



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

**OPTIMIZACIÓN, A ESCALA LABORATORIO, DE TRES FLOCULANTES  
POLIELECTROLITOS DE NATURALEZA ANIÓNICA, PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO  
DEL AGUA RESIDUAL DE UN RASTRO AVÍCOLA**

**Ligia Victoria Fletes Ordoñez**

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, julio de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN, A ESCALA LABORATORIO, DE TRES FLOCULANTES  
POLIELECTROLITOS DE NATURALEZA ANIÓNICA, PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO  
DEL AGUA RESIDUAL DE UN RASTRO AVÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LIGIA VICTORIA FLETES ORDOÑEZ**  
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, JULIO DE 2017

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. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
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:

**OPTIMIZACIÓN, A ESCALA LABORATORIO, DE TRES FLOCULANTES  
POLIELECTROLITOS DE NATURALEZA ANIÓNICA, PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO  
DEL AGUA RESIDUAL DE UN RASTRO AVÍCOLA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 17 de noviembre de 2016.

**Ligia Victoria Fletes Ordoñez**

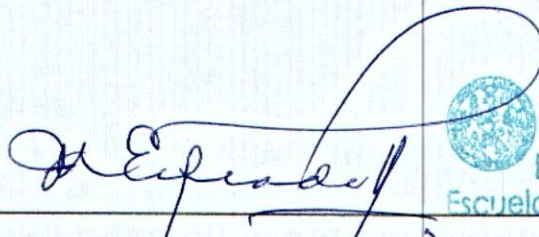
Guatemala, 29 de mayo de 2017

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong  
Director de Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado satisfactoriamente el informe final del trabajo de graduación titulado: **“OPTIMIZACIÓN, A ESCALA LABORATORIO, DE TRES FLOCULANTES POLIELECTROLITOS DE NATURALEZA ANIÓNICA, PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DEL AGUA RESIDUAL DE UN RASTRO AVÍCOLA”**. Desarrollado por la estudiante de Ingeniería Química, Ligia Victoria Fletes Ordoñez, con número de carné 2011-14708 y No. DPI 2222 59035 0101.

Sin otro particular, me suscribo a usted.



Jorge Mario Estrada Asturias  
Asesor de Investigación  
Colegiado No. 685



Jorge Mario Estrada Asturias  
Ingeniero Químico Col. 685  
Profesor Titular  
Escuela de Inq. Química USAC



Guatemala, 30 de mayo de 2017.  
Ref. EIQ.TG-IF.024.2017.

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 **050-2016** 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

Solicitado por la estudiante universitaria: **Ligia Victoria Fletes Ordoñez**.  
Identificada con número de carné: **2011-14708**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

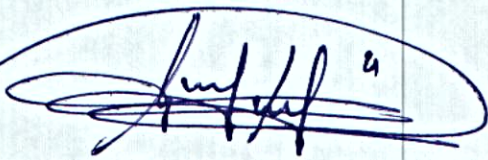
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### OPTIMIZACIÓN, A ESCALA LABORATORIO, DE TRES FLOCULANTES POLIELECTROLITOS DE NATURALEZA ANIÓNICA, PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DEL AGUA RESIDUAL DE UN RASTRO AVÍCOLA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorada 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.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Jaime Domingo Carranza González  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.034.2017

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 de la estudiante, **LIGIA VICTORIA FLETES ORDOÑEZ** titulado: **"OPTIMIZACIÓN, A ESCALA LABORATORIO, DE TRES FLOCULANTES POLIELECTROLITOS DE NATURALEZA ANIÓNICA, PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DEL AGUA RESIDUAL DE UN RASTRO AVÍCOLA"**. 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 Davila  
Director  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, julio 2017

Cc: Archivo  
CSWD/ale



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

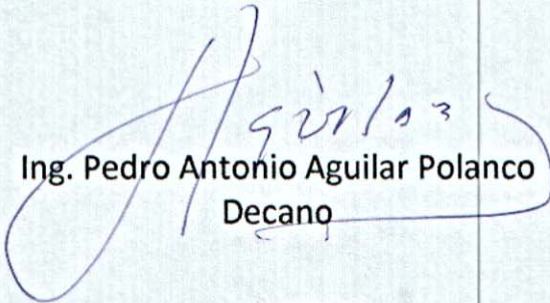


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 312.2017

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: **OPTIMIZACIÓN, A ESCALA LABORATORIO, DE TRES FLOCULANTES POLIELECTROLITOS DE NATURALEZA ANIÓNICA, PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DEL AGUA RESIDUAL DE UN RASTRO AVÍCOLA**, presentado por la estudiante universitaria: **Ligia Victoria Fletes Ordoñez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, julio de 2017

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por todas sus bendiciones, guiar mi vida y darme fuerzas para seguir adelante tanto personal como profesionalmente.
- Mis padres** Manuel y Geraldine, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por sus consejos y alentarme a seguir adelante. Por estar presentes en los momentos más difíciles brindándome su amor incondicional, guiándome hacia el éxito.
- Mi novio** Ivan, por apoyarme en todo momento, por su paciencia, comprensión, amor y ser la luz de mi vida.
- Mis hermanos** Manuel y Ana Lucía, por apoyarme con su optimismo en todo momento. Que mi triunfo obtenido sea también de ustedes.
- Mi familia** Por escucharme y compartir cada uno de los momentos importantes o difíciles en mi vida, por su apoyo constante, sus oraciones y porque cada uno aportó una enseñanza significativa en mi vida, mostrándome situaciones que me sirvieron de motivación para cumplir mis metas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por abrirme las puertas y darme la oportunidad de formarme como profesional.

**Facultad de Ingeniería**

Por brindarme los conocimientos necesarios para mi crecimiento personal y profesional.

**JARSA, S.A.**

Especialmente al Ing. Mauricio Fletes, por permitirme desarrollar mi trabajo de investigación, brindándome todas las herramientas necesarias para lograrlo y por todo el conocimiento y experiencia adquirida.

**Mi asesor**

Ing. Jorge Mario Estrada, por su apoyo y ayuda a lo largo del proceso.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS .....	XIX
Hipótesis .....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Agua residual.....	3
2.1.1. Agua residual en el rastro avícola .....	4
2.1.1.1. Características del agua residual .....	4
2.1.1.2. Características de la sangre.....	6
2.1.1.3. Generación de contaminantes orgánicos .....	6
2.1.1.4. Generación de contaminantes inorgánicos.....	7
2.1.1.5. Principales usos del agua en el rastro avícola.....	8
2.1.1.6. Consideraciones .....	9
2.2. Caracterización del agua residual.....	9
2.2.1. Características físicas .....	10

2.2.1.1.	Color .....	10
2.2.1.2.	Olor.....	10
2.2.1.3.	Temperatura .....	10
2.2.1.4.	Turbidez.....	11
2.2.2.	Características químicas .....	11
2.2.2.1.	Materia orgánica .....	11
2.2.2.2.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) .....	12
2.2.2.3.	Demanda química del oxígeno (DQO).....	12
2.2.2.4.	Tensoactivos.....	12
2.2.2.5.	Sólidos totales .....	12
2.2.2.6.	Materia inorgánica .....	13
2.2.2.7.	Conductividad .....	13
2.2.2.8.	Potencial de hidrógeno .....	13
2.3.	Tratamiento de aguas residuales .....	14
2.3.1.	Tratamiento primario .....	14
2.3.1.1.	Debaste o remoción de sólidos.....	14
2.3.1.2.	Desarenado y desaceitado .....	15
2.3.1.3.	Neutralización .....	15
2.3.1.4.	Sedimentación .....	15
2.3.1.5.	Coagulación y floculación .....	16
2.3.1.6.	Filtración .....	16
2.3.2.	Tratamiento secundario .....	16
2.3.3.	Tratamiento terciario.....	17
2.3.4.	Esquema de tratamiento de aguas residuales .....	17
2.4.	Coagulación .....	18
2.4.1.	Carga iónica .....	19
2.4.2.	Cinética de la coagulación.....	20

2.4.3.	Tipos de coloides .....	21
2.4.4.	Coagulantes utilizados .....	21
2.4.5.	Cloruro férrico .....	22
2.4.6.	Factores que influyen en la coagulación .....	24
2.4.6.1.	Influencia de la temperatura en el agua .....	25
2.4.6.2.	Influencia de las sales disueltas .....	25
2.4.6.3.	Influencia de la dosis del coagulante ....	25
2.4.6.4.	Influencia de la turbidez .....	26
2.5.	Floculación .....	27
2.5.1.	Mecanismo de coagulación-floculación .....	28
2.5.2.	Floculantes .....	29
2.5.2.1.	Catiónicos .....	30
2.5.2.2.	Aniónicos .....	30
2.5.2.3.	Neutros .....	30
2.5.3.	Tipos de floculantes .....	31
2.5.3.1.	Poliectrolitos aniónicos .....	31
2.5.4.	Consideraciones acerca de la floculación .....	35
2.6.	Prueba de jarras .....	36
2.6.1.	Factores que influyen en la prueba de jarra .....	36
2.7.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales .....	37
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	39
3.1.	Variables .....	39
3.1.1.	Variables dependientes.....	39
3.1.2.	Variables independientes.....	40
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	40
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	41

3.4.	Recursos materiales disponibles .....	41
	3.4.1. Equipo, cristalería y material de laboratorio .....	41
	3.4.2. Equipo de protección personal .....	42
	3.4.3. Artículos de oficina .....	43
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	43
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	43
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	45
3.8.	Análisis estadístico.....	50
	3.8.1. Número de repeticiones.....	50
	3.8.2. Determinación de la media aritmética.....	51
	3.8.3. Determinación de la precisión.....	52
	3.8.3.1. Varianza .....	52
	3.8.3.2. Desviación estándar .....	52
	3.8.3.3. Coeficiente de variación.....	53
4.	RESULTADOS .....	55
4.1.	Caracterización inicial del agua residual .....	55
4.2.	Evaluación respecto al tiempo de formación, de sedimentación y porcentaje de reducción de turbidez .....	55
4.3.	Efecto que ocasiona la variación del pH para cada muestra ...	61
4.4.	Dosis óptima del floculante respecto a la turbidez y carga iónica .....	62
4.5.	Comparación y determinación del floculante más efectivo respecto al tiempo de formación y sedimentación, porcentaje de reducción de turbidez y menor costo .....	66
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	69

