*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 84 p.
8. PERRY, Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2008. TOMO IV – Sección 6.
9. PRIETO BOLIVAR, Carlos Jaime. *El agua: sus formas, efectos, usos, daños, control y conservación*. 2a ed. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones, 2004. 280 p.
10. *Remoción del arsénico mediante coagulación, filtración y sedimentación comparación con tecnologías disponibles y análisis de una planta tipo* [en línea]. <[http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/Agua\\_Remocion\\_zarsenico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/Agua_Remocion_zarsenico.pdf)> [Consulta: 08 de julio de 2015].
11. SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 265 p.
12. TREYBAL, Robert E. *Operación en transferencia de masa*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2000. 1059 p.
13. WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond; MYERS, Sharon. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 4a ed. México: Pearson Educación, 1998. 752 p.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Muestra de cálculo

#### Cálculo del promedio de la concentración final

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \text{ [Ecuación 1]}$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio

$x_i$  = valor i

n = número de datos

Ejemplo:

Para la corrida núm.1 de la tabla I del apéndice 2 , para un pH=3 usando hierro (III) como metal evaluado, se tiene:

$$\bar{x} = \frac{4,00 + 3,70 + 3,80}{3}$$

$$\bar{x} = 3,83$$

Se prosiguió a utilizar la misma ecuación para las otras corridas realizadas.

### **Cálculo del porcentaje de remoción del metal evaluado**

$$\%R = \frac{|X_f - X_o|}{X_o} * 100 [\text{Ecuación 2}]$$

Donde:

$X_o$  = concentración inicial de metales pesados (mg/L)

$X_f$  = concentración final de metales pesados (mg/L)

$\%R$  = porcentaje de rendimiento de la remoción de metales (%)

Ejemplo:

Para la corrida núm.1 de la tabla II del apéndice 2, para un pH=3 usando hierro (III) como metal evaluado, se tiene:

$$\%R = \frac{|3,83 - 10|}{10} * 100$$

$$\%R = 61,67 \% \approx 62 \%$$

Se prosiguió a utilizar la misma ecuación para las otras corridas realizadas.

### **Desviación estándar de la concentración final**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio

$x_i$  = valor i

n = número de datos

S = desviación estándar

Ejemplo:

Para la corrida Núm. 1 de la tabla II del apéndice 2, se tiene

$$S = \sqrt{\frac{(4,00 - 3,83)^2 + (3,70 - 3,83)^2 + (3,80 - 3,83)^2}{3 - 1}}$$

$$S = 0,15$$

Se prosiguió a utilizar la misma ecuación para las otras corridas realizadas.

## Apéndice 2. Datos calculados

Tabla I. Datos originales de la experimentación y promedio

Metal a evaluar	pH	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)			
			Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
Fe <sup>+3</sup>	3	10	4,00	3,70	3,80	3,83
	4	10	3,90	3,70	3,50	3,70
	5	10	3,50	3,40	3,40	3,43
	6	10	3,00	3,20	3,50	3,23
	7	10	2,80	2,70	2,60	2,70
	8	10	3,00	3,00	3,00	3,00
	9	10	2,30	2,60	2,80	2,57
	10	10	2,80	2,80	3,00	2,87
	11	10	3,00	3,00	3,00	3,00
Zn <sup>+2</sup>	3	10	3,00	3,10	3,00	3,03
	4	10	2,80	3,00	3,00	2,93
	5	10	2,70	2,90	2,80	2,80
	6	10	2,60	2,70	2,70	2,67
	7	10	2,50	2,30	2,20	2,33
	8	10	2,70	2,80	2,70	2,73
	9	10	2,60	2,90	3,00	2,83
	10	10	3,00	3,10	3,30	3,13
	11	10	3,10	3,30	3,20	3,20
Al <sup>+3</sup>	3	10	4,00	4,10	4,20	4,10
	4	10	4,00	4,00	4,00	4,00
	5	10	4,00	4,00	4,20	4,07
	6	10	4,20	4,30	4,40	4,30
	7	10	3,90	4,00	4,10	4,00
	8	10	4,00	4,10	4,30	4,13
	9	10	3,90	3,90	3,80	3,87
	10	10	3,90	3,80	3,70	3,80
	11	10	3,50	3,60	3,60	3,57
Pb <sup>+2</sup>	3	10	5,40	5,30	5,20	5,30
	4	10	5,30	5,20	5,20	5,23

Continuación de la tabla I.

