



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

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE DOS COAGULANTES CATIONICOS MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DE LA NORMA AWWA C.2.5.1.1 PARA LA REMOCIÓN DE UNA MEZCLA DE  
CARBAMATO HERBICIDA Y UNA BENZAMIDA FUNGICIDA EN AGUAS RESIDUALES  
PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE AGROQUÍMICOS**

**Ronald Humberto Echeverría Herrera**

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, abril de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE DOS COAGULANTES CATIONICOS MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DE LA NORMA AWWA C.2.5.1.1 PARA LA REMOCIÓN DE UNA MEZCLA DE  
CARBAMATO HERBICIDA Y UNA BENZAMIDA FUNGICIDA EN AGUAS RESIDUALES  
PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE AGROQUÍMICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**RONALD HUMBERTO ECHEVERRÍA HERRERA**  
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, ABRIL DE 2018

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	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Victor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galvan Estrada
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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 COMPARATIVA DE DOS COAGULANTES CATIONICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA NORMA AWWA C.2.5.1.1 PARA LA REMOCIÓN DE UNA MEZCLA DE CARBAMATO HERBICIDA Y UNA BENZAMIDA FUNGICIDA EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE AGROQUÍMICOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 6 de junio de 2016.

**Ronald Humberto Echeverría Herrera**



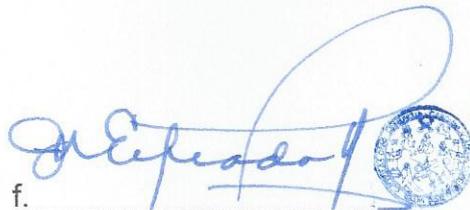
Guatemala, 08 de septiembre de 2017

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Su Despacho

Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: **"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE DOS COAGULANTES CATIONICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA NORMA AWWA C.2.5.1.1 PARA LA REMOCIÓN DE UNA MEZCLA DE CARBAMATO HERBICIDA Y UNA BENZAMIDA FUNGICIDA EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE AGROQUÍMICOS"**, del estudiante de ingeniería química Ronald Humberto Echeverría Herrera, quién se identifica con registro académico 201113971 y CUI 2145752921401.

Por tal motivo y para los usos que al interesado convenga extendiendo la presente, para que se continúe con los trámites requeridos por la escuela de ingeniería química.

Atentamente,



f.

Jorge Mario Estrada  
Ingeniero Químico  
Colegiado 685

  
Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS  
Ingeniero Químico, Col. 685  
M. Sc. Ingeniería Sanitaria  
PROFESOR TITULAR  
Escuela de Ing. Química USAC



Guatemala, 14 de febrero de 2018.  
Ref. EIQ.TG-IF.007.2018.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **025-2016** 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**  
**-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Ronald Humberto Echeverría Herrera**.  
Identificado con número de carné: **2145 75292 1401**.  
Identificado con registro académico: **2011-13971**  
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 COMPARATIVA DE DOS COAGULANTES CATIÓNICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA NORMA AWWA C.2.5.1.1 PARA LA REMOCIÓN DE UNA MEZCLA DE CARBAMATO HERBICIDA Y UNA BENZAMIDA FUNGICIDA EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE AGROQUÍMICOS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

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.

"D Y ENSEÑAR A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Ingeniería y de Arquitectura





Ref.EIQ.TG.006.2018

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, **RONALD HUMBERTO ECHEVERRÍA HERRERA** titulado: **"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE DOS COAGULANTES CATIÓNICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA NORMA AWWA C.2.5.1.1 PARA LA REMOCIÓN DE UNA MEZCLA DE CARBAMATO HERBICIDA Y UNA BENZAMIDA FUNGICIDA EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE AGROQUÍMICOS"** 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. Carlos Salvador Wong Davi  
Director

Escuela de Ingeniería Química  
FACULTAD DE INGENIERIA USAC  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
DIRECTOR

Guatemala, marzo 2018

Cc: Archivo  
CSWD/ale



Agencia Central de Aseguramiento de Accidentes de  
Seguros, de Responsabilidad y de Seguros





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 COMPARATIVA DE DOS COAGULANTES CATIONICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA NORMA AWWA C.2.5.1.1 PARA LA REMOCIÓN DE UNA MEZCLA DE CARBAMATO HERBICIDA Y UNA BENZAMIDA FUNGICIDA EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE AGROQUÍMICOS**, presentado por el estudiante universitario: **Ronald Humberto Echeverría Herrera**, 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, abril de 2018

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por la infinita gracia, misericordia y amor. Por prestarme la vida, darme sabiduría, fuerza y salud para poder dar un paso más.
- Mis padres** Carlos Humberto Echeverría y Piedad Georgina Herrera, por ser el ejemplo a seguir, por su esfuerzo y apoyo incondicional.
- Mis hermanos** Diego, Erik, Karla, José, Ángel y Adelaida Echeverría, por el apoyo brindado en mi vida.
- Ana Gabriela Valdés** Por acompañarme durante este largo recorrido. Gracias por tu apoyo y comprensión y porque a pesar de las adversidades, llenas mis días de felicidad.
- Mis amigos** Byron Yat, Alex Mazariegos, José Reyes, Manuel Ruano, David García, Daniel Mellado, María Rivas, Ligia Fletes, Cesia de León, Yoly Guila y Dayanne Zelada, por hacer este camino más fácil.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Agradezco profundamente a mi casa de estudios y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme una educación de calidad y por prepararme para ser un ingeniero de bien.

**Ingeniero Jorge  
Mario Estrada**

Por todo el apoyo y orientación brindada en esta última etapa. Gracias por el tiempo y la dedicación que le ha brindado a este trabajo de graduación.



2.6.	Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ).....	12
2.7.	Poliacrilamida poli(2-propenamida).....	16
2.8.	Análisis de concentración.....	17
2.8.1.	Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) ....	17
2.8.2.	Pruebas de jarras .....	19
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.	Variables .....	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	23
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	24
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	25
3.4.1.	Materia prima .....	25
3.4.2.	Equipo de medición .....	25
3.4.3.	Equipo auxiliar.....	25
3.4.4.	Cristalería de medición volumétrica .....	25
3.4.5.	Cristalería de contención.....	25
3.4.6.	Cristalería .....	26
3.4.7.	Equipo de seguridad .....	26
3.4.8.	Reactivos.....	26
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	27
3.7.	Muestreo .....	27
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	28
3.9.	Análisis estadístico.....	28
3.9.1.	Medidas de tendencia central.....	28
3.9.1.1.	Media aritmética .....	29
3.9.2.	Medidas de dispersión .....	29
3.9.2.1.	Desviación estándar .....	29

4.	RESULTADOS .....	31
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	35
	CONCLUSIONES .....	39
	RECOMENDACIONES .....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	APÉNDICES .....	45



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Molécula de clorhidrato de propil 3-(dimetilamino) propil carbamato .....	6
2.	Molécula de 2,6-dicloro-N-((3-cloro-5-(trifluorometil)-2-piridinil)metil) benzamida.....	6
3.	Carga de la partícula coloidal.....	13
4.	Aglomeración de los coloides negativos .....	13
5.	Diagrama de equipo de un cromatógrafo de líquidos.....	19
6.	Diagrama del equipo de pruebas de jarras .....	21
7.	Recolección de la información .....	27
8.	Dosis de sulfato de aluminio que optimiza la floculación de propamocarb HCl.....	31
9.	Dosis de sulfato de aluminio que optimiza la floculación de fluopicolide .....	32
10.	Dosis de poliacrilamida que optimiza la floculación de propamocarb HCl .....	32
11.	Dosis de poliacrilamida que optimiza la floculación de fluopicolide.....	33

### TABLAS

I.	Variables presentes en el proceso de la investigación.....	23
II.	Ordenamiento de datos.....	28
III.	Existencia de diferencias significativas en las concentraciones iniciales y finales de propamocarb HCl y fluopicolide en función de la dosis óptima de cada coagulante .....	33

IV. Análisis económicos de los coagulantes estudiados en relación a las concentraciones óptimas.....34

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>atm</b>	Atmosferas
<b>n</b>	Escala de Kolmogoroff
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>mg/L</b>	Miligramos por litros
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto



## GLOSARIO

<b>Coagulación</b>	Proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, puede inducirse por medio de reactivos.
<b>Coágulo</b>	Partículas aglutinadas con peso específico superior al agua y poca masa.
<b>Coloides</b>	Partículas que son grandes en la escala molecular, pero lo bastante pequeñas como para permanecer suspendidas indefinidamente en un sistema de disolvente.
<b>Floculación</b>	Proceso químico mediante el cual con la adición de sustancias coloidales se facilita su decantación y filtración.
<b>Flóculos</b>	Masa que es formada por la acumulación de partículas suspendidas.
<b>Floculación ortocinética</b>	Se basa en las colisiones de partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa del agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

**Floculación  
percinética**

Movimiento natural de las moléculas del agua,  
inducida por la energía térmica.