CONCLUSIONES .....79  
RECOMENDACIONES.....81  
BIBLIOGRAFÍA.....83  
APÉNDICES.....87  
ANEXOS .....95





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esquema del tratamiento de agua residual .....	18
2.	Doble capa de una partícula coloidal.....	19
3.	Esquema de la cinética de la coagulación.....	20
4.	Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación ....	24
5.	Coagulación y floculación de una suspensión coloidal .....	28
6.	Formación de una red microflocular y macroflocular en un sistema coloidal estable .....	29
7.	Síntesis del copolímero de acrilamida y ácido acrílico.....	33
8.	Distintas densidades de carga para floculantes .....	34
9.	Dosis óptima de floculante respecto a la turbidez.....	35
10.	Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores, según Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20.....	38
11.	Formato de caracterización inicial del agua residual .....	44
12.	Formato de tabulación de resultados obtenidos por cada tipo de floculante.....	45
13.	Metodología de índice de Willcomb para determinar la calidad de floculación .....	46
14.	Comparación de muestras según índice de Willcomb .....	47
15.	Diámetros típicos de referencia para la evaluación de flóculos .....	48
16.	Metodología del mecanismo de floculación y coagulación a emplear...	49
17.	Tiempo de formación de flóculo respecto a concentración adicionada.....	56

18.	Tiempo de formación de flóculo para cada toma de muestra .....	57
19.	Tiempo de sedimentación de flóculo respecto a concentración adicionada .....	58
20.	Tiempo de sedimentación para cada toma de muestra .....	59
21.	Porcentaje de reducción de turbidez para cada toma de muestra.....	60
22.	pH respecto a la concentración adicionada de cada floculante .....	62
23.	Porcentaje de reducción de turbidez respecto a la concentración adicionada .....	64
24.	Carga iónica respecto a la concentración adicionada .....	65

## TABLAS

I.	Principales contaminantes en las aguas residuales .....	3
II.	Composición del agua residual proveniente de un rastro.....	5
III.	Valores promedio de los parámetros característicos del agua residual de un rastro .....	5
IV.	Principales características analizadas de una muestra compuesta de sangre de pollo .....	6
V.	Generación de residuos y desechos sólidos más comunes para el proceso de obtención de carne avícola.....	7
VI.	Fuente de contaminación de las aguas residuales en un matadero.....	9
VII.	Datos originales de la caracterización inicial .....	55
VIII.	Promedio del tiempo de formación de flóculo respecto a concentración adicionada .....	56
IX.	Promedio de tiempo de formación para cada toma de muestra .....	57
X.	Promedio de tiempo de sedimentación respecto a concentración adicionada .....	58
XI.	Promedio de tiempo de sedimentación para cada toma de muestra....	59

XII.	Porcentaje de reducción de turbidez y eficiencia de cada floculante respecto a cada toma de muestra .....	60
XIII.	Promedio de pH respecto a concentración adicionada.....	61
XIV.	Promedio de porcentaje de reducción de turbidez respecto a la concentración adicionada.....	63
XV.	Dosis óptima para cada floculante respecto a la turbidez.....	64
XVI.	Promedio de carga iónica respecto a la concentración adicionada de floculante.....	65
XVII.	Dosis óptima para cada floculante respecto a la carga iónica .....	66
XVIII.	Comparación de los tres floculantes respecto a tiempos y dosis.....	66
XIX.	Comparación de los tres floculantes respecto al costo basado en la dosis óptima.....	67
XX.	Determinación del floculante más efectivo basado en la dosis óptima .....	67



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Cv</b>	Coeficiente de variación
<b>S</b>	Desviación estándar
<b>°C</b>	Grados celcius
$x_i$	i-ésimo valor de un conjunto de datos
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>L</b>	Litro
$\bar{x}$	Media aritmética
<b>mg</b>	Miligramo
<b>min</b>	Minuto
<b>ml</b>	Mililitro
<b>mV</b>	Milivoltios
<b>N</b>	Número de corridas
<b>n</b>	Número de datos
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>NTU</b>	Unidades nefelométricas de turbidez
$S^2$	Varianza



## GLOSARIO

<b>Anión</b>	Ion que posee carga negativa debido a la ganancia de electrones.
<b>Carga iónica</b>	Indica cuántos electrones perdió (carga positiva) o ganó (carga negativa), un determinado compuesto al combinarse con otro. Se denota en el número de oxidación que poseen los iones.
<b>Catión</b>	Ion que posee carga positiva debido a la pérdida de electrones.
<b>Coagulación</b>	Proceso de desestabilización de partículas coloidales, el cual tiene como objetivo eliminar sólidos en suspensión y materia coloidal, la cual no puede sedimentar naturalmente.
<b>Coloide</b>	Sistema formado por dos o más fases, principalmente: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas generalmente sólidas, las cuales no son visibles directamente.
<b>Floculación</b>	Proceso en el que se efectúan las colisiones de partículas desestabilizadas favoreciendo la agregación (cohesión) entre ellas, logrando formar aglomerados de partículas que unidas entre sí

alcanzan un peso que las hace sedimentables por gravedad.

**Flóculo** Aglomeración de materia orgánica en suspensión formada por la agregación de algún floculante.

**Ion** Partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro.

**Polielectrolito** Cualquier polímero cuyas unidades de repetición soportan un grupo electrolito, el cual se disocia en agua, quedando un polímero cargado. Estos pueden ser policationes o polianiones.

**Polímero** Es un compuesto químico conformado por cadenas largas de cientos de monómeros, lo cual le atribuye un elevado peso molecular. Estos pueden ser naturales o sintéticos.

**Prueba de jarras** Utilizada a nivel laboratorio como un simulador, para determinar la dosis de floculante o coagulante a emplear en las plantas de tratamiento de agua potable. El método es estandarizado para facilitar la comparación y convalidación de los resultados.

**Rastro avícola** Se le conoce como matadero. Es una instalación industrial en la que se sacrifican animales de granja para su posterior procesamiento y comercialización



como carne u otra clase de productos de origen animal.

**Sedimentación**

Separación de dos componentes que se encuentran en suspensión o cualquier otra mezcla heterogénea, el cual utiliza la gravedad como la fuerza dominante para realizar dicha separación.



## RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene contemplada la optimización, a escala laboratorio, de tres distintos floculantes polielectrolitos de naturaleza aniónica en muestras de agua residual provenientes de un rastro avícola. Para dicha evaluación, inicialmente se caracterizó el agua residual, determinando los valores medios en que se encuentran los parámetros de pH, temperatura, sólidos disueltos y suspendidos, carga iónica y turbidez. La caracterización previa se realizó con el fin de determinar el comportamiento promedio del agua residual y con base en esto, establecer un procedimiento de dosificación de floculantes.

Seguidamente se procedió a evaluar los floculantes polielectrolitos con una dosificación que varía entre 2 ppm a 6 ppm, tomando en consideración los parámetros previamente caracterizados, también las propiedades de cada floculante, como el peso molecular y densidad de carga. Se mantuvo fija una cantidad de 350 ppm de coagulante, y se ajustó el pH a 7,00 para que se encuentre en rango de operación previo a la dosificación con cada floculante. Asimismo, se fijó la velocidad de 100 rpm y un tiempo de agitación de un minuto para la mezcla rápida y para la mezcla lenta se fijó la velocidad en 50 rpm y un tiempo de 3 minutos.

Con los resultados obtenidos se determinó la dosis óptima de cada floculante respecto al comportamiento que generó la carga iónica y la turbidez; asimismo, se realizó una comparación de los floculantes respecto a tiempos de formación y sedimentación, porcentaje de reducción de turbidez y costo de utilizar el floculante a la dosis óptima. Consiguiendo de esta forma establecer

que el floculante de baja carga aniónica es el más efectivo, si bien al ser el que presenta la menor cantidad a dosificar de 3 ppm, se obtiene un porcentaje de reducción de turbidez bastante aceptable de 93,63 %, a su vez, logra ser el floculante que genera el menor costo si se tratan 2 500 metros cúbicos de agua al día, obteniendo un costo total de 45 dólares al día. Este floculante difiere de el de mediana carga en 0,6 veces y de el de muy alta carga en 1,17 veces; logrando que este sea la mejor opción económica, como también viable en cuanto a la remoción de sólidos en el proceso de tratamiento primario del agua residual.

# OBJETIVOS

## General

Optimizar la eficiencia y el costo a escala laboratorio de tres floculantes polielectrolitos aniónicos de baja, mediana y muy alta carga, para el tratamiento primario del agua residual de un rastro avícola.

## Específicos

1. Caracterizar el agua residual proveniente del rastro avícola respecto a los parámetros de pH, sólidos disueltos, sólidos en suspensión, carga iónica, turbidez y temperatura; para aplicar un tratamiento primario adecuado.
2. Evaluar la eficiencia de cada floculante polielectrolito aniónico en cuanto al tiempo de formación del flóculo, tiempo de sedimentación y porcentaje de reducción de turbidez.
3. Establecer el comportamiento del efecto que ocasiona el pH para cada muestra de agua residual respecto a la dosificación de los tres floculantes de diferente carga.
4. Determinar la dosis óptima de cada floculante a emplear en el agua residual caracterizada, al mantener una cantidad fija de coagulante, respecto al comportamiento que genere la carga iónica y la turbidez cuando son adicionados.

5. Comparar y determinar cuál es el floculante más efectivo, respecto al tiempo de formación del flóculo, tiempo de sedimentación y porcentaje de reducción de turbidez; como también el que genere menor costo al ser utilizado.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis**

Para el presente trabajo de investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

### **Hipótesis nula**

No existe diferencia significativa en el grado de turbidez final al evaluar la eficiencia y el costo de tres distintos floculantes polielectrolitos aniónicos en el tratamiento de floculación del agua residual del rastro avícola.

### **Hipótesis alternativa**

Sí existe diferencia significativa en el grado de turbidez final al evaluar la eficiencia y el costo de tres distintos floculantes polielectrolitos aniónicos en el tratamiento de floculación del agua residual del rastro avícola.





## INTRODUCCIÓN

El agua es la sustancia más ampliamente utilizada en todo el planeta. Por sus características, su uso es primordial en la industria, en el sector agrícola y en el ser humano; sin embargo, su demanda, ha dado lugar a una merma en las fuentes de suministro, por lo que se está prestando mucha atención por evitar su contaminación y el uso desmedido.

Para el caso del rastro avícola, es necesario contar con un adecuado tratamiento primario de aguas residuales, debido a que los mataderos de aves producen gran cantidad de aguas de desecho, caracterizadas por presentar altas concentraciones de materia orgánica biodegradable y material coloidal: tales como grasas, aceites y proteínas. Ante este escenario, los efluentes de las industrias avícolas deben ser llevados a una planta de tratamiento para su posterior descarga a los cuerpos receptores de agua.