	5	10	5,10	5,20	5,10	5,13
	6	10	5,10	5,10	5,10	5,10
	7	10	4,80	4,80	4,70	4,77
	8	10	5,10	4,90	4,90	4,97
	9	10	4,70	4,80	4,90	4,80
	10	10	4,70	4,80	4,90	4,80
	11	10	4,50	4,40	4,40	4,43

Fuente: elaboración propia, práctica experimental.



Tabla II. **Datos correspondientes a la desviación estándar y el porcentaje de remoción para cada prueba realizada**

Metal a evaluar	pH	Desviación Estándar	% Remoción
Fe <sup>+3</sup>	3	0,15	62
	4	0,20	63
	5	0,06	66
	6	0,25	68
	7	0,10	73
	8	0,00	70
	9	0,25	74
	10	0,12	71
Zn <sup>+2</sup>	11	0,00	70
	3	0,06	70
	4	0,12	71
	5	0,10	72
	6	0,06	73
	7	0,15	77
	8	0,06	73
	9	0,21	72
Al <sup>+3</sup>	10	0,15	69
	11	0,10	68
	3	0,10	59
	4	0,00	60
	5	0,12	59
	6	0,10	57
	7	0,10	60
	8	0,15	59
Pb <sup>+2</sup>	9	0,06	61
	10	0,10	62
	11	0,06	64
	3	0,10	47
	4	0,06	48
	5	0,06	49
	6	0,00	49
	7	0,06	52
8	0,12	50	
9	0,10	52	
10	0,10	52	
11	0,06	56	

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Máximos valores de porcentajes de remoción de metales evaluados**

<b>Metal evaluado</b>	<b>Máximo porcentaje de Remoción (%)</b>
Fe <sup>+3</sup>	74
Zn <sup>+2</sup>	77
Al <sup>+3</sup>	64
Pb <sup>+2</sup>	56

Fuente: elaboración propia, tabla I, apéndice 2.