**Escala Kolmogorff**

Es la escala más pequeña en la cual puede existir  
turbulencia sin que sea destruida por la viscosidad.

## RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación tuvo como objetivo general la evaluación comparativa de dos coagulantes en la remoción de propamocarb HCl y fluopicolide en aguas residuales de una industria manufacturera de agroquímicos.

Para esta acción, se contó con aguas residuales de la planta de agroquímicos y dos tipos diferentes de coagulantes, uno de sales metálicas inorgánicas (sulfato de aluminio) y el otro un polímero orgánico sintético (poliacrilamida). Se analizó cual es la concentración más eficaz de estos dos coagulantes en la remoción de propamocarb HCl y fluopicolide.

Por lo cual se tomaron distintas concentraciones de ambos coagulantes, las cuales fueron: 40, 45, 50, 55 y 60 mg/L. Cada una de estas concentraciones se disolvió en una muestra de agua residual de un volumen de un litro. Posteriormente, se realizó la prueba de jarras (norma AWWA C.2.5.1.1), con una mezcla rápida de 100 rpm durante 1 minuto y una mezcla lenta de 40 rpm durante 5 minutos.

Para la medición de la concentración de propamocarb HCl y fluopicolide se utilizó el método de cromatografía líquida de alta resolución, la cual funciona inyectando la muestra a través de una columna de separación cromatografía. Esta separación se lleva a cabo para determinar de forma selectiva el porcentaje de concentración de propamocarb HCl y fluopicolide restantes en la muestra.

Al final de la investigación se logró determinar que la concentración de propamocarb HCl y fluopicolide es afectada con la adición de ambos coagulantes utilizados. El coagulante y las concentraciones óptimas para la floculación de propamocarb HCl y fluopicolide fue la poliacrilamida a las siguientes concentraciones, respectivamente, 55 y 40 miligramos por litro. Tales concentraciones presentaron los siguientes porcentajes de remoción del 97,45 y 91,37 por ciento, respectivamente.

# OBJETIVOS

## General

Evaluar la eficiencia de remoción dos coagulantes catiónicos para la remoción de clorhidrato de propil 3-(dimetilamino) propil carbamato y 2,6-dicloro-N-((3-cloro-5-(trifluorometil)-2-piridinil)metil) benzamida en aguas residuales de una industria manufacturera de agroquímicos utilizando la norma AWWA C.2.5.1.1.

## Específicos

1. Evaluar 5 dosis de sulfato de aluminio para optimizar la floculación de Propamocarb HCl y fluopicolide.
2. Evaluar 5 dosis de poliacrilamida para optimizar la floculación de propamocarb HCl y fluopicolide.
3. Determinar si existen diferencias significativas en las concentraciones iniciales y finales de propamocarb HCl y fluopicolide en función de la dosis óptima de cada coagulante catiónico.
4. Determinar el coagulante óptimo, tomando en consideración la opción que cumpla con el objetivo de reducir la concentración de propamocarb HCl y fluopicolide en las aguas residuales y, a la vez, sea menos costosa.

## **Hipótesis**

Los ingredientes activos propamocarb HCl y fluopicolide pueden ser removidos del agua residual de una industria manufacturera de agroquímicos por medio de la aplicación de coagulantes.

### **Hipótesis nula**

Existe diferencia significativa entre las concentraciones de propamocarb HCl y fluopicolide antes y después de la aplicación de coagulantes.

### **Hipótesis alternativa**

No existe diferencia significativa entre las concentraciones de propamocarb HCl y fluopicolide antes y después de la aplicación de coagulantes.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la elevada contaminación de efluentes hídricos a causa de las aguas residuales, su tratamiento adecuado es de gran importancia. Sobre todo, se debe prestar atención a las aguas residuales que son generadas en industrias manufactureras de agroquímicos, ya que estos productos son utilizados en su mayoría para mitigar o eliminar alguna plaga en específico.

El tratamiento de estas aguas es una opción para mitigar la contaminación ambiental que a su vez ayudará a disminuir los costos de tratamiento. Para que esto suceda se deben mantener las características fisicoquímicas del agua.

Para mantener las características fisicoquímicas del agua se trataron las aguas residuales con la aplicación de dos coagulantes con el fin de remover los componentes activos del fungicida los cuales, por poseer moléculas orgánicas, son los provocadores del crecimiento de mohos y/o bacterias los que provocan la rápida degradación de los componentes del agua.

Con el desarrollando de este trabajo se ayudó a mejorar y facilitar el tratamiento de aguas residuales con altas cargas de componentes activos del fungicida, lo cual contribuye a la reducción de la contaminación producida por la empresa.

Además, este trabajo de graduación está dirigido a empresas productoras de fungicidas con conciencia dispuestas a encontrar una solución al problema de la contaminación generada en sus actividades comerciales.



## 1. ANTECEDENTES

Estudios anteriores para trabajos de graduación han realizado análisis del uso de coagulantes para disminuir la carga contaminante del agua, algunos de estos se describen a continuación.

En el 2009 se publicó la tesis titulada *Clarificación del agua residual del área de pintura base látex de una fábrica de pinturas mediante coagulación, floculación y filtración*, realizada por la estudiante Ana Lucía Fuentes López. Identifica y estudia las características del agua residual proveniente de la fabricación de pintura a base de látex y propone el método de coagulación, floculación y filtración para clarificación de dicho tipo de aguas. Su conclusión fue que por medio de los métodos mencionados anteriormente se puede reducir la concentración de color en el agua residual y se recomienda la implementación de este método.

En el 2014 se publicó la tesis titulada *Comparación de la eficiencia del sulfato de aluminio y el sulfato ferroso en la remoción de sólidos en suspensión en aguas residuales de tipo ordinario*, realizada por el estudiante Luis Antonio Aldana Massella y asesorado por la Ingeniero Zenón Much Santos. Realizó un análisis por medio del ensayo de jarras, una herramienta muy apreciable para medir la evaluación y caracterización de la eficiencia de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación utilizando sulfato de aluminio y sulfato ferroso. Su conclusión fue que el sulfato de aluminio es el mejor reactivo con un 89,23 % de remoción de sólidos en suspensión en aguas residuales en aguas de tipo ordinario.

En el 2009 se publicó la tesis titulada *Evaluación de la fotocátalisis solar en el tratamiento de aguas contaminadas con herbicidas utilizados en Guatemala*, realizada por la estudiante Claudia Elizabeth Salguero Salguero asesorada por el Doctor José Víctor Quiroa Noriegas. En este trabajo se utilizó fotocátalisis solar utilizando como catalizador  $\text{TiO}_2$  para tratar aguas contaminadas con dos herbicidas: atrazina y glifosato. Concluyo que a  $\text{pH}=4$  el glifosato obtuvo mayor degradación utilizando una proporción de  $\text{TiO}_2/\text{herbicida}=1/1$ ; mientras que la atrazina obtuvo mayor degradación utilizando una proporción  $\text{TiO}_2/\text{herbicida}=1/2$ .

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. El agua

La molécula del agua está formada por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno. Las propiedades físicas del agua son la ausencia de olor, sabor y color, el punto de ebullición del agua a la presión de una atmósfera, que suele ser la que hay al nivel del mar, es de 373 K grados Kelvin (100 °C) y su punto de congelación es de 273 K grados Kelvin (0 °C), ambos bajo presión atmosférica.

“La densidad máxima del agua líquida es de 1 kg/L (g/cm<sup>3</sup>), alcanzándose este valor a una temperatura de 276,8 K (273,8 °C); la densidad del agua sólida es menor que la del agua líquida a la misma temperatura, 0,917 kilogramos/litro (g/cm<sup>3</sup>)”<sup>1</sup>.

Se considera el disolvente universal ya que es el líquido en el que gran cantidad de sustancias se disuelven fácilmente, debido a la polaridad de la molécula, la cual se encuentran unidas por puentes de hidrógeno. El agua es incluso capaz de disolver gases. El agua cubre el 72 % de la superficie del planeta Tierra y representa entre el 50 % y el 90 % de la masa de los seres vivos. Es una sustancia relativamente abundante aunque solo supone el 0,022 % de la masa de la Tierra. Se puede encontrar esta sustancia en prácticamente cualquier lugar de la biósfera y en los tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso.