El presente trabajo de graduación busca evaluar tres distintos floculantes polielectrolitos aniónicos de diferente densidad de carga. Se eligen polielectrolitos porque estos han obtenido mejores características de floculación en términos de tamaño, resistencia, sedimentación y filtrado; produciendo así un menor volumen de lodo. Asimismo, se ha observado que son más resistentes a cambios de pH que los coagulantes convencionales si solamente se utilizaran estos. Los floculantes analizados se utilizan posteriormente de haber adicionado una cantidad fija de coagulante que por estudios previos se considera óptima. Se utiliza la combinación de polímeros con el coagulante, dado que el objetivo es reducir los costos del proceso disminuyendo la

demanda de coagulantes y de esta forma obtener agregados mayores de flóculos ya formados.

Los polielectrolitos se analizan tomando en consideración los parámetros previamente caracterizados del agua residual y el acondicionamiento de algunos de ellos; también, se considera el costo al ser utilizados, con el fin de favorecer la eficiencia en el proceso de floculación y determinar el mejor de los tres.

## 1. ANTECEDENTES

Sobre el tema de caracterización y tratamiento de aguas residuales se han presentado dentro de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, algunos trabajos que hacen énfasis sobre dicho tema, de los cuales se pueden mencionar los siguientes.

En el 2011, Luis Fernando González Serrano presentó su trabajo titulado *Evaluación a nivel laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la producción de aceites y grasas comestibles*, donde el autor determinó que el sulfato de aluminio presenta una menor demanda química y bioquímica de oxígeno para todas las concentraciones que el cloruro férrico, siendo este mejor para poder reducir los sólidos suspendidos.

En el mismo año, Jhonatan Alexander Ríos Rodríguez presentó su trabajo titulado *Caracterización de las aguas residuales de una industria farmacéutica y propuesta de un proceso para la reducción y el control de los contaminantes presentes*, determinando que la mayor descarga de agua para ser tratada se encuentra en el área de lavandería y en la planta de líquidos, sólidos e inyectables; por lo que fue necesario implementar una solución para reducir los contaminantes de dichos puntos críticos con una propuesta de tratamiento primario para su posterior reducción.

En el 2012, William Antonio Xil Barrios presentó su trabajo de graduación titulado *Evaluación de la eficacia del tratamiento de aguas mieles de un beneficio húmedo de café, localizado en San Juan La Laguna, Sololá*, donde

determinó que la eficacia en reducción de concentración de parámetros fisicoquímicos fue mayor para el proceso estacionario, con tiempo de retención de una semana en el sedimentador. Obteniendo reducción de nitrógeno de 4 % y 84 % en procesos continuo y estacionario, respectivamente.

En el 2014, Luis Antonio Aldana Massella presentó su trabajo de graduación titulado *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*, determinando que el reactivo que reduce en mayor cantidad los sólidos suspendidos en aguas residuales de tipo ordinario es el sulfato de aluminio con un 89 % de remoción.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Agua residual

El agua residual es la que procede del agua que ha tenido un uso específico que ha afectado de forma negativa su calidad, debido a la influencia de varios factores, mayoritariamente antropogénicos. Es aquella en la que existe combinación de líquidos y residuos sólidos que modifican las características fisicoquímicas y biológicas, por usos en actividades domésticas, industriales, comunitarias, entre otras.

Tabla I. Principales contaminantes en las aguas residuales

Contaminante	Razón
Metales pesados	Son añadidos constantemente al agua residual en el transcurso de actividades industriales y pueden ser removidos de la misma si se volvieran a utilizar.
Sólidos inorgánicos disueltos	Constituyentes inorgánicos como el magnesio, calcio, cloro y sulfatos que se encuentran en el agua de suministro. Estos pueden ser eliminados cuando se requiera reutilizar el agua.
Sólidos en suspensión	Pueden dar lugar a que se desarrollen depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar.
Materia orgánica biodegradable	Se encuentra compuesta principalmente por proteínas, grasas y carbohidratos; lo que ocasiona la disminución de oxígeno y da lugar a condiciones propicias para los gérmenes y patógenos. Generalmente se mide por la DBO y la DQO.
Materia orgánica refractaria	Esta materia tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento, como los agentes tensoactivos y pesticidas.
Contaminantes prioritarios	Compuestos orgánicos o inorgánicos determinados con base en su toxicidad, los cuales se encuentran dentro del agua residual.
Nutrientes	Favorecen el crecimiento de seres vivos no deseados dentro del agua residual; entre los cuales se conoce el nitrógeno, carbono y fósforo, considerándose indispensables para el crecimiento.
Patógenos	Organismos que transmiten enfermedades contagiosas por medio del agua residual.

Fuente: Universidad de Salamanca. *Características de las aguas residuales*. <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>. Consulta: 20 de abril de 2016.

### **2.1.1. Agua residual en el rastro avícola**

Específicamente en el rastro avícola, las aguas residuales contienen sustancias contaminantes tanto de naturaleza orgánica como inorgánica, las cuales son generadas durante el proceso industrial.

Cuando se refiere a contaminantes orgánicos es porque trata sobre materias regularmente biodegradables, cuya presencia en el agua residual conlleva a la aparición y crecimiento de microorganismos, que utilizan el desecho orgánico como fuente de alimento. Los contaminantes inorgánicos se refieren a los que perjudican la calidad física y química del agua. Estas sustancias van desde materiales inertes en suspensión hasta materiales tóxicos en dilución.

Dependiendo del tipo de contaminante presente en el agua será el sistema de tratamiento. En el caso del rastro avícola, tomando en cuenta que tanto componentes orgánicos como inorgánicos están presentes, será necesario contar con un tratamiento primario previo al tratamiento secundario (biológico). Donde el principal objetivo es reducir la materia orgánica presente, antes de su vertido en el cuerpo de agua receptor.

#### **2.1.1.1. Características del agua residual**

La composición del agua residual en los rastros es muy variable. Esta depende del tipo de proceso, práctica local que se lleve a cabo para el sacrificio de los animales, tipo de animal sacrificado y número de animales sacrificados por día. Debido a esto, es de suma importancia determinar los componentes iniciales que posee el agua, lo que se conoce como caracterización primaria.

Con ello será posible identificar contaminantes que puedan intervenir y causar algún problema al momento de realizar el tratamiento.

Tabla II. **Composición del agua residual proveniente de un rastro**

Parameter	Minimum and maximum values
pH	6.3–6.6
Density at 25°C (g cm <sup>-3</sup> )	1.0
Acidity, as acetic acid (mg l <sup>-1</sup> )	900–1780
Chemical oxygen demand (mg l <sup>-1</sup> )	2000–6200
Biochemical oxygen demand (mg l <sup>-1</sup> )	1300–2300
Oils and greases (mg l <sup>-1</sup> )	40–600
Turbidity (NTU) <sup>a</sup>	90–130
Total suspended solids (mg l <sup>-1</sup> )	850–6300
Volatile suspended solids (mg l <sup>-1</sup> )	660–5250
Fixed suspended solids (mg l <sup>-1</sup> )	340–1400
Organic nitrogen (mg l <sup>-1</sup> )	50–210
Ammoniacal nitrogen (mg l <sup>-1</sup> )	20–30
Total phosphate (mg l <sup>-1</sup> )	15–40

<sup>a</sup> NTU = Nephelometric turbidity units.

Fuente: CAIXETA, Cláudia. *Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor*. p. 87.

Como los valores de composición de los rastros dependen de varios factores anteriormente descritos; se presentan a continuación otros valores promedio de composición de agua residual de otro rastro.

Tabla III. **Valores promedio de los parámetros característicos del agua residual de un rastro**

Parámetro	Intervalo promedio
pH	6,75 - 7,10
Aceites y grasas (mg/L)	150 - 200
Alcalinidad (mg/L)	700 - 1 000
SST (mg/L)	650 - 900
Sólidos totales (mg/L)	1 950 - 2 500
DQO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	1 700 - 2 400

Fuente: ESPINOSA, Juan. *Tratamiento de aguas residuales de matadero con elevado contenido en sangre mediante la combinación de procesos anaerobio de película fija (BAPF) y aerobio de membrana (MBR)*. p. 99.

### 2.1.1.2. Características de la sangre

Debido a que el agua de un rastro avícola contiene en mayor porcentaje sangre, esta se analiza de la siguiente forma.

La sangre animal contiene aproximadamente un 80 % de agua y un 20 % de materia seca, de la que el 60 % son glóbulos sanguíneos, el 30 % es albúmina, y el 5 % son sustancias inorgánicas, siendo el resto lípidos (2 %) y otras proteínas. En conjunto, aproximadamente el 90 % de la materia seca de la sangre es proteína.

Tabla IV. Principales características analizadas de una muestra compuesta de sangre de pollo

Parámetro	Valor
pH	7,06
Aceites y grasas (mg/L)	2 636,00
Proteína (mg/L)	102,50
SST (mg/L)	51,20
DQO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	137,00

Fuente: ESPINOSA, Juan. *Tratamiento de aguas residuales de matadero con elevado contenido en sangre mediante la combinación de procesos anaerobio de película fija (BAPF) y aerobio de membrana (MBR)*. p. 142.

### 2.1.1.3. Generación de contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos se generan a través de varios procesos:

- En el lavado de estiércol
- Durante la matanza y desangrado



- En el escaldado
- En el pelado
- En el corte de la carne, patas y cabezas
- En la extracción y manejo de vísceras
- En la limpieza de mollejas y manejo de subproductos avícolas

Cabe mencionar que dentro de estos compuestos orgánicos contaminantes presentes en las aguas residuales, existen dos importantes: elevadas concentraciones de sangre y aceites generados durante el proceso.

Tabla V. **Generación de residuos y desechos sólidos más comunes para el proceso de obtención de carne avícola**

Fuente generadora	Características del efluente
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos de: Recepción Desangrado Escaldado Desplume Corte de pico, uñas y patas Extracción de vísceras Enfriamiento</li> <li>• Desinfección de equipo y maquinaria</li> <li>• Transporte de subproductos comestibles y desechos sólidos</li> <li>• Lavado de áreas y equipos</li> <li>• Sanitarios y duchas del personal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta carga orgánica</li> <li>• Presencia de: Nutrientes Sólidos suspendidos Grasas y aceites Coliformes fecales Temperatura Materia flotante</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

#### 2.1.1.4. **Generación de contaminantes inorgánicos**

Se les conoce así a los que son originados específicamente por el uso de químicos para limpieza, en la desinfección de pisos, equipo y maquinaria industrial.

### **2.1.1.5. Principales usos del agua en el rastro avícola**

Los principales puntos de consumo de agua dentro del rastro son:

- Mataderos: en la limpieza y desinfección de equipos, instalaciones y vehículos lavados a lo largo de la cadena productiva.
- Escaldado: operaciones asociadas a la eliminación de plumas y piel.
- Salas de despiece: operaciones de limpieza y desinfección de utensilios de trabajo.