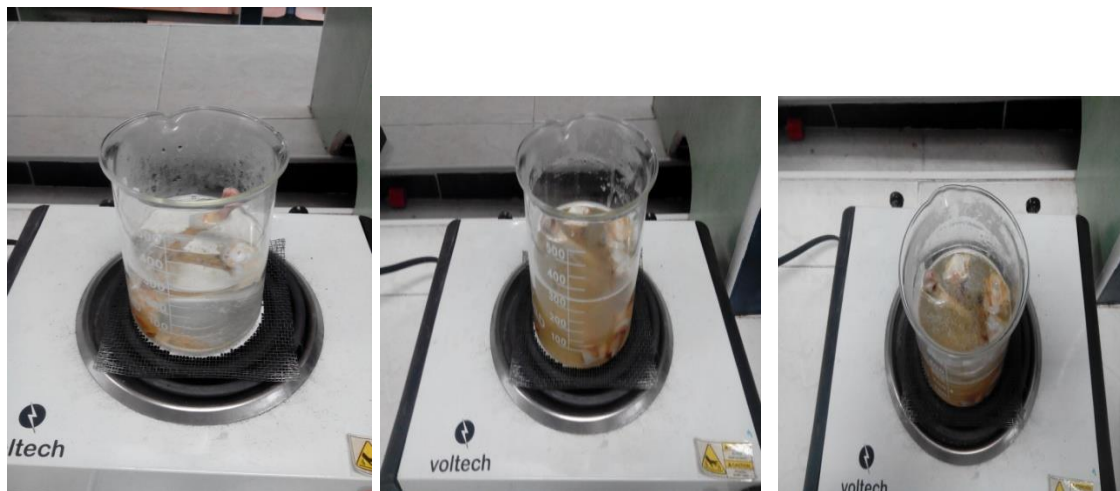
Tabla IV. **Prueba t-student**

<b>Comparación</b>		<b>t calculada</b>	<b>t tabulada</b>	<b>Criterio</b>
<b>Metal 1</b>	<b>Metal 2</b>			
Fe <sup>+3</sup>	Zn <sup>+2</sup>	1,8625	2	SIN diferencia significativa
Fe <sup>+3</sup>	Al <sup>+3</sup>	2,981	2	CON diferencia significativa
Fe <sup>+3</sup>	Pb <sup>+2</sup>	17,5986	2	CON diferencia significativa
Zn <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	0,9341	2	SIN diferencia significativa
Zn <sup>+2</sup>	Pb <sup>+2</sup>	4,8841	2	CON diferencia significativa
Al <sup>+3</sup>	Pb <sup>+2</sup>	31,8415	2	CON diferencia significativa

Fuente: elaboración propia, tabla II, apéndice 2.

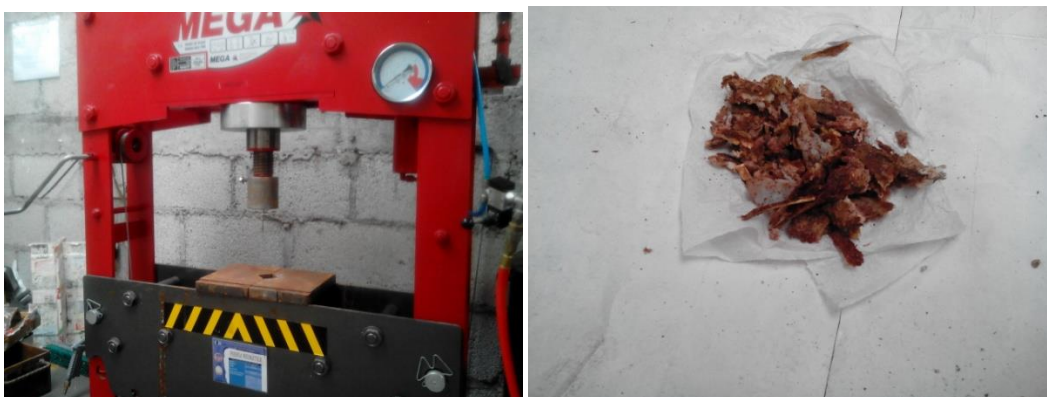
### Apéndice 3. Imágenes de la parte experimental

#### Desproteneinización de los huesos de pollo



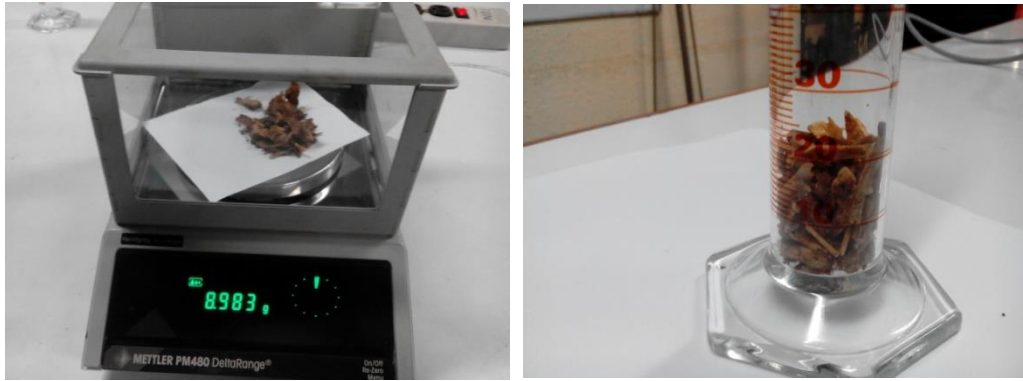
Fuente: Laboratorio de Ingeniería Química, USAC.