---

<sup>1</sup>RAMALHO, Rubens Sette. *Tratamiento de aguas residuales*. p. 705.

Se constituye en forma líquida en los mares, ríos, lagos y océanos; en forma sólida, nieve o hielo, en los casquetes polares, en las cumbres de las montañas y en los lugares de la Tierra donde la temperatura es inferior a 273 K grados Kelvin (0 °C); y en forma gaseosa se halla formado parte de la atmósfera terrestre como vapor de agua.

El agua es un recurso no renovable. Tiene valor económico, social y ambiental. Es utilizada con distintos fines; este, juega un papel importante en la vida de todos y tiene una gran influencia en el desarrollo humano.

## **2.2. Agroquímicos**

Son sustancias químicas que tienen como objetivo controlar, provenir o destruir cualquier plaga para mantener y conservar los cultivos. Estos productos son altamente tóxicos y nocivos para la salud de los organismos vivos, por lo que pueden ser potencialmente peligrosos y su manejo debe ser realizado con altas medidas de seguridad.

- Sustancia o ingrediente activo: es el componente que le confiere la acción biológica al agroquímico y es, además, el que contiene el efecto tóxico del producto.
- Aditivos: son ingredientes inertes o adyuvantes que facilitan el transporte y sus características físicas y químicas de las formulaciones.
- Adherentes: son adyuvantes destinados a aumentar la adherencia de un ingrediente activo.
- Emulsionantes: son adyuvantes que permiten que el ingrediente activo se mezcle con el agua formando una emulsión y aumenta su estabilidad.

- Humectantes: son adyuvantes que disminuyen la tensión superficial de un líquido al aumentar su tendencia a establecer contacto con la superficie de un sólido.

Dentro de la gama de agroquímicos se encuentran los fungicidas, que por su alta producción, es de vital importancia su estudio para la reducción de desechos al procesarlos.

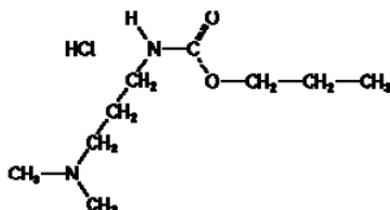
### **2.2.1. Fungicidas**

Sustancias destinadas al control de hongos causantes de enfermedades en las plantas; esto genera bajo rendimiento y calidad en los cultivos, además disminuye el periodo de almacenamiento y posibles toxinas que puedan causar enfermedades en los seres humanos.

#### **2.2.1.1. Propamocarb HCl**

Acrónimo del compuesto clorhidrato de propil 3-(dimetilamino) propil carbamato hidrociorado, utilizado en la formulación de productos fungicidas. Su fórmula química es  $C_9H_{21}ClN_2O_2$  y su forma física es un líquido viscoso de ligero color amarillo. No es considerado persistente, bioacumulativo y tóxico, además, es rápidamente biodegradable. Su pH está en un rango de 2 a 4.

Figura 1. **Molécula de clorhidrato de propil 3-(dimetilamino) propil carbamato**

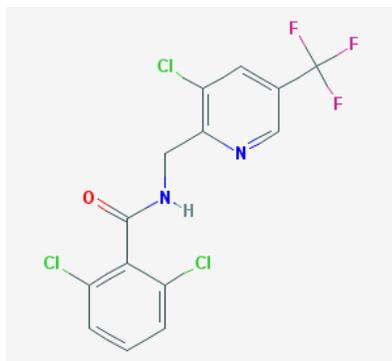


Fuente: elaboración propia.

### 2.2.1.2. **Fluopicolide**

Acrónimo del compuesto 2,6-dicloro-N-((3-cloro-5-(trifluorometil)-2-piridinil)metil) benzamida; su fórmula química es  $C_{14}H_8Cl_3F_3N_2O$ ; su estado físico es un sólido fino color beige; no es considerado persistente, bioacumulativo y tóxico; aunque rápidamente biodegradable. Su pH es de 6,5.

Figura 2. **Molécula de 2,6-dicloro-N-((3-cloro-5-(trifluorometil)-2-piridinil)metil) benzamida**



Fuente: elaboración propia.

### **2.3. Aguas residuales agroquímicos**

La contaminación del agua por plaguicidas se produce al ser arrastrados por el agua de los campos de cultivo hasta los ríos y mares donde se introducen en las cadenas alimenticias que provocan la muerte de varias formas de vida necesarias en el balance de algunos ecosistemas.

Además, las industrias productoras de estos compuestos son también responsables de la contaminación del agua ya que utilizan grandes cantidades de este recurso en sus sistemas productivos y de limpieza de equipo. Estos compuestos químicos pueden provocar la muerte de peces en agua dulce y salada. También, se pueden acumular en los tejidos de algunos peces que a su vez ponen en peligro la vida de sus consumidores.

Los plaguicidas vertidos en las aguas ponen en peligro la vida de animales y vegetales acuáticos. En condiciones de laboratorio se ha observado que algunos son cancerígenos, teratogénicos y mutágenos en ratas, hamsters y monos.

Al ser Guatemala un país agrícola, el uso de los plaguicidas se ha incrementado enormemente durante los últimos años. Esto representa un problema para los ecosistemas acuáticos y para la depuración de las aguas, ya que muchos de estos compuestos son muy estables, por lo tanto, de difícil degradación.

### **2.3.1. Reutilización de aguas residuales**

Esta actividad está estrechamente relacionada con la producción más limpia y con los beneficios que esto genera al medio ambiente. Al reutilizar las aguas residuales se generan los siguientes beneficios:

- Producción más limpia
- Mejoramiento de la eficiencia de los procesos
- Control de contaminantes industriales
- Impacto económico

#### **2.3.1.1. Producción más limpia**

Este concepto se refiere a una estrategia ambiental preventiva para la minimización de residuos y/o emisiones al medio ambiente por parte de las industrias y disminución de costos de tratamiento de residuos por la actividad productiva que generan beneficios como:

- El ahorro de materias primas, agua y energía.
- La reducción de cantidad y peligrosidad de los residuos y las emisiones contaminantes.
- Desarrollo sostenible.

Hasta ahora, las tecnologías ambientales convencionales han trabajado principalmente en el tratamiento de desechos y emisiones existentes, por ejemplo: tratamiento de aguas residuales, tratamiento de lodos, incineración de desechos, entre otros. Esto se caracteriza, especialmente, por los gastos adicionales para la empresa al final del proceso por la correcta gestión de los residuos.

Comparada con la eliminación por servicios externos o tecnologías de tratamiento, presenta varias ventajas:

- La minimización de desechos y emisiones generalmente induce un proceso de innovación dentro de las empresas.
- La responsabilidad ambiental se ve fortalecida.
- La minimización de desechos y emisiones es un paso hacia un desarrollo económico más sostenible.
- La producción más limpia presenta un potencial de soluciones para mejorar la eficiencia económica de la empresa pues contribuye a reducir la cantidad de materiales y energía usados.

#### **2.3.1.2. Mejoramiento de la eficiencia de los procesos**

Este aspecto es un pilar importante en la industria. Se refiere a la generación de procesos altamente efectivos en calidad. Hace énfasis en la velocidad y orden de los mismos; esto se logra a través de un programa de mejora continua.

La eficiencia también se mide por los costos de producción, lo cual lleva consigo los costos de mano de obra, materia prima, empaques, energía y gestión de residuos. En los aspectos antes mencionados, la gestión de residuos es un factor determinante, por lo que su mitigación es un paso importante en la disminución de costos y el desarrollo sostenible.

### **2.3.1.3. Impacto económico**

Al pretratar el agua se genera una carga contaminante menor y un manejo más fácil de las aguas residuales, lo que genera ahorro económico en dos aspectos importantes.

- Menos desechos: al reutilizar antes que tratar, se obtiene una significativa disminución en la cantidad de desechos producidos por la actividad industrial.
- Energía: por ser el agua desmineralizada se genera un gran ahorro en el tratamiento previo que se le da a la misma.

### **2.3.2. Residuos biológicos en agua residual**

Sólo porque en las agua de lavado estén presentes moléculas orgánicas de agroquímicos, no significa que estén libres de contaminación biológica. Los microorganismos, las biopelículas y otros residuos orgánicos se alimentan de las moléculas orgánicas presentes en las aguas residuales.