Debido a estas operaciones, el tratamiento de las aguas residuales más común es la separación de sólidos, flotación para la separación de las grasas y un posterior tratamiento biológico con eliminación de nutrientes.

También, se toma en cuenta que las principales fuentes de desechos líquidos y sólidos dentro del rastro avícola son los procesos de lavado, limpieza y transporte de sólidos; debido a que las aguas residuales provenientes de las actividades avícolas se caracterizan por alto contenido de materia orgánica y sólidos suspendidos.

Tabla VI. **Fuente de contaminación de las aguas residuales en un matadero**

Fuente de contaminación	Parámetros de contaminación
Sangre	Materia orgánica
	Amonio y urea
Contenidos estomacales	Materia orgánica
	Sólidos en suspensión
	Fosfatos, nitrógeno y sales
Plumas	Sólidos en suspensión
Aguas de escaldado y lavado de canales	Aceites y grasas
Productos de limpieza y desinfección	Fosfatos, nitrógeno y sales
Salmueras	Conductividad eléctrica

Fuente: IMPIVA. *Guía de la producción limpia para el sector de matadero y transformación de carne avícola de la comunidad valenciana*. p. 136.

#### 2.1.1.6. Consideraciones

En el rastro avícola se debe tomar gran importancia en el análisis de grasas y aceites, especialmente la fracción suspendida, ya que su exceso ocasiona problemas en la operación del sistema de tratamiento biológico (inhibición de la actividad biológica, interferencia en la transferencia de oxígeno, generación de natas y espumas flotantes, entre otras).

Su operación, aunque puede hacerse sin químicos, es mucho más efectiva cuando se opera con coagulantes o polímeros.

## 2.2. Caracterización del agua residual

A continuación, se describen brevemente los parámetros físicos y químicos que caracterizan a las aguas residuales.

## **2.2.1. Características físicas**

Existen varios parámetros físicos que caracterizan a las aguas residuales; el más importante es el contenido de sólidos totales, término que incluye la materia en suspensión y la materia disuelta. A continuación, también, se describen otros parámetros igual de influyentes.

### **2.2.1.1. Color**

El color de las aguas residuales depende del tiempo en que las mismas se han formado. Cuanto más oscuras estén, más tiempo han permanecido contaminadas. El color varía y este puede ser utilizado para estimar la condición general del agua residual, aunque no se descarta que existan algunos químicos que le dan colores específicos a las aguas residuales.

### **2.2.1.2. Olor**

Los olores son producidos por los gases de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor característico de algo desagradable.

### **2.2.1.3. Temperatura**

La temperatura del agua es un parámetro muy importante debido a su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción.

El oxígeno por ser menos soluble en agua caliente que en agua fría genera un aumento en las velocidades de las reacciones químicas lo que produce un incremento de la temperatura.

#### **2.2.1.4. Turbidez**

La turbidez es la medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión.

Este parámetro se emplea para demostrar la calidad del agua con relación a la materia coloidal, partículas en suspensión y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos. Cuantos más sólidos en suspensión existan en el agua, más alta será la turbidez.

La medición de la turbidez se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersa en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia a las mismas condiciones, donde la materia coloidal dispersa es la que absorbe la luz, impidiendo su transmisión.

#### **2.2.2. Características químicas**

Dentro de estas características se encuentran los parámetros de tipo orgánico, que se basan en la disminución de oxígeno, y los de tipo inorgánico, que se toman en cuenta por su efecto tóxico.

##### **2.2.2.1. Materia orgánica**

Se encuentra formada generalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en varias ocasiones, de nitrógeno. También, pueden estar presentes otros elementos: azufre, fósforo o hierro.

Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son: proteínas, grasas y aceites e hidratos de carbono.

#### **2.2.2.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

Este parámetro es utilizado para determinar la cantidad de oxígeno que requieren los organismos en sus procesos metabólicos al consumir u oxidar materia susceptible que se encuentra presente en la muestra líquida, disuelta o en suspensión, del agua residual.

#### **2.2.2.3. Demanda química del oxígeno (DQO)**

Este parámetro se utiliza para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. En el ensayo se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. El valor de DQO representa una oxidación más completa a diferencia del valor de DBO que solamente ve la oxidación por vía biológica.

#### **2.2.2.4. Tensoactivos**

Los tensoactivos se componen de una parte hidrófoba e hidrófila y se encuentran formados por moléculas de gran tamaño, responsables de la aparición de espumas en la superficie del agua residual. Estos crean muchos problemas en la técnica de eliminación de aguas residuales.

#### **2.2.2.5. Sólidos totales**

Se refiere a toda la materia sólida de tipo orgánica o inorgánica que permanece como residuo dentro del agua residual. Entre los cuales destacan:

- Sólidos disueltos: compuestos de moléculas orgánicas, inorgánicas e iones en disolución, de los cuales se requiere su remoción o coagulación y sedimentación. Estos presentan un tamaño de partícula menor a 1,2  $\mu\text{m}$ . Se relacionan con la conductividad eléctrica.
- Sólidos suspendidos: material flotante en las aguas residuales y se acumula en la superficie, por lo que suele ser muy visible. Puede contener bacterias y cifras elevadas de metales y pesticidas. Estos presentan un tamaño de partícula mayor a 1,2  $\mu\text{m}$ . Se miden en ppm.

#### **2.2.2.6. Materia inorgánica**

La materia inorgánica se origina por el contacto de sustancias específicas con el agua, originadas por el contacto de la misma con las formaciones geológicas o por aguas residuales tratadas o sin tratar.

#### **2.2.2.7. Conductividad**

Al determinar la conductividad se evalúa la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, lo cual es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio).

#### **2.2.2.8. Potencial de hidrógeno**

El potencial de hidrógeno cuantifica si el agua residual es ácida o alcalina y luego poder neutralizarla para su posterior adecuación. Este dato da información si el agua puede interferir en la capacidad de reacción de sustancias específicas dentro de ella.

## **2.3. Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de aguas residuales se compone de la fase primaria, secundaria y terciaria, que se describen a continuación.

### **2.3.1. Tratamiento primario**

El tratamiento primario está constituido por varios procesos secuenciales: físicos o químicos. El objetivo de esta etapa primaria es producir un líquido homogéneo, en el cual se remuevan los contaminantes, sobre todo los sólidos suspendidos presentes.

Tomando como base la caracterización típica del agua residual proveniente del rastro avícola, se requiere que este tratamiento permita: eliminar sólidos visibles, homogenizar el agua residual, acondicionar químicamente el desecho para estabilizar el pH y remover los excesos de sólidos suspendidos, especialmente grasas y aceites en suspensión, como también sólidos sedimentables y sangre.

En el tratamiento primario se trata el agua para que no obstruya o dificulte los procesos consecuentes. Dentro de esta sección se encuentran las siguientes operaciones:

#### **2.3.1.1. Debaste o remoción de sólidos**

Este proceso de tipo mecánico tiene como prioridad eliminar los sólidos de mayor tamaño que generalmente tienen las partículas que arrastran las aguas. Se utilizan mallas o rejas para eliminar las partículas grandes que pueden dañar equipos y causar bloqueos de tuberías en etapas posteriores.



Se debe tomar en cuenta que las mallas o rejas deben estar diseñadas de un material anticorrosivo para evitar su desgaste por el masivo paso del agua.

#### **2.3.1.2. Desarenado y desaceitado**

Proceso que depende de cómo haya sido utilizada el agua anteriormente, ya que muchas veces no se realiza porque la cantidad de grasa es mínima.

Las partículas en suspensión son de poca densidad y se separan primeramente por medio de un decantador. En el caso de las grasas, se inyecta aire para que floten y puedan ser separadas dentro del decantador. No obstante, pueden utilizarse cierto tipos de coagulantes o polímeros para poder eliminarlas.

#### **2.3.1.3. Neutralización**

La neutralización del agua residual se utiliza para los siguientes fines:

- Para ajuste final del pH del último efluente antes de la descarga al medio receptor: 5,5 - 9.
- Antes del tratamiento biológico: pH entre 6,5 - 8,5 para una actividad biológica óptima.

#### **2.3.1.4. Sedimentación**

Se conoce como sedimentación a la etapa de separación de las partículas suspendidas en el agua. En dicha etapa se hace uso de la fuerza de la gravedad para que las partículas más densas que el agua se depositen en el fondo dentro de un equipo llamado sedimentador.

En dicha etapa el agua pasa por clarificadores primarios o tanques de sedimentación primarios, que son lo suficientemente grandes para que los sólidos fecales pueden situarse y el material flotante como la grasa y plásticos pueden levantarse hacia la superficie. Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de sus características, así como de su concentración.

#### **2.3.1.5. Coagulación y floculación**

La coagulación y floculación es un tratamiento físicoquímico que se utiliza en el proceso de tratamiento de agua para reducir su turbidez. Este método requiere la eliminación de los flóculos que posteriormente debe ser llevado a la filtración. Se toma en cuenta que los reactivos deben ser dosificados precisamente para no tener materiales extraproducidos por las mismas aguas residuales.

#### **2.3.1.6. Filtración**

La filtración consiste en hacer pasar un líquido que contiene materias en suspensión a través de un medio filtrante que permite el paso del líquido pero no el de las partículas que quedan retenidas en el medio filtrante. Es por ello que las partículas que no sedimentan son retenidas en los filtros.

### **2.3.2. Tratamiento secundario**

El tratamiento secundario, también conocido como tratamiento biológico, a diferencia del primario, pretende remover las micropartículas que no pudieron ser removidas en el tratamiento anterior. Estas micropartículas presentan tamaños menores de los que se pueden captar en la etapa anterior.

El tratamiento secundario busca estabilizar la materia orgánica contaminante, mediante la acción de la biomasa activa, especialmente bacterias.

“En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan nitrógeno y fósforo, y en el caso de sistema aerobio, la presencia de oxígeno disuelto en el agua. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente”.<sup>1</sup>

### **2.3.3. Tratamiento terciario**

La finalidad de este tratamiento es eliminar la carga orgánica residual y otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos anteriores, como el fósforo y nitrógeno, nutrientes, compuestos tóxicos y patógenos.

Este tipo de tratamiento se utiliza para un acondicionamiento de agua estricto, generalmente para aguas que se reutilizarán.

### **2.3.4. Esquema de tratamiento de aguas residuales**

Para entender de una mejor forma los procesos que conlleva el tratamiento de aguas residuales, se esquematizan de la siguiente forma.

---

<sup>1</sup> RODRÍGUEZ, A.; LETÓN, P, et al. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. [https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2\\_Tratamientos\\_avanzadog\\_uas\\_residuales\\_industriales.pdf](https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzadog_uas_residuales_industriales.pdf). Consulta: 14 de abril de 2016.

Figura 1. **Esquema del tratamiento de agua residual**



Fuente: elaboración propia.

## 2.4. Coagulación

Este proceso se realiza con el fin de eliminar sólidos en suspensión y materia coloidal que no puede sedimentar naturalmente.

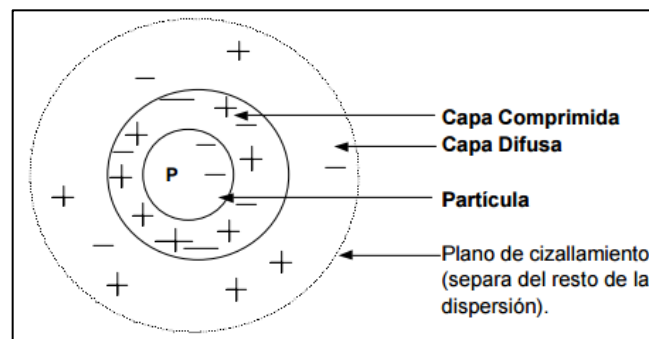
La coagulación consiste en la desestabilización de las partículas coloidales, es decir, facilitar su aglomeración. Esto se realiza empleando productos químicos (coagulantes) que neutralizan la carga iónica de los coloides, permitiendo la sedimentación por gravedad en tiempos cortos. Este proceso comienza al momento de agregar el coagulante y dura solo fracciones de segundo.

Desde el punto electrostático, el propósito de la coagulación es disminuir el potencial zeta por adición de iones específicos e inducir la desestabilización de las partículas para aglomerarlas.

### 2.4.1. Carga iónica

El tratamiento de aguas residuales está orientado a la remoción de partículas coloidales. Estas poseen normalmente una carga iónica negativa situada sobre su superficie, llamadas cargas primarias, porque atraen los iones positivos del agua que se adhieren fuertemente a las partículas coloidales y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos.

Figura 2. Doble capa de una partícula coloidal



Fuente: CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua coagulación y floculación*.

[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154). Consulta: 21 de abril de 2016.

“Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto, hay un gradiente o

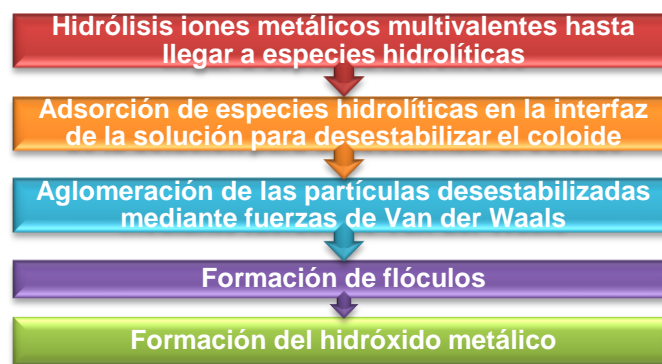
potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado potencial zeta”.<sup>2</sup>

El potencial-zeta de una partícula determina su estabilidad coloidal y uno de los objetivos consiste en reducir el valor a cero; en aquellos casos donde los coloides poseen un mayor potencial-zeta, se requiere una dosis mayor de coagulante-floculante para lograr la desestabilización y sedimentación. Al alcanzar un potencial-zeta neutro, las partículas son juntadas durante la floculación para formar un flóculo, y el uso de aditivos (aniónicos, catiónicos o neutros) puede mejorar aún más su formación.

#### 2.4.2. Cinética de la coagulación

A continuación, se esquematiza etapas referentes a la cinética de coagulación.

Figura 3. Esquema de la cinética de la coagulación



Fuente: elaboración propia.

<sup>2</sup> CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua, coagulación y floculación*. [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e359b74b9eae5556209841d9bupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e359b74b9eae5556209841d9bupId=10154). Consulta: 21 de abril de 2016.

### **2.4.3. Tipos de coloides**

Comúnmente se encuentran tres tipos de coloides:

- **Hidrofílicos:** muestran una fuerte interacción con el agua y pueden ser considerados como soluciones de moléculas muy grandes. Son menos afectados por la presencia de sales, en comparación con los coloides hidrofóbicos.
- **Hidrofóbicos:** interactúan menos favorablemente con el agua, pero son relativamente estables debido a la presencia de una carga negativa o positiva, dada por la capa eléctrica doble.
- **Coloides por asociación:** son formados a través de agentes activos en la superficie, como detergentes y polímeros que poseen dominios hidrofílicos (atraídos al agua) e hidrofóbicos (no compatibles con el agua).

### **2.4.4. Coagulantes utilizados**

Los coagulantes son productos químicos que al adicionarse al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad, para formar un precipitado muy absorbente y voluminoso, formado generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

Los coagulantes más comunes, utilizados para desestabilizar partículas y producir flóculos son:

- Sulfato de aluminio
- Cloruro de aluminio
- Polielectrolitos
- Cloruro férrico
- Sulfato férrico
- Sulfato ferroso

Son más utilizadas las sales de aluminio y hierro, debido a que cuando se adicionan al agua, producen una serie de reacciones muy complejas donde reaccionan con la alcalinidad que presenta el agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman precipitados.

La efectividad del aluminio y hierro es que estos coagulantes tienen la habilidad principal de ser multicarga, ya que poseen tres electrones equivalentes a su número de oxidación, lo cual hace que la naturaleza de los complejos formados por ellos, puedan ser controlados por el pH del sistema.

Al añadir coagulantes metálicos al agua, estos hidrolizan rápidamente, pero de una forma no controlada, formando una serie de especies hidrolíticas. La eficiencia de la mezcla rápida, el pH y la dosis de coagulante son los que determinan que especies hidrolíticas son las efectivas para el tratamiento.

#### **2.4.5. Cloruro férrico**

El cloruro férrico no ha sido tan popular como los químicos a base de aluminio, debido a que el color del hidróxido de hierro es oscuro. El proceso generalmente se ve más sucio. Sin embargo, sí existen problemas en el proceso, estos son más visibles que cuando se usa el Alum o algún PAC.



Cabe mencionar que el cloruro férrico es un coagulante muy eficiente con dos rangos de trabajo de pH. El rango más bajo comienza aproximadamente en 3,5 y termina en pH 7,0 para agua con alcalinidad alta. El rango más alto es de 8,0 hasta aproximadamente 9,5.

Es posible escoger el rango de pH para la coagulación dependiendo de las necesidades de purificación. En un pH bajo la remoción de las sustancias orgánicas y del color es buena, así como la remoción de bacteria y plancton.

### **Aspectos positivos**

- Muchas veces el coagulante es de bajo costo.
- Alta velocidad de reacción.
- El rango bajo de pH 3,5 – 7,0 es superior en la remoción de sustancias orgánicas, bacteria y plancton.
- El rango alto de pH 8,0 – 9,5 es usado para la remoción de hierro y manganeso.
- No hay problemas con el aluminio residual.
- Muchas veces eficiente sin ayudante de la floculación (polímero).

### **Aspectos negativos**

- Problemas en el proceso pueden causar un color y precipitación en el agua tratada.
- La dosis de hierro es mayor a la dosis de aluminio.
- Muy corrosivo para manejar y almacenar.
- Comercialmente disponible solo en presentación líquida.

#### 2.4.6. Factores que influyen en la coagulación

Se deben tener en cuenta los siguientes factores influyentes en la coagulación, con la finalidad de optimizar el proceso de tratamiento:

Turbidez, pH, temperatura del agua, sales disueltas, tipo de coagulante utilizado, condiciones de mezcla, tipos de mezcla, color y sistemas de aplicación de los coagulantes.

La relación entre cada uno de ellos permiten predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes a adicionar al agua.

Figura 4. **Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación**

<b>Tipo de Agua.</b>	<b>Tipo de Coagulación.</b>	<b>Requerimiento.</b>
1. Baja Concentración de Coloides, baja alcalinidad.	Formación de precipitado. Floc de barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad o partículas, o ambas.
2. Baja concentración de coloides, alta alcalinidad.	Formación de precipitado. Floc de Barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de partículas.
3. Alta concentración de coloides, baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos, en la superficie de los coloides. (pH 4 a 7).	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas, adición de alcalinidad
4. Alta concentración de coloides, alta alcalinidad.	Adsorción de polímeros, metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos (pH>7)	Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas.

Fuente: CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua, coagulación y floculación*.

[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154). Consulta: 21 de abril de 2016.

#### **2.4.6.1. Influencia de la temperatura en el agua**

La temperatura ejerce influencia significativa sobre el agua residual, ya que la variación de 1 °C en la temperatura conduce a la formación de corrientes de densidad variable, lo que afecta a la energía cinética de las partículas en suspensión. Debido a ello la coagulación se hace más lenta, por lo que es recomendable que la temperatura no se encuentre muy elevada porque desfavorece la coagulación.

Cuando disminuye la temperatura del agua en una unidad, esta aumenta su viscosidad; lo que explica las dificultades de la sedimentación de un floculo.

#### **2.4.6.2. Influencia de las sales disueltas**

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las siguientes influencias sobre la coagulación y floculación:

- Modifican el rango de pH óptimo
- Modifican el tiempo requerido para la floculación
- Modifican la cantidad de coagulantes requeridos
- Modifican de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente

Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6,5 a 8,0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5,5 a 8,5 unidades.

#### **2.4.6.3. Influencia de la dosis del coagulante**

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación.

- Cuando se utiliza poca cantidad de coagulante, no se neutraliza totalmente la carga de la partícula, por lo que la formación de los microflóculos es muy escasa y, por lo tanto, la turbidez residual es elevada.
- Cuando se utiliza mucha cantidad de coagulante se produce la inversión de la carga de la partícula, lo que conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas y, por lo tanto, la turbidez residual es igualmente elevada.

Es por ello que se debe buscar un equilibrio en la selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación, ya que juegan un rol importante sobre la buena o mala calidad del agua clarificada y en el buen o mal funcionamiento de los tanques de decantación.

Para determinar la cantidad óptima se hace uso de los ensayos de pruebas de jarra.

#### **2.4.6.4. Influencia de la turbidez**

La turbidez mide indirectamente la concentración de las partículas suspendidas en un líquido, debido a que evalúa el efecto de la dispersión que estas presentan al paso de la luz.

La variación de la concentración de las partículas suspendidas permite tomar en cuenta los siguientes aspectos.

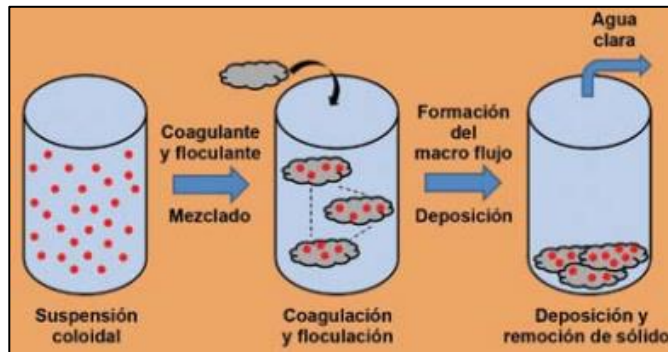
- Para cada turbidez existe una cantidad de coagulante con el que se obtiene la turbidez residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.
- Cuando la turbidez es muy alta, conviene realizar una presedimentación natural o forzada. Cuando es forzada generalmente se emplea un polímero aniónico.
- Cuando la turbidez aumenta, no se debe adicionar mucha cantidad de coagulante, debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada y se realiza con facilidad.
- Cuando la turbidez es baja, la coagulación se realiza muy difícilmente y la cantidad del coagulante es igual o mayor que si la turbidez fuese alta.

## **2.5. Floculación**

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación y tiene como objetivo favorecer el contacto entre las partículas por medio de una mezcla lenta. De esta forma aglutina las partículas coloidales desestabilizadas, formando agregados de mayor tamaño denominados flóculos que son fácilmente eliminados por procesos de decantación y filtración.

Para favorecer la formación de flóculos más voluminosos, se utilizan determinados productos químicos (floculantes), generalmente de naturaleza polimérica. Estos floculantes establecen puentes de unión entre los flóculos inicialmente formados, haciendo más rápida su sedimentación y aumentando el peso de los mismos para que sedimenten con facilidad.

Figura 5. **Coagulación y floculación de una suspensión coloidal**



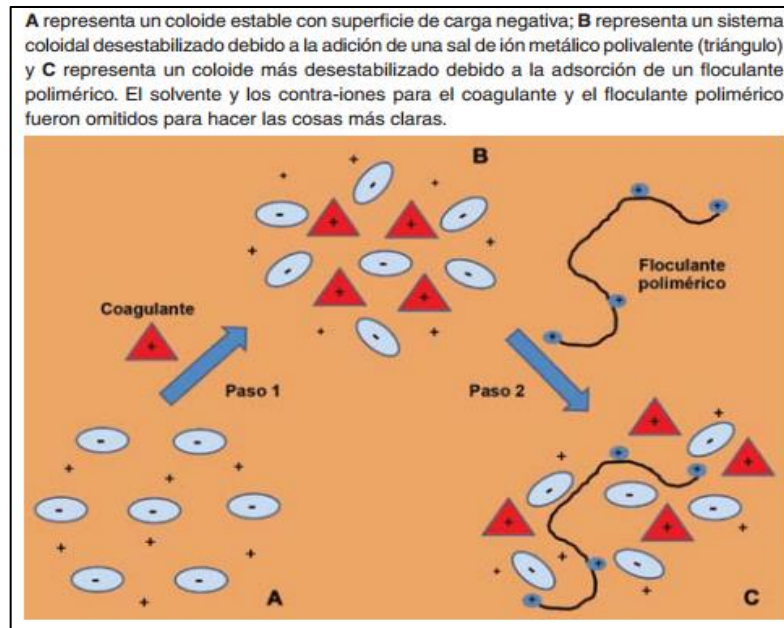
Fuente: WILSON, Lee. *Un vistazo a la tecnología de coagulación-floculación*. [http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/V14\\_N4\\_Agua\\_Wilson.pdf](http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/V14_N4_Agua_Wilson.pdf). Consulta: 21 de abril de 2016.

### 2.5.1. Mecanismo de coagulación-floculación

La presencia de una carga superficial en una partícula coloidal puede ser, positiva o negativa. Esta determina si ocurre la atracción (partículas de diferente carga) o repulsión (partículas de igual carga). La adición de un coagulante o floculante neutraliza la carga superficial de una partícula (potencial zeta), resultando en una desestabilización del coloidal. La disminución del potencial zeta de la partícula permite interacciones más favorables entre las partículas, ya que aumentan el crecimiento para formar micro o macroflocos de la adición de un floculante a un coloidal.

Como se muestra en la figura 5, el floculo resultante se deposita de la solución como fase sólida que puede ser físicamente separada mediante el uso de métodos convencionales, como la filtración.

Figura 6. **Formación de una red microflocular y macroflocular en un sistema coloidal estable**



Fuente: WILSON, Lee. *Un vistazo a la tecnología de coagulación-floculación*. [http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/V14\\_N4\\_Agua\\_Wilson.pdf](http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/V14_N4_Agua_Wilson.pdf). Consulta: 21 de abril de 2016.

### 2.5.2. Floculantes

Los floculantes son productos sintéticos de naturaleza polimérica conocidos como polielectrolitos cuya acción afecta la velocidad de reacción (floculación más rápida) o la calidad del flóculo (flóculo más pesado y voluminoso). Estos presentan dos propiedades que generan dichas acciones:

- Elevado peso molecular
- Determinada densidad de carga que dependerá de sus aplicaciones

Son de elevado peso molecular porque son moléculas orgánicas solubles en agua, formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas largas.

Respecto a la densidad de carga, estos pueden ser: catiónicos, aniónicos, y neutros.

#### **2.5.2.1. Cationicos**

Se entiende como catión a un ion con carga positiva, es decir, que ha perdido electrones. Los polielectrolitos catiónicos son moléculas que tienen carga positiva y, por lo tanto, van a atrapar o coagular moléculas que tengan carga negativa. La efectividad de los polímeros varía en función del rango del pH, que para este caso, los catiónicos suelen actuar entre pH 4 y 8.

#### **2.5.2.2. Aniónicos**

Se entiende como anión a un ion con carga negativa, es decir, que ha ganado electrones. Los polielectrolitos aniónicos son los que al ser agregados atraparán moléculas con carga positiva. Los polímeros aniónicos son más efectivos en un rango de pH entre 7 y 14.

#### **2.5.2.3. Neutros**

Son compuestos no iónicos, es decir, que están formados por enlaces covalentes y no por enlaces iónicos. Cuando se mezclan con agua no forman iones, por lo general, son compuestos orgánicos.



Los no iónicos son capaces de adsorber las partículas positivas y negativas, siendo, en general, muy eficaces a pH 6, si bien algunos también operan entre 6 y 10.

### **2.5.3. Tipos de floculantes**

Cuando se trata con floculantes, estos suelen ser productos químicos que en solución aportan carga iónica contraria a la del coloide. Se utilizan generalmente floculantes con carga, ya que estos afectan el grosor de la doble capa eléctrica, neutralizando la carga de la superficie y el estado de hidratación del coloide. Entre estos se encuentran:

- Sales de  $Fe^{3+}$ : pueden ser  $FeCl_3$  o  $Fe_2(SO_4)_3$ , los cuales presentan eficacia semejante.
- Sales de  $Al^{3+}$ : suele ser  $Al_2(SO_4)_3$  o policloruro de aluminio. El primer caso es más manejable en disolución, mientras que el segundo presenta ventaja en peso de aluminio por kilogramo dosificado.
- Polielectrolitos: pueden ser polímeros naturales o sintéticos, no iónicos (poliacrilamidas), aniónicos (ácidos poliacrílicos) o catiónicos (polivinilaminas). Las cantidades a dosificar son mucho menores que para las sales y la eficacia es mucho mayor.

#### **2.5.3.1. Polielectrolitos aniónicos**

Dado que las cantidades a dosificar de un polielectrolito son menores que las sales, además, que la calidad del flóculo es mejor por el alto peso molecular

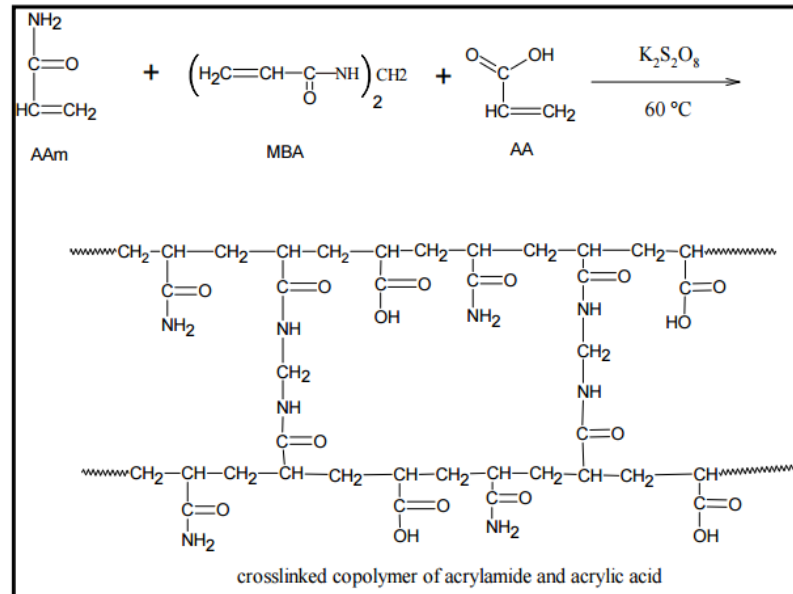
de los mismos, se utilizan como floculantes los polielectrolitos para ayudar en el proceso de coagulación-floculación del agua residual del rastro avícola.

Se utilizan polielectrolitos aniónicos porque las cargas que presenta el agua residual son positivas y los polielectrolitos aniónicos se sienten atraídos hacia ellas.

Dado que los tres floculantes utilizados en dicha investigación son copolímeros de acrilamida y ácido acrílico, el grado de ionicidad que poseen es aniónico. Esto se debe a que la poliacrilamida es la base molecular, que es no iónica, a esta se le unen moléculas de ácido poliacrílico que presentan grupos carboxilo que se encuentran a lo largo de la cadena del polímero, estos se ionizan (perdiendo un protón  $H^+$ ), lo que hace que adquiera una carga negativa.

La copolímeros de acrilamida (AAm) y ácido poliacrílico (AA), son sintetizados por radicales libres de polimerización utilizando monómeros de acrilamida y ácido acrílico en presencia de N-metilen-bis-acrilamida (MBA), un agente de sintetización; en un medio de persulfato de potasio como iniciador y acelerador de reacción.

Figura 7. **Síntesis del copolímero de acrilamida y ácido acrílico**

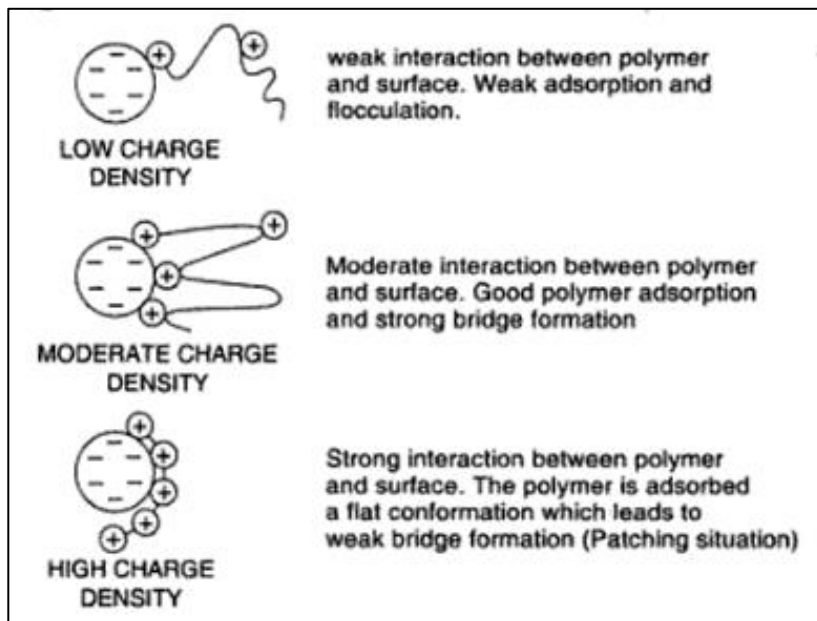


Fuente: MUTAR, Mohammed. *Preparation of copolymer of acrylamide and acrylic acid and its application for slow release sodium nitrate fertilizer*. p. 88.

La densidad de carga depende del grupo ionizable, en este caso para los tres floculantes es el grupo carboxilo; también, depende del grado de ionización, si es de baja densidad, media o alta.

Cuando es de baja densidad de carga, significa que la interacción entre el polímero y la superficie es débil, por lo que la adsorción y floculación es débil. Para el polímero de mediana densidad de carga existe una interacción media entre el polímero y la superficie, sin embargo, el polímero si presenta una buena adsorción y conforma un fuerte puente de formación. Por último, para el floculante de alta densidad de carga, existe fuerte interacción entre el mismo polímero y la superficie; sin embargo, el polímero adsorbido se conforma muy fácilmente que a veces puede conducir a la formación de un puente débil.

Figura 8. **Distintas densidades de carga para floculantes**



Fuente: MUTAR, Mohammed. *Preparation of copolymer of acrylamide and acrylic acid and its application for slow release sodium nitrate fertilizer*. p. 91.

La diferencia entre los tres floculantes radica que el de muy alta carga posee más grupos de ácido poliacrílico sustituidos en la estructura, el de mediana carga posee menos y así sucesivamente con el de baja carga. Esto se debe a la forma de cómo se sintetizó cada polímero, dado que la longitud de las cadenas viene determinada principalmente por la disponibilidad local de grupos reactivos en los extremos de las cadenas en crecimiento. En cualquier caso, el polímero contiene moléculas que poseen longitudes de cadena muy diferentes, por lo tanto, pesos moleculares distintos, que varían entre el rango de  $10^2$  a  $10^4$  g/mol para los floculantes de peso molecular alto, como lo es el floculante de muy alta carga y para los floculantes de muy alto peso molecular, el rango se encuentra entre  $10^5$  a  $10^7$  g/mol, que en este caso es para los floculantes de baja y mediana carga.

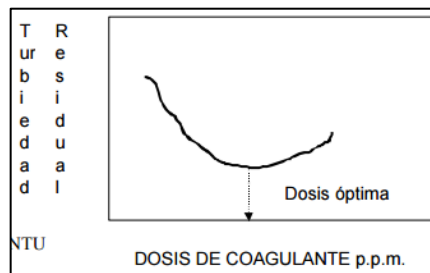
#### 2.5.4. Consideraciones acerca de la floculación

Como se mencionaba anteriormente, los floculantes facilitan el crecimiento de un flóculo cambiando la carga en la superficie y las características de hidratación de un coloide. Estos pueden alterar la densidad de las partículas y su estabilidad durante la formación de una red flocular.

La elección de un sistema de coagulante-floculante depende de la calidad del agua que ingresa, es decir, sólidos totales, suspendidos, pH, entre otros. Sin embargo, la eficiencia de coagulación del sistema depende de parámetros adicionales termodinámicos y cinéticos: temperatura, mezcla, y tiempos de residencia, velocidad, y potencial zeta de las partículas.

La formación eficaz de flóculos ocurre cuando el potencial-zeta del coloide se acerca a cero. Esto puede ser optimizado mediante una elección cuidadosa de la naturaleza y composición del floculante. Asimismo, es importante tener en cuenta que la dosis óptima del floculante es la que hace que la muestra presente menor turbidez.

Figura 9. **Dosis óptima de floculante respecto a la turbidez**



Fuente: CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua coagulación y floculación*.

[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154). Consulta: 21 de abril de 2016.

## **2.6. Prueba de jarras**

La prueba de jarras es un procedimiento a pequeña escala, para determinar las condiciones óptimas de tratamiento del agua residual. Este método permite realizar ajustes en el pH, variaciones en la dosis de coagulante o floculante; alternando velocidades de mezclado. Una prueba de jarras simula los procesos de coagulación y floculación que promueven la eliminación de los coloides en suspensión.

### **2.6.1. Factores que influyen en la prueba de jarra**

Los factores que influyen significativamente en la prueba son:

- El tiempo de retención: se deben realizar pruebas en cuanto al tiempo que debe estar retenida el agua en cada jarra, ya que depende si la mezcla es rápida o lenta, como también del floculante que se utilice.
- Velocidad para cada periodo de retención: en este caso se deben definir las revoluciones por minuto (rpm) que deben ser aplicadas para cada jarra, que simula una estación de tratamiento, con el fin de que asegure una reacción completa de los productos químicos antes de pasar a la siguiente etapa.

Definidos los tiempos de retención y las velocidades ideales para un desempeño óptimo, se pueden obtener datos para poder tratar el agua.

## **2.7. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales**

El Acuerdo Gubernativo 236-2006 toma en cuenta la contaminación que produce la industria guatemalteca a través de componentes químicos que modifican la composición y las características orgánicas del agua. Según el acuerdo gubernativo, se fijan cuatro fechas máximas de cumplimiento, estableciendo para cada una diferentes valores según el parámetro.

Es prudente decir que los parámetros establecidos se especifican para la descarga del agua residual a cuerpos receptores y no para el paso del tratamiento primario a tratamiento secundario. Es por ello que en este trabajo de investigación, se toman en cuenta las variables que afectan la coagulación y floculación, las cuales son etapas del tratamiento primario del agua residual del rastro avícola.

Figura 10. Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores, según Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20

			Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>8</sup>	< 1x10 <sup>6</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Fuente: Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

Acuerdo Gubernativo 236-2006. p. 8.



### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

Se toman como variables las condicionantes que influyen significativamente el proceso de caracterización del agua residual, como el de evaluación de cada floculante para el posterior tratamiento primario del agua residual del rastro avícola.

Dentro del trabajo de investigación existen variables dependientes e independientes que se describen a continuación.

##### **3.1.1. Variables dependientes**

Las variables dependientes son las variables respuesta que se obtienen del proceso de caracterización de agua residual y evaluación de los distintos floculantes. Estas se ven influenciadas por las variables independientes y determinan el efecto que ocasionan sobre ellas.

Dentro de estas variables se encuentran:

- Turbidez
- Carga iónica
- Sólidos disueltos
- Sólidos suspendidos
- pH
- Temperatura

- Tiempo de formación
- Tiempo de sedimentación

### **3.1.2. Variables independientes**

Las variables independientes son las que no dependen de otra variable para obtener un resultado y se supone que son la causa del fenómeno de estudio. Usualmente, se obtienen directamente ya que el investigador las selecciona.

Dentro de estas variables se encuentran:

- Tipo de coagulante y floculantes
- Dosis de coagulante y floculantes
- Tiempo de agitación
- Velocidad de agitación
- Costo de floculantes

### **3.2. Delimitación de campo de estudio**

El trabajo de investigación se enfocó en caracterizar el agua residual de un rastro avícola para posteriormente evaluar y comparar tres floculantes de carga aniónica cuando se mantiene fija una concentración de 350 ppm del coagulante cloruro férrico, a un pH controlado entre un rango de 7 y 7,2.

El estudio se realizó bajo las siguientes características.

- Campo de estudio: agua residual de un rastro avícola, mayoritariamente compuesta de sangre y residuos de aves.

- Proceso: análisis fisicoquímicos del agua residual.
- Delimitación: estudio realizado a escala laboratorio, haciendo uso del equipo de prueba de jarras.

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

Se tomaron como recursos humanos para el siguiente trabajo de investigación a:

- Investigadora: Ligia Victoria Fletes Ordoñez
- Asesor de investigación: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
- Personal administrativo de la planta
- Gerente de producción
- Jefe de laboratorio

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

El material y equipo necesarios para recopilar, ordenar y procesar los datos obtenidos se presenta a continuación.

#### **3.4.1. Equipo, cristalería y material de laboratorio**

Como equipo:

- Turbidímetro
- Potenciómetro
- Conductímetro
- Equipo de prueba de jarras
- Equipo analizador de cargas

- Mufla
- Balanza analítica
- Termómetro
- Cronómetro

Como cristalería:

- 2 balones aforados de 500 ml
- Varilla de agitación
- 4 beakers de 500 ml
- 2 pipetas
- 4 embudos
- 4 contenedores para el equipo de jarras
- Probeta de 100 ml
- Espátula

Como material:

- Floculantes aniónicos
- Cloruro férrico
- Hidróxido de sodio
- Papel filtro
- Recipiente de 8 galones

#### **3.4.2. Equipo de protección personal**

- Bata
- Guantes de látex

### **3.4.3. Artículos de oficina**

- Computadora portátil
- Impresora
- Marcador para rotular
- Cinta adhesiva
- Hojas
- Lápizero

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

Se desarrolló el trabajo de investigación utilizando ambas técnicas. La técnica de investigación cuantitativa se utilizó en los análisis fisicoquímicos como de pH, carga iónica, turbidez, sólidos disueltos y suspendidos. Todos estos parámetros se analizaron como promedios, haciendo uso de la estadística para determinar la varianza y desviación estándar de las muestras.

La técnica cualitativa se utilizó en la determinación del tamaño y consistencia del flóculo formado, también si existía presencia o ausencia de materia suspendida en las muestras analizadas.

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

Se recolectaron ocho muestras madre, cada una de ocho galones de agua residual provenientes del rastro avícola. Esto se realizó con el objetivo de dividirla en tres submuestras y así analizar los tres distintos flocculantes aniónicos.