#### Trituración de los huesos de pollo



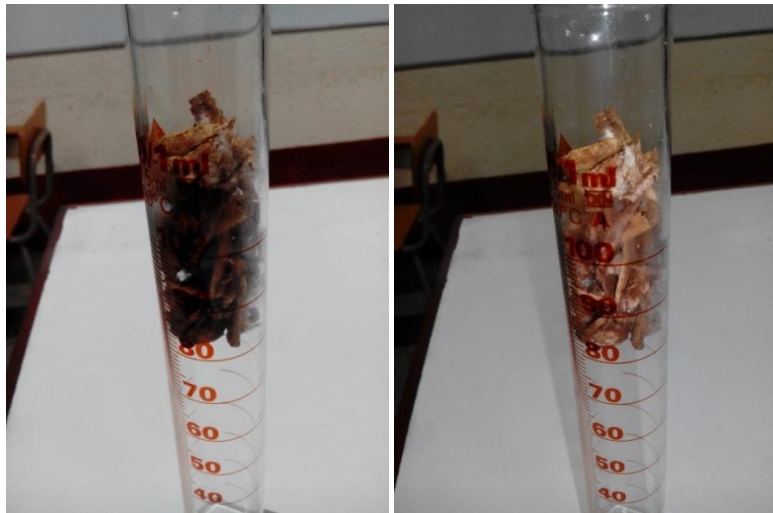
Fuente: Laboratorio de Ingeniería Química, USAC.

## Mediciones para la densidad de la capa aparente del filtro



Fuente: Laboratorio de Ingeniería Química, USAC.

## Fotografías del filtro elaborado



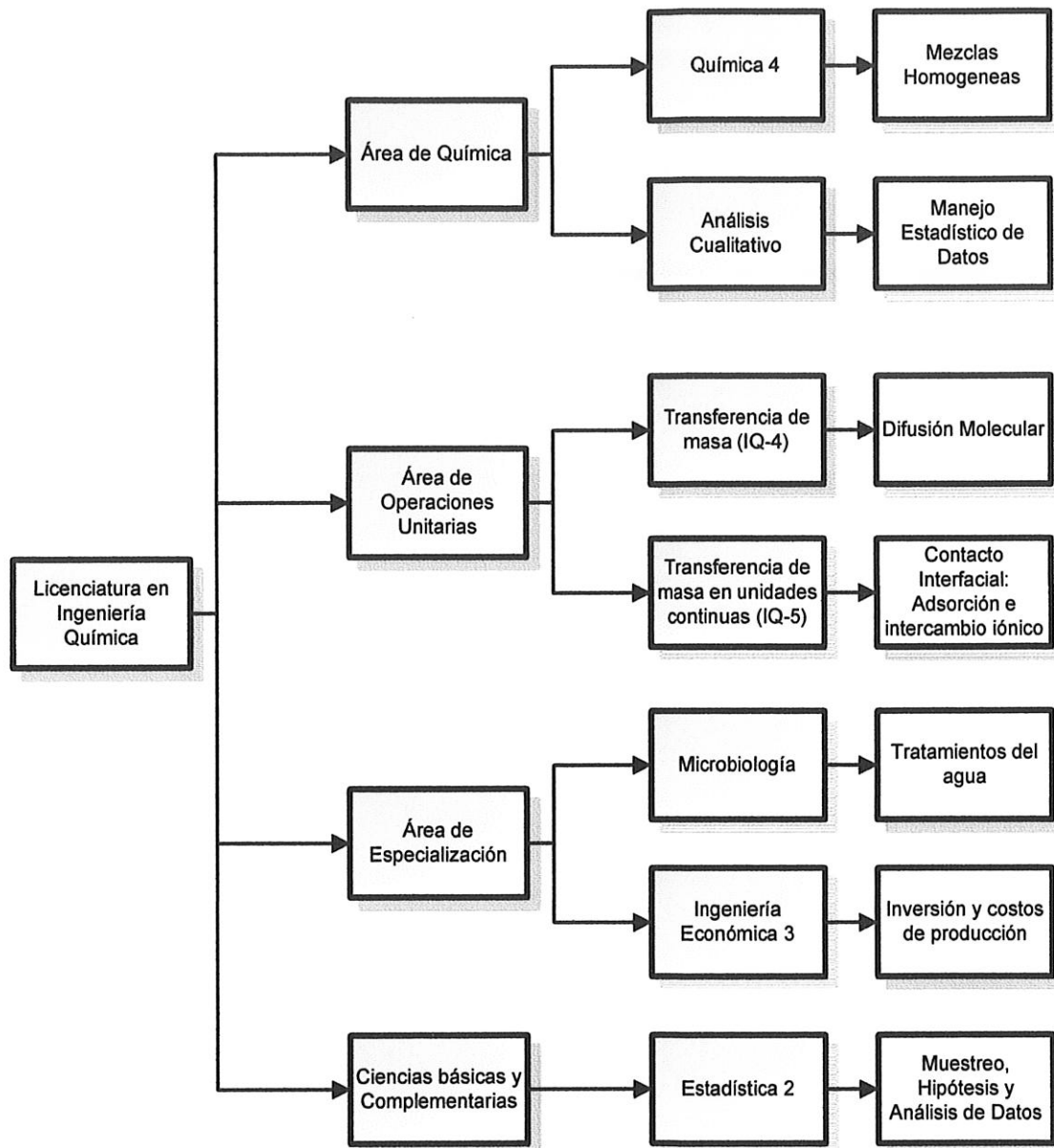
Fuente: Laboratorio de Ingeniería Química, USAC.