Debido al contenido de moléculas orgánicas, provenientes de la producción de agroquímicos que presentan las aguas de lavado de tanques y accesorios donde se formulan estos productos, los microorganismos tienden a su rápido crecimiento, y como se sabe, este es exponencial y genera un problema; conocer el grado de contaminación microbiológica que las aguas presentan en un determinado periodo de tiempo, ya que por ser las bacterias de tamaño del orden  $10^{-6}$  m, no se ven a simple vista y no se pueden cuantificar con facilidad.

En la actualidad existen distintos métodos analíticos para cuantificar de manera aproximada la cantidad de microorganismos presentes en una determinada muestra. Algunos son: bioluminiscencia y laminocultivos.

## **2.4. Coagulación**

Es el proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al agua, a estas partículas se les llama flóculos.

Comienza en el mismo instante cuando se agregan los coagulantes al agua y dura muy poco tiempo. Básicamente, consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

La coagulación se puede inducir generalmente con sustancias químicas agregadas para optimizar la coagulación. Al formar un flóculo más fuerte y más sedimentable, mediante la coagulación, se pueden superar caídas de temperatura que retardan dicha propiedad. Reducir la cantidad de coagulante requerido y disminuir la cantidad de lodo producido.

Se utilizan también sustancias llamadas ayudas de coagulación, estas producen poco o ningún flóculo al ser usada solas, pero mejoran los resultados obtenidos con los coagulantes. Algunos ejemplos de estas sustancias son: aluminato de sodio, bicarbonato de sodio, carbonato de calcio, carbonato de sodio, cloruro férrico, hidróxido de sodio (sosa cáustica), hipoclorito de calcio, sílice activada, entre otros.

## 2.5. Floculación

Tres mecanismos pueden actuar en el primer fenómeno: el de adsorción-desestabilización basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión. El del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides, y el de sobresaturación de la concentración de coagulantes en el agua.

El puente químico debe distinguirse entre floculación ortocinética y pericinética o con escala de turbulencia por encima o por debajo de la microescala de Kolmogoroff  $\eta$ . La primera es inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas. La segunda es la promovida, internamente dentro del líquido, por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro y se realiza en un tiempo muy corto después de desestabilizada la partícula hasta que la partícula tiene un tamaño que se acerca a la microescala de Kolmogoroff. En las plantas de tratamiento es tanto ortocinética como pericinética.

## 2.6. Sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ )

Se le conoce también como alumbre. Es el coagulante estándar usado en tratamiento de aguas. El producto comercial tiene usualmente la fórmula ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ ) con masa molecular de 600. El material es empacado en diversas formas: en polvo, molido en terrones, en granos parecidos al arroz y en forma líquida. Cuando se añaden soluciones de sulfato de aluminio al agua, las moléculas se disocian en  $Al^{+3}$  y  $SO_4^{-2}$ . El  $Al^{+3}$  puede combinarse con coloides cargados negativamente para neutralizar parte de la carga de la partícula coloidal.

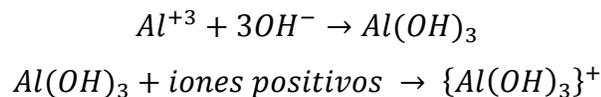
Figura 3. **Carga de la partícula coloidal**



Fuente: Revista Científica Abierta Universidad de Chile *Datos de relación entre turbidez, pH y concentración del sulfato de aluminio*. <http://www.cabierta.uchile.cl/15/articulos/pdfedu4pdf>.

Consulta: 23 de octubre de 2016.

El  $\text{Al}^{+3}$  puede también combinarse con los  $\text{OH}^-$  del agua para formar hidróxido de aluminio.



Este hidróxido de aluminio es de carácter coloidal ya que absorbe iones positivos en solución para formar un sol cargado positivamente. Dicho sol cargado positivamente neutraliza la carga de los coloides negativos y ayuda a complementar la aglomeración de los coloides negativos.

Figura 4. **Aglomeración de los coloides negativos**



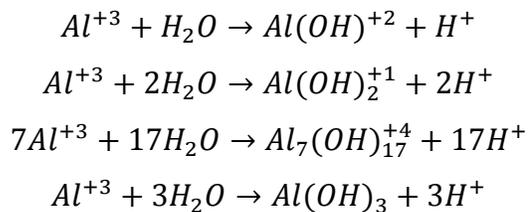
Fuente: Revista Científica Abierta Universidad de Chile *Datos de relación entre turbidez, pH y concentración del sulfato de aluminio*. <http://www.cabierta.uchile.cl/15/articulos/pdfedu4pdf>.

Consulta: 23 de octubre de 2016.

Casi siempre se forma un exceso de sol de hidróxido de aluminio; su destrucción y precipitación se logra mediante los iones sulfato y otros iones negativos presente en el agua.

Con respecto a los coagulantes de hierro y los de aluminio se puede afirmar que los cationes metálicos reaccionan inmediatamente con el agua para formar iones metálicos hidroxilados e hidrógeno; los aniones permanecen libres o combinados con otros cationes.

Con el alumbre ocurren las siguientes reacciones:

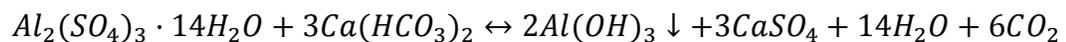


Los iones metálicos hidroxilados son adsorbidos por el coloide negativo y neutralizan su carga superficial permitiendo la coagulación. La coagulación por adsorción y neutralización de la carga es posiblemente el fenómeno predominante en soluciones de alta concentración de coloides.

Como se dijo previamente, los coloides también pueden ser barridos por los flóculos formados, al ser atrapados dentro de ellos durante la floculación y sedimentación; en otras palabras, los precipitados de  $Al(OH)_3$  atrapan los coloides efectuando una coagulación de barrido, la cual predomina en algunas soluciones de concentración coloidal baja. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que si se sobredosifica el coagulante, el fenómeno puede revertirse y resurgir el coloide negativo causando nuevamente el problema de turbiedad y/o color.

En general, los complejos de carga positiva más alta son más efectivos en la reducción del potencial zeta y, por lo tanto, en efectuar la coagulación; por esta razón, es importante que el sulfato de aluminio sea distribuido a través de toda la masa de agua rápidamente, con el fin de que se logre el contacto con todas las partículas coloidales antes de que se presente la formación de las especies menos deseables. Esto se logra mediante una mezcla instantánea que provea una buena distribución del coagulante en el menor tiempo posible, un período no mayor de 10 segundos.

Durante la floculación, generalmente, un período de 10-30 minutos, se completa la aglomeración de las partículas y crecen los flóculos hasta una condición adecuada para su sedimentación. Durante la sedimentación, el flóculo se asienta para dejar un líquido clarificado. Cuando se añade sulfato de aluminio al agua, este reacciona con la alcalinidad natural del agua para formar floculos de hidróxido de aluminio:



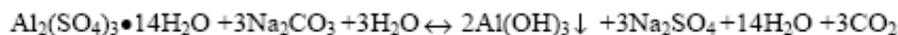
La masa molecular del sulfato de aluminio es aproximadamente de 600; el bicarbonato de calcio representa la alcalinidad, la cual se expresa como  $CaCO_3$ , con masa molecular de 100.

El  $CO_2$  tiene masa molecular de 44, dadas estas relaciones de masa; se deduce de la ecuación anterior que cada miligramo litro mg/L de alumbre disminuye la alcalinidad del agua en 0,5 miligramo litro mg/L y produce 0,44 miligramo litro mg/L de  $CO_2$ .

La producción de  $CO_2$  es indeseable puesto que incrementa la corrosividad del agua; además, la ecuación muestra cómo se presenta una

conversión de bicarbonato de calcio en sulfato de calcio, o sea una reducción de la dureza carbonatada y un aumento de la no carbonatada; lo cual es también desventajoso desde el punto de vista de remoción de dureza; si el agua no contiene alcalinidad natural suficiente para reaccionar con el alumbre, es necesario añadir la alcalinidad necesaria.

Esto se hace normalmente con cal o soda ash:



La cal es menos costosa que el bicarbonato de sodio; la cal aumenta el contenido de dureza no carbonatada; la soda incrementa la corrosividad.

La dosis de alumbre varía normalmente entre 5 a 50 miligramos litro mg/L para aguas naturales.

Comúnmente, el pH efectivo para coagulación con alumbre es de 5,5 a 8,0 y se prefiere para tratar aguas superficiales con buena calidad por ser el único químico necesario para la coagulación.