Con cada muestra madre se realizó la caracterización inicial que consistió en la medición de los parámetros de turbidez, temperatura, pH, carga iónica, sólidos disueltos y suspendidos. Estos fueron evaluados con instrumentos específicos para poder tener un dato exacto que fue comparado con el resultado final, que fue medido posteriormente al haber adicionado el floculante y variar condiciones de dosificación.

A continuación, se muestra el formato que se utilizó para el ordenamiento de la información de caracterización inicial.

Figura 11. **Formato de caracterización inicial del agua residual**

<b>Inicio de toma de muestra</b>		
Núm. de muestra:	_____	
Fecha:	_____	
Volumen de muestra:	_____	
<b>Características iniciales de la calidad de agua</b>		
Turbidez:	_____	
Temperatura:	_____	
pH:	_____	
Carga iónica:	_____	
Sólidos disueltos:	_____	
Sólidos suspendidos:	Ausente _____	Presente _____
	Cantidad _____	
Floculante a utilizar:	_____	

Fuente: elaboración propia.

La información de los parámetros de caracterización inicial del agua residual que se recolectaron, se utilizaron posteriormente como una base para poder determinar si disminuyó la turbidez, los sólidos disueltos y suspendidos,

como también la carga iónica. De igual forma, se determinó si hubo un cambio en los otros parámetros, pH y temperatura.

Toda la información fue tabulada en tablas con el objetivo de ordenarla y posteriormente graficar la que es necesaria para su mejor comprensión.

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

Toda la información que se recolectó en la experimentación se tabuló en tablas para su ordenamiento, lo que facilitó el procesamiento de datos y el análisis realizado posteriormente. Las tablas se elaboraron para diferentes condiciones.

A continuación, se muestra como se tabularon los datos obtenidos en las distintas variaciones que se realizaron en la experimentación.

Figura 12. **Formato de tabulación de resultados obtenidos por cada tipo de floculante**

		Mezcla rápida: 100 rpm, 60 s.								
Tipo de floculante	Concentración adicionada (ppm)	Mezcla lenta: 50 rpm, 3 min.	Tiempo de sedimentación	Carga iónica (mV)	pH	Sólidos disueltos (µS)	Turbidez (NTU)	Temperatura (°C)		
Floculante 1	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	2									
	3									
	4									
	5									
6										

Fuente: elaboración propia.

De la misma forma, se realizó la tabulación de datos para las muestras con el floculante 2 y 3. Asimismo, estas mediciones se realizaron para observar si existe variabilidad en el agua residual y los resultados obtenidos.

Para la evaluación de la calidad y consistencia de los flóculos, se presenta una tabla con el denominado índice de Willcomb que permite asignar un valor cualitativo para poder calificar la formación más consistente y rápida de sedimentar. Para efectos de referencia y comparación, también se presenta un diagrama con las dimensiones y dispersiones típicas de los flóculos formados.

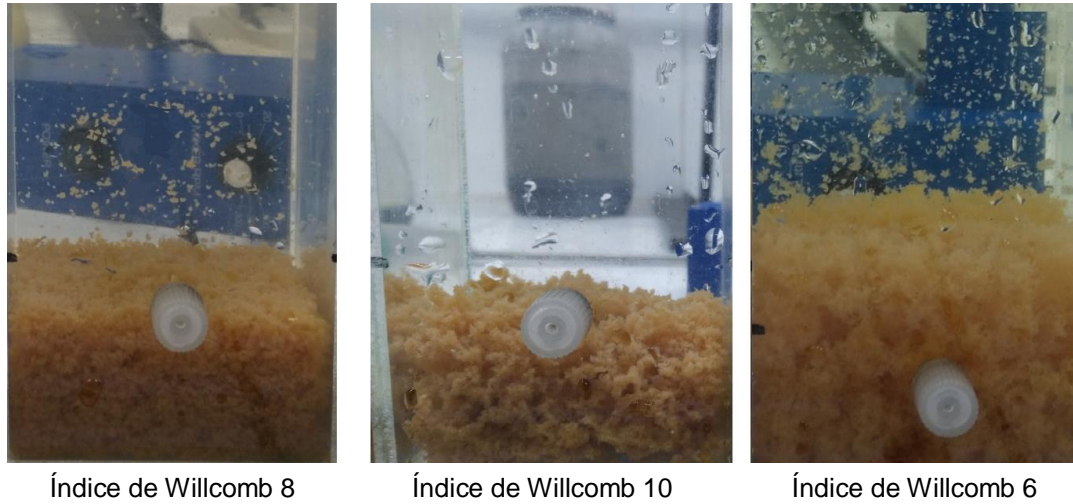
Figura 13. **Metodología de índice de Willcomb para determinar la calidad de floculación**

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente dejando el agua cristalina.

Fuente: MALDONADO, Víctor. *Sedimentación*. <https://es.slideshare.net/glodita/siete-7582612>.  
Consulta: 2 de mayo de 2017.



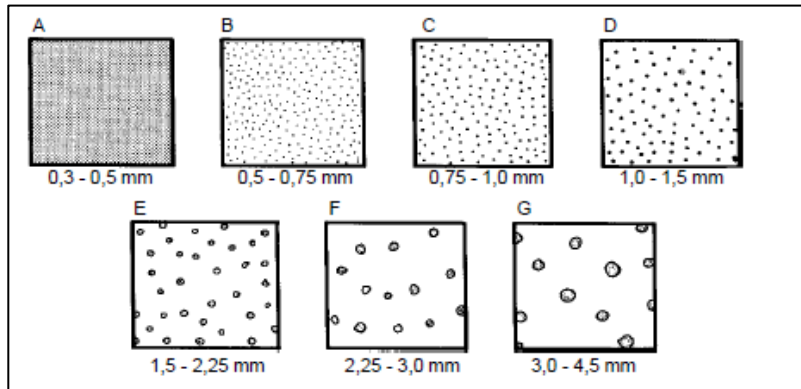
Figura 14. **Comparación de muestras según índice de Willcomb**



Fuente: elaboración propia.

El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempos de retención). Willcomb clasifica los flóculos por su tamaño como se indica en la siguiente figura.

Figura 15. **Diámetros típicos de referencia para la evaluación de floculos**

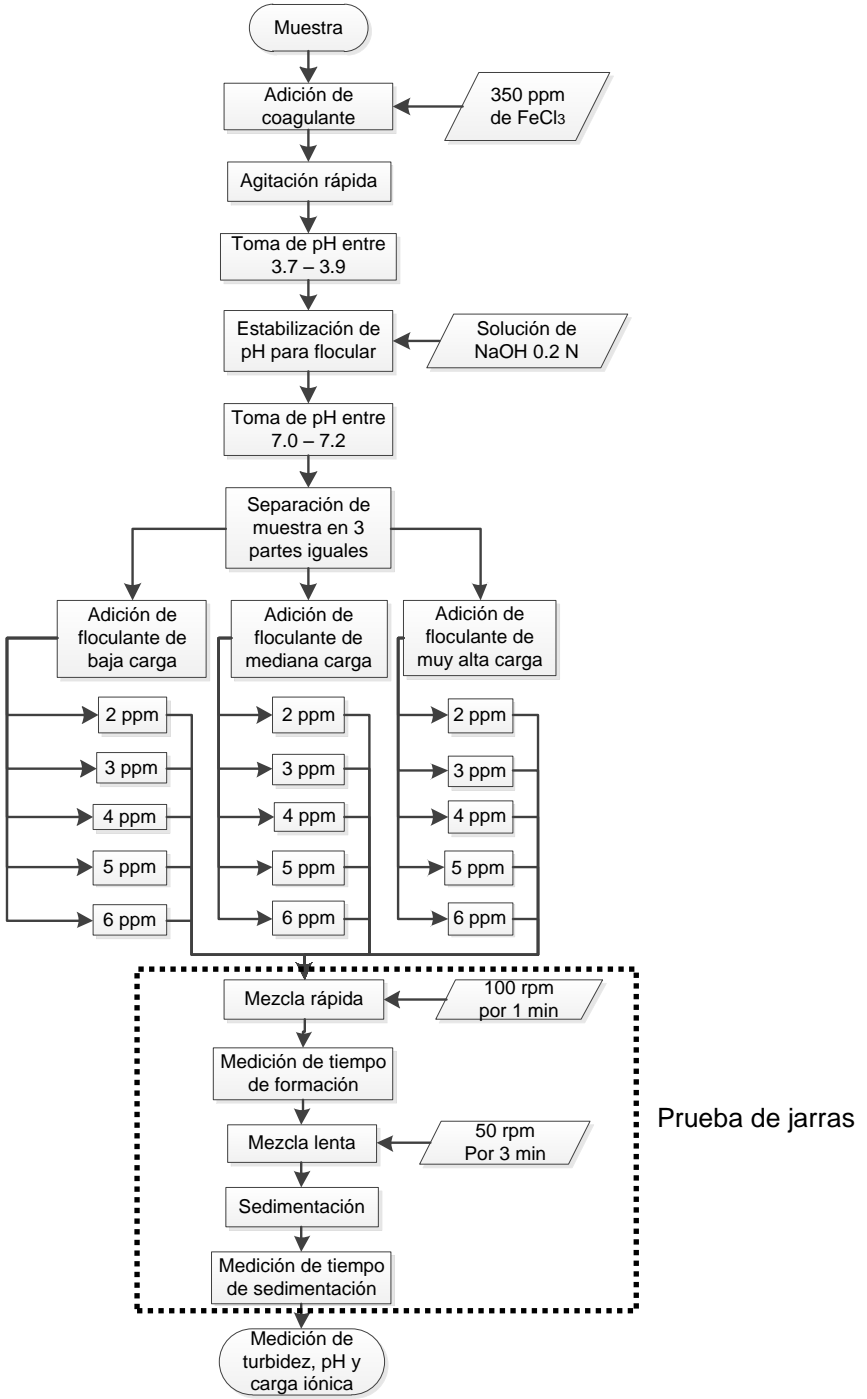


Fuente: MALDONADO, Víctor. *Sedimentación*. <https://es.slideshare.net/glodita/siete-7582612>.

Consulta: 2 de mayo de 2017.

Referente al procesamiento de datos, se utilizó la siguiente metodología que se repitió para cada floculante para cada corrida y por cada toma de muestra.

Figura 16. Metodología del mecanismo de floculación y coagulación a emplear



Fuente: elaboración propia, usando Visio 2010.

### 3.8. Análisis estadístico

Para las variables cuantitativas se realizó un análisis ligado a la interpretación de la media aritmética, varianza y desviación estándar. Este análisis fue necesario para aprobar la hipótesis alternativa.

A continuación, se presentan las medidas típicas que fueron utilizadas