**Evaluación de la concentración final con el espectrofotómetro de absorción atómica**



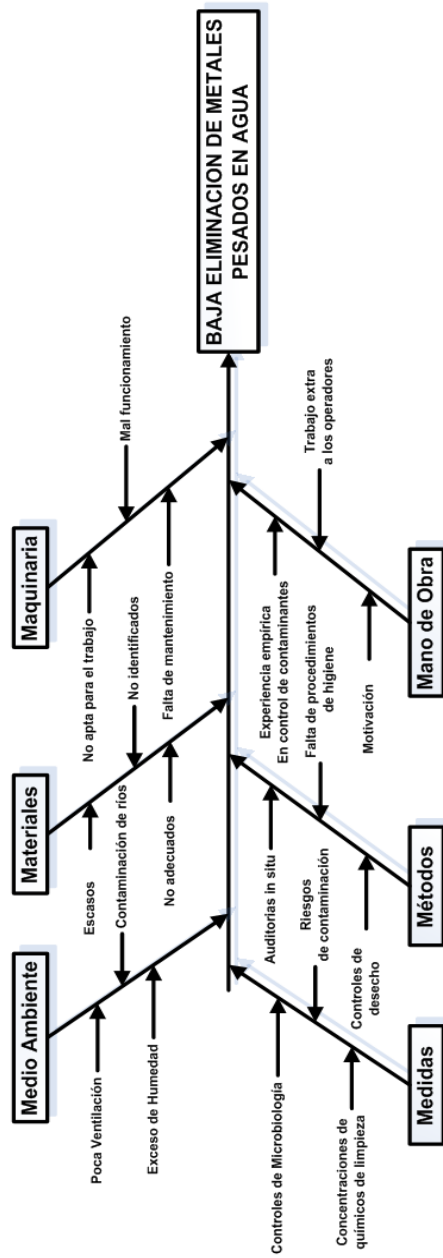
Fuente: Ingeniería USAC.

#### Apéndice 4. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.