## **2.7. Poliacrilamida poli(2-propenamida)**

El acondicionamiento con polímeros orgánicos, compuestos de cadenas largas de monómeros, moléculas solubles en agua, aniónicos, no iónicos o catiónicos, es un proceso complejo de desestabilización de partículas mediante neutralización de carga y floculación. Las dosis de polímeros son muy inferiores

a las de a condicionantes metálicos inorgánicos, en general, de 5 a 15 g/kg de sólidos secos.

Los polímeros de bajo peso molecular, 20,000 a 100,000, se describen generalmente como coagulantes primarios; son solubles en agua; se adquieren en concentraciones del 30 % al 50 % y son útiles en clarificación de aguas. Los polielectrólitos de peso molecular intermedio, 300,000 a varios millones, se consiguen del 10 por ciento para aplicación en acondicionamientos de lodos biológicos de concentración de alta. Finalmente, los polielectrólitos de alto peso molecular, entre  $2 \times 10^6$  y más de  $12 \times 10^6$ , se consiguen en soluciones viscosas, emulsiones látex o secos; su solución se limita a concentraciones de 0,5 % a 2 % y se usan en procesos de FAD para los biológicos. En general, a mayor peso molecular el polielectrólito tiene un rango más amplio de aplicabilidad y efectividad.

En la dosificación de polímeros, la mezcla es de importancia fundamental; debe ser intensa, para dispersar apropiadamente el polímero viscoso, e inmediata, para que la neutralización de carga sea completa antes de empezar la floculación. Si se usan polímeros aniónicos y catiónicos, simultáneamente, el aniónico se puede agregar primero que el catiónico; pero, en general, se usan sobre todo los catiónicos.

## **2.8. Análisis de concentración**

### **2.8.1. Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)**

Este tipo de análisis se utiliza para determinar el porcentaje de concentración presente de un compuesto en determinada muestra, la cual funciona inyectando la muestra a través de una columna de separación

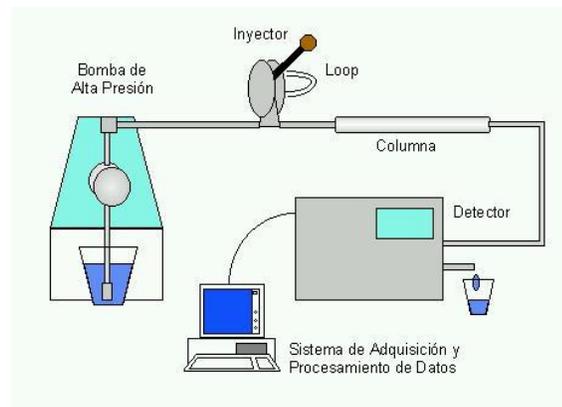
cromatografía, la cual, en el caso de líquidos contiene en su interior un filtro compuesto por esferas selectivas en donde se lleva a cabo la separación de los componentes de una muestra.

Esta separación es llevada a cabo para determinar de forma selectiva el porcentaje de concentración de un determinado componente de una sustancia, con base en un estándar preparado, previamente calibrado, el cual representa el 100 % de la sustancia analizada. El equipo utilizado para el análisis cromatográfico contiene 5 partes importantes:

- Bomba: este dispositivo es utilizado para mantener un flujo constante a través de la columna de separación.
- Inyector: realiza el trabajo de succión de la muestra a analizar y la deposita a la entrada de la columna.
- Conducciones y conexiones: importantes en la puesta en marcha del cromatógrafo, para unir la bomba con la columna y esta última con el detector, de manera de no dejar escapar parte del líquido o de volver a mezclar los componentes separados en la columna.
- Columna: este dispositivo es donde se lleva a cabo la separación de los diferentes componentes de una muestra analizada, existen diferentes tipos, los cuales varían en diámetro, longitud y tamaño de partícula del relleno del filtro.

- **Detector:** como su nombre lo indica, este componente detecta una característica de la sustancia analizada en una muestra y de esta forma envía una señal a la computadora para calcular mediante integración de la curva de salida la cantidad de dicha sustancia en porcentaje, comparándola con un estándar previamente calibrado.

Figura 5. **Diagrama de equipo de un cromatógrafo de líquidos**



Fuente: elaboración propia.

### 2.8.2. Pruebas de jarras

La prueba de jarras es la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros para la potabilización del agua. Se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio; existe en el mercado una gran variedad de equipos para pruebas de jarras, pero en toda su versatilidad debe radicar en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (rpm). En este proceso influyen factores químicos y físicos. Entre estos están:

- pH
- Temperatura
- Concentración de coagulante
- Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
- Grado de agitación
- Tiempo de sedimentación

El pH desempeña un papel muy importante en el estudio de los fenómenos de coagulación-floculación, es así como una parte de la carga de las partículas coloidales que han absorbido iones  $\text{OH}^-$ , queda destruida por un aumento de la concentración de iones  $\text{H}_3\text{O}^+$  que ocasiona una disminución de la estabilidad de la suspensión coloidal. Preferiblemente, el pH debe quedar dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante usado.

La temperatura del agua, también, influye grandemente en la efectividad de la coagulación y en la velocidad de formación del flóculo. Según disminuye la temperatura del agua, debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, con el objetivo de lograr o asegurar la formación de flóculos adecuados.

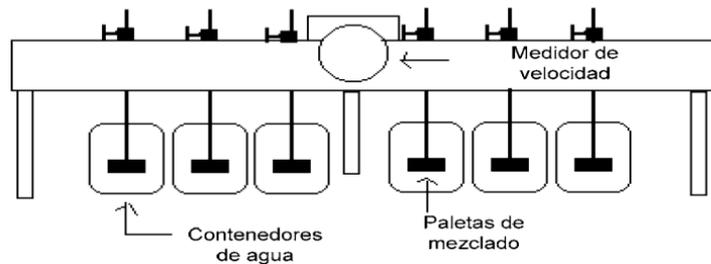
El tiempo de mezclado del coagulante en el agua a tratar será el necesario para que el producto utilizado se difunda con la mayor rapidez posible. El tiempo de coagulación es extraordinariamente breve, menos de un segundo y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar.

El ensayo de jarras ha sido ampliamente usado; sus resultados tienen gran aplicabilidad en el diseño y la operación real de las unidades de

tratamiento, así como en la optimización de plantas existentes; el procedimiento requiere como datos previos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda.

La unidad de mezcla típica consiste en una serie de agitadores de paletas acoplados mecánicamente para operar a la misma velocidad, generalmente, entre 10 a 300 revoluciones por minuto. Como jarras de coagulación se recomiendan jarras rectangulares de 1 a 2 litros en acrílico transparente.

Figura 6. **Diagrama del equipo de pruebas de jarras**



Fuente: elaboración propia.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Tabla I. Variables presentes en el proceso de la investigación

Núm.	Variable	Dimensional	Dependiente	Independiente
1	Tiempo	semana	X	
2	Coagulante	mg/L	X	
3	pH	adimensional		X
4	Concentración	ppm		X
5	Temperatura	°C		X
6	Presión	atm		X

Fuente: elaboración propia.

#### 3.2. Delimitación del campo de estudio

- Área: plaguicidas.
- Industria: agroquímicos.
- Activos químicos: propamocarb hidrociorado y fluopicolide.
- Clasificación según organismos que controla: fungicida.
- Según su composición química: carbamato en el caso de propamocarb y benzamida en el caso del fluopicolide.
- Emulsificante: Attagel 50.

- Proceso: formulación de suspensiones concentradas en tanques con agitación y sistema de refrigeración.
- Etapa del proceso: lavado de tanques y accesorios utilizados en los procesos de formulación de fungicidas líquidos.
- Ubicación: se realizará el estudio en el área de formulación de suspensiones concentradas, en la planta de agroquímicos.
- Condiciones ambientales: los análisis de laboratorio se realizarán a una temperatura estándar estable de 20 °C.

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

Personas que aportan trabajo, esfuerzo, tiempo y conocimientos.

- Investigador: Ronald Humberto Echeverría Herrera.
- Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias.
- Coasesores en plantea: Inga. Ana Mercedes Donis Martinez, Lic. Qco. Hugo Alejandro Solórzano.
- Analistas de laboratorio: Br. Oliver Alexander Rivera, Br. Sergio Estuardo Rodríguez, Br. Brian Estuardo Mereno.

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

#### **3.4.1. Materia prima**

- Sulfato de aluminio grado industrial
- Poliacrilamidas grado industrial

#### **3.4.2. Equipo de medición**

- Potenciómetro, marca Mettler Toledo MA 235
- Cromatógrafo HPLC, marca Agilent technologies 1200 series
- Termómetro de mercurio rango -35 °C - +280 °C
- Balanza analítica, marca Swiss modelo Lx 220A scs

#### **3.4.3. Equipo auxiliar**

- Agitador múltiple para pruebas de jarras

#### **3.4.4. Cristalería de medición volumétrica**

- Balones aforados 100 mL
- Pipetas 10 mL
- Probetas 1 L

#### **3.4.5. Cristalería de contención**

- Viales de vidrio
- Jarras 1 L
- Vaso de precipitado (Breaker) 100 mL

#### **3.4.6. Cristalería**

- Varilla de agitación
- Embudo

#### **3.4.7. Equipo de seguridad**

- Guantes
- Mascarilla de media cara
- Lentes

#### **3.4.8. Reactivos**

- Metanol analítico
- Estándar de activo propamocarb HCl
- Estándar de activo fluopicolide

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

Se realizarán análisis a nivel de laboratorio de concentración inicial de propamocarb HCl y fluopicolide al momento de extraer el agua de los tanques y accesorios de formulación; luego, se procederá a realizar el análisis de concentración óptima de coagulante que se determinará posteriormente al ejecutar nuevamente el análisis de concentración de propamocarb HCl y fluopicolide; a través de gráficas se podrá observar la comparación de la reducción de estos dos componentes activos.

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Figura 7. Recolección de la información

1. Agua empleada en el ensayo: \_\_\_\_\_

2. Muestra de coagulante: \_\_\_\_\_

3. Características iniciales de la calidad del agua:

3.1 Concentración de Propamocarb HCl: \_\_\_\_\_

3.2 Concentración de Fluopicolide: \_\_\_\_\_

3.3 pH: \_\_\_\_\_

3.4 Temperatura: \_\_\_\_\_

4. Fecha de inicio del ensayo: \_\_\_\_\_

5. Fecha de finalizado del ensayo: \_\_\_\_\_

Serie No. Clave #	Mezcla rápida: 100 rpm 1min		Mezcla lenta: 40 rpm (Floculación) 5 min	Tiempo de sedimentación: 2 min	Concentración final de Propamocarb HCl	Concentración final de Fluopicolide
	Jarra No.	Coagulante mL en 1L				
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Muestreo

Se seleccionó 1 muestra a la cual se le añadieron 5 diferentes concentraciones de coagulante; a cada concentración se le aplicaron 3 repeticiones; el número de experimentos a realizar es igual a 15.

Considerando un duplicado para cada experimento, el número total de muestras es igual a 30 para cada componente activo.

### 3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se utilizó la siguiente tabla para el ordenamiento de los datos a evaluar.

Tabla II. Ordenamiento de datos

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1			
2			
3			
Promedio			

Fuente: elaboración propia.

### 3.9. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos se hará uso de las medidas de tendencia central y dispersión, necesarias para representar los resultados.

#### 3.9.1. Medidas de tendencia central

Con objetivo de resumir los datos obtenidos en un valor representativo, se utilizan las siguientes medidas de tendencia central.

### 3.9.1.1. Media aritmética

La media aritmética de un conjunto de valores  $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$  de una variable  $x$ , viene determinada por la suma de dichos valores, dividida por el número de la muestra ( $n$ ), representada matemáticamente de la siguiente forma:

$$x_p = \frac{\sum x_i}{n}$$

### 3.9.2. Medidas de dispersión

Describen la cantidad de dispersión o variabilidad que se encuentra entre los datos. El agrupamiento entre los datos indica una dispersión baja y viceversa.

#### 3.9.2.1. Desviación estándar

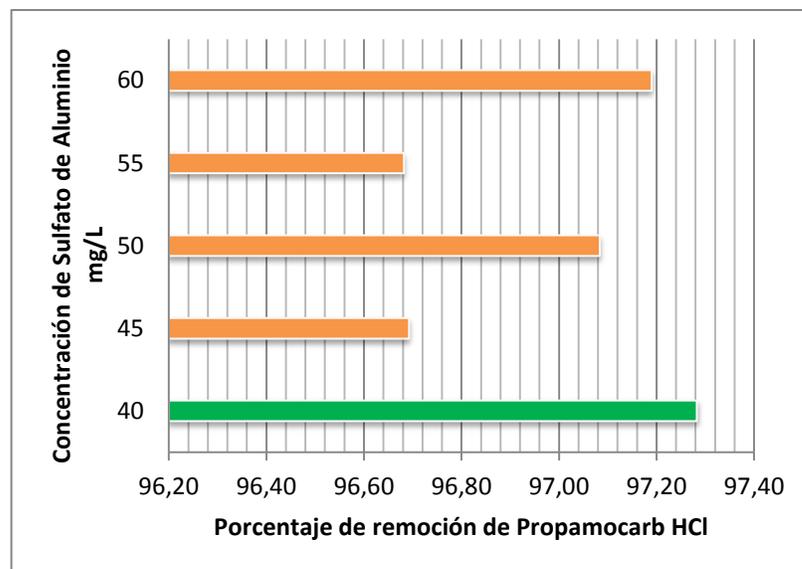
La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - x_p)^2}{n - 1}}$$



## 4. RESULTADOS

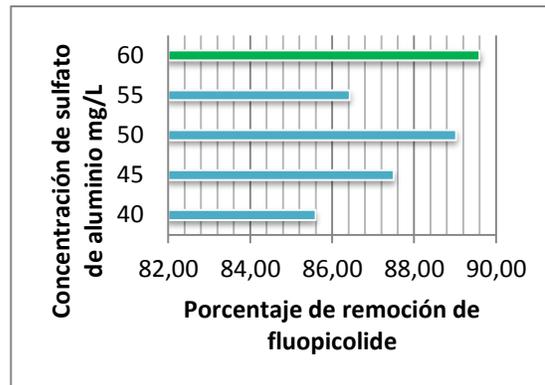
Figura 8. **Dosis de sulfato de aluminio que optimiza la floculación de propamocarb HCl**



Color	Dosis óptima	Porcentaje de remoción
■	40 mg/L	97,28

Fuente: elaboración propia.

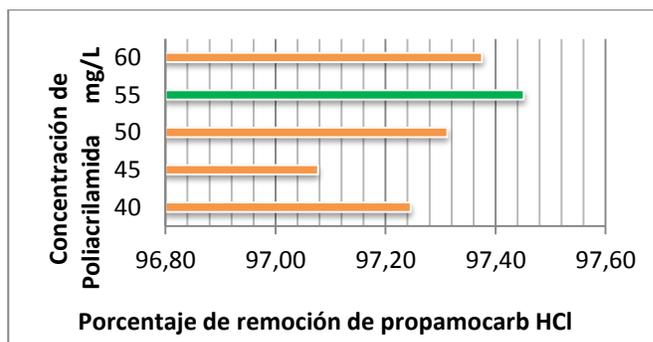
Figura 9. **Dosis de sulfato de aluminio que optimiza la floculación de fluopicolide**



Color	Dosis óptima	Porcentaje de remoción
	60 mg/L	89,59

Fuente: elaboración propia.

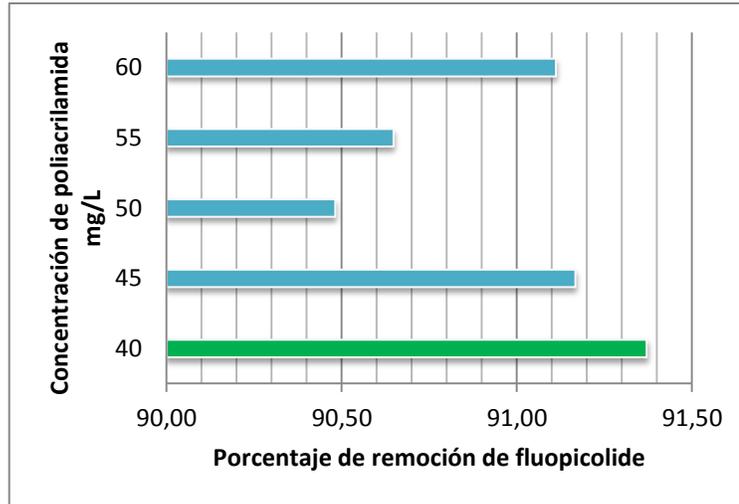
Figura 10. **Dosis de poliacrilamida que optimiza la floculación de propamocarb HCl**



Color	Dosis óptima	Porcentaje de remoción
	55 mg/L	97,45

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Dosis de poliacrilamida que optimiza la floculación de fluopicolide**



Color	Dosis óptima	Porcentaje de remoción
	40 mg/L	91,37

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Existencia de diferencias significativas en las concentraciones iniciales y finales de propamocarb HCl y fluopicolide en función de la dosis óptima de cada coagulante**

Aceptación de diferencia significativa $Z > 1,96$		
Parámetro	Propamocarb HCl	Fluopicolide
Z	1,05	5,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Análisis económicos de los coagulantes estudiados en relación a las concentraciones óptimas**

<b>Coagulante</b>	<b>Concentración óptima (mg/L)</b>	<b>Volumen a tratar (L)</b>	<b>mg de coagulante</b>	<b>Costo por mg de coagulante (Q)</b>	<b>Costo del tratamiento (Q)</b>
Sulfato de aluminio	60	1 000	60 000	0,00000073	0,0438
Poliacrilamida	40	1 000	40 000	0,00000290	0,1160

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El proceso de coagulación se entiende como la desestabilización eléctrica de las partículas mediante la adición de sustancias químicas que son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible.

La investigación se enfocó en la remoción de propamocarb HCl y fluopicolide contenidos en aguas residuales de lavado de equipo por medio de dos coagulantes distintos: sulfato de aluminio y poliacrilamida. En el proceso de floculación de las especies se obtiene como resultado una disminución de ambas especies.

En la figura 8, el sulfato de aluminio presentó mejor reducción del porcentaje de propamocarb HCl a una concentración de 40 miligramos por litro mg/L de dicho reactivo. Esto se puede determinar debido a que el porcentaje obtenido a la concentración antes mencionada fue mayor que el alcanzado por las otras concentraciones evaluadas.

En la figura 10, la poliacrilamida presentó mejor reducción del porcentaje de propamocarb HCl a una concentración de 55 miligramos por litro mg/L de dicho reactivo. Esto se puede determinar debido a que el porcentaje obtenido a la concentración antes mencionada fue mayor que el alcanzado por las otras concentraciones evaluadas.

Sin embargo, el mejor resultado obtenido fue al utilizar poliacrilamida a una concentración de 55 miligramos por litro (mg/L) ya que esta presenta un porcentaje del 97,45 de remoción de propamocarb HCl. No obstante, no se observaron diferencias significativas en los rendimientos obtenidos entre utilizar sulfato de aluminio o poliacrilamida.

En la figura 9, el sulfato de aluminio presentó mejor reducción del porcentaje de fluopicolide a una concentración de 60 miligramos por litro mg/L de dicho reactivo. Esto se puede determinar debido a que el porcentaje obtenido a la concentración antes mencionada fue mayor que el alcanzado por las otras concentraciones evaluadas.

En la figura 11, la poliacrilamida presentó mejor reducción del porcentaje de fluopicolide a una concentración de 40 miligramos por litro mg/L de dicho reactivo. Esto se puede determinar debido a que el porcentaje obtenido a la concentración antes mencionada fue mayor que el alcanzado por las otras concentraciones evaluadas.

En cuestión, el fluopicolide es más propenso a flocular utilizando poliacrilamida. Puesto que este presenta diferencias significativas respecto al sulfato de aluminio; lo que evidencia que la poliacrilamida es más efectiva en el proceso de floculación del fluopicolide. Obteniendo una remoción del 91,37 %.

Oportuno a que en la floculación de propamocarb HCl no presentó diferencias significativas entre el uso de los coagulantes utilizados para la remoción de este podría utilizarse cualquiera de los dos coagulantes; sin embargo, en el caso de la floculación de fluopicolide en el cual las diferencias fueron altamente significativas lo que indica que el coagulante poliacrilamida presenta un rendimiento elevado a la comparación del sulfato de aluminio;

fundamento que indica que el coagulante recomendado para el tratamiento de estas aguas residuales es la poliacrilamida aunque sea un coagulante más costoso económicamente hablando los resultados que reflejará el uso de este serán satisfactorios.



## CONCLUSIONES

1. La dosis óptima de sulfato de aluminio que optimiza la floculación de propamocarb HCl es de 40 miligramos por litro (mg/L) y la dosis que optimiza la floculación de fluopicolide es de 60 miligramos por litro (mg/L).
2. La dosis óptima de poliacrilamida que optimiza la floculación de propamocarb HCl es de 55 miligramos por litro (mg/L) y la dosis que optimiza la floculación de fluopicolide es de 40 miligramos por litro (mg/L).
3. La floculación de propamocarb HCl no presentó diferencias significativas de concentraciones iniciales y finales; por lo cual, ambos coagulantes presentaron resultados similares. En cambio, con la floculación de fluopicolide si se presentaron diferencias significativas por lo cual el coagulante poliacrilamida es más efectivo en la remoción de fluopicolide en aguas residuales.
4. El coagulante óptimo para la floculación es la poliacrilamida puesto presentó una gran diferencia significativa en la remoción de fluopicolide y este coagulante no posee diferencias significativas con la remoción de propamocarb HCl. Así que este coagulante aunque sea más costoso presentará mejores resultados en la remoción de fluopicolide.



## RECOMENDACIONES

1. El tratamiento de aguas residuales de tipo industrial es indispensable antes de verterlas en el alcantarillado público; un parámetro importante es la disminución de estos compuestos químicos que degradan la calidad del agua.
2. Continuar evaluando otros coagulantes, así como las condiciones bajo las cuales estos favorecen la reducción de compuestos químicos que degradan la calidad del agua.
3. Al ser disminuidos los compuestos químicos en suspensión, será necesario realizar otro estudio que se encargue de analizar y medir la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) ya que estos parámetros se encuentran directamente relacionados.



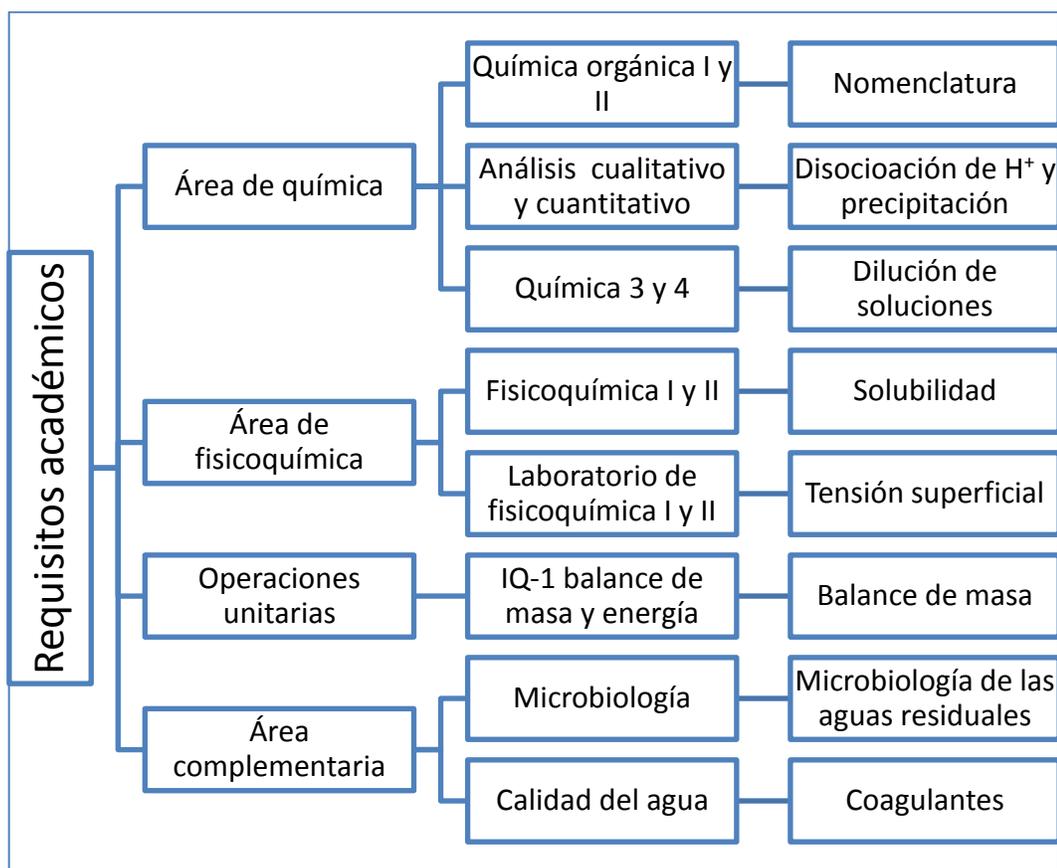
## BIBLIOGRAFÍA

1. ALDANA MASSELLA, Luis Antonio. *Comparación de la eficiencia del sulfato de aluminio y sulfato ferroso en la remoción de sólidos en suspensión en aguas residuales de tipo ordinario*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 120 p.
2. METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de aguas residuales*. México: McGraw-Hill, 1998. 782 p.
3. MINAGRI. *Fabricación de plaguicidas. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial*. Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile, 2016. 47 p.
4. SALGUERO SALGUERO, Claudia Elizabeth. *Evaluación de la fotocatalisis solar en el tratamiento de aguas contaminadas con dos herbicidas utilizados en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 150 p.



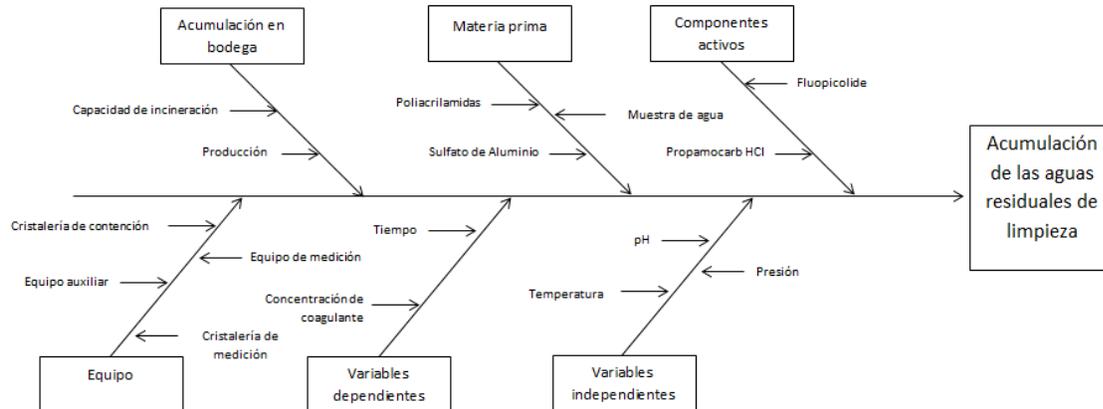
# APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Diagrama de causa y efecto



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 3. Resultados obtenidos en remoción de propamocarb HCl

Sulfato de aluminio 40 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	5,8	97,31
2		5,86	97,29
3		5,94	97,25
Promedio	215,9	5,87±2,93	97,28±0,03

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 4. Resultados en remoción de propamocarb HCl

Sulfato de aluminio 45 mg/L  
Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	6,47	97,00
2		8,14	96,23
3		6,81	96,85
Promedio	215,9	7,14±3,64	96,69±0,40

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 5. Resultados en remoción de propamocarb HCl

Sulfato de aluminio 50 mg/L  
Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	6,48	96,99
2		6,85	96,83
3		5,56	97,42
Promedio	215,9	6,30±3,19	97,08±0,30

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 6. Resultados en remoción de propamocarb HCl**

Sulfato de A luminio 55 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	6,05	97,20
2		7,72	96,42
3		7,72	96,42
Promedio	215,9	7,16±3,67	96,68±0,45

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Resultados en remoción de propamocarb HCl**

Sulfato de aluminio 60 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	6,14	97,16
2		6,03	97,21
3		6,03	97,21
Promedio	215,9	6,07±3,03	97,19±0,03

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 8. Resultados en remoción de propamocarb HCl

Poliacrilamida 40 mg/L  
Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	5,53	97,44
2		7,11	96,71
3		5,20	97,59
Promedio	215,9	5,95±3,09	97,25±0,47

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 9. Resultados en remoción de propamocarb HCl

Poliacrilamida 45 mg/L  
Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	5,75	97,34
2		7,11	96,71
3		6,07	97,19
Promedio	215,9	6,31±3,21	97,08±0,33

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 10. Resultados en remoción de propamocarb HCl**

Poliacrilamida 50 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	6,15	97,15
2		5,92	97,26
3		5,34	97,53
Promedio	215,9	5,80±2,92	97,31±0,20

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 11. Resultados en remoción de propamocarb HCl**

Poliacrilamida 55 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	5,12	97,63
2		5,15	97,61
3		6,24	97,11
Promedio	215,9	5,50±2,80	97,45±0,29

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Resultados en remoción de propamocarb HCl**

Poliacrilamida 60 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	215,9	5,41	97,49
2		5,28	97,55
3		6,31	97,08
Promedio	215,9	5,67±2,87	97,38±0,25

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Resultados en remoción de fluopicolide**

Sulfato de aluminio 40 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,41	92,17
2		3,74	79,22
3		2,63	85,39
Promedio	18	2,59±1,61	85,59±6,47

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 14. Resultados en remoción de fluopicolide**

Sulfato de aluminio 45 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,47	91,83
2		2,65	85,27
3		2,63	85,39
Promedio	18	2,25±1,25	87,50±3,75

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 15. Resultados en remoción de fluopicolide**

Sulfato de aluminio 50 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,43	92,06
2		2,28	87,33
3		2,22	87,67
Promedio	18	1,98±1,06	89,01±2,63

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Resultados en remoción de fluopicolide**

Sulfato de aluminio 55 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,59	91,17
2		2,85	84,17
3		2,89	83,94
Promedio	18	2,44±1,36	86,43±4,10

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Resultados obtenidos en remoción de fluopicolide**

Sulfato de aluminio 60 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,64	90,89
2		1,96	89,11
3		2,02	88,78
Promedio	18	1,87±0,95	89,59±1,13

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Resultados en remoción de fluopicolide**

Poliacrilamida 40 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,40	92,22
2		1,61	91,06
3		1,65	90,83
Promedio	18	1,55±0,78	91,37±0,75

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Resultados en remoción de fluopicolide**

Poliacrilamida 45 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,50	91,67
2		1,64	90,89
3		1,63	90,94
Promedio	18	1,59±0,80	91,17±0,43

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 20. Resultados en remoción de fluopicolide

Poliacrilamida 50 mg/L  
Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,80	90,00
2		1,68	90,67
3		1,66	90,78
Promedio	18	1,71±0,86	90,48±0,42

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 21. Resultados en remoción de fluopicolide

Poliacrilamida 55 mg/L  
Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,80	90,00
2		1,58	91,22
3		1,67	90,72
Promedio	18	1,68±0,85	90,65±0,61

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Resultados en remoción de fluopicolide**

Poliacrilamida 60 mg/L  
 Tiempo de mezcla rápida 1 minuto 100 rpm  
 Tiempo de mezcla lenta 5 minutos 40 rpm

Corrida	Concentración inicial ppm	Concentración final ppm	Porcentaje de remoción
1	18	1,70	90,56
2		1,52	91,56
3		1,58	91,22
Promedio	18	1,60±0,80	91,11±0,51

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Resultados en remoción de fluopicolide**

Sulfato de aluminio  
 Análisis de aceptación o rechazo

% remoción	Media	Desviación
85,59	87,61	1,69
87,50		
89,02		
86,43		
89,59		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Resultados en remoción de fluopicolide**

Poliacrilamida  
Análisis de aceptación o rechazo

<b>% remoción</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación</b>
91,37	90,95	0,37
91,17		
90,48		
90,65		
91,11		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Resultados en remoción de propamocarb HCl**

Sulfato de aluminio  
Análisis de aceptación o rechazo

<b>% remoción</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación</b>
97,28	96,99	0,28
96,69		
97,08		
96,68		
97,19		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Resultados en remoción de propamocarb HCl**

Poliacrilamida  
Análisis de aceptación o rechazo

<b>% remoción</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación</b>
97,25	97,29	0,14
97,08		
97,31		
97,45		
97,38		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Existencia de diferencias significativas**

Parámetro	Propamocarb HCl	Fluopicolide
Z	1,05	5,2

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. **Análisis económicos de los coagulantes estudiados en relación a las concentraciones óptimas**

Coagulante	Concentración óptima (mg/L)	Volumen a tratar (L)	mg de coagulante	Costo por mg de coagulante (Q)	Costo del tratamiento (Q)
Sulfato de aluminio	60	1000	60000	0,00000073	0,0438
Poliacrilamida	40	1000	40000	0,00000290	0,1160

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. **Pruebas de jarras**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. **Pruebas de jarras terminadas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. **Muestras**



Fuente: elaboración propia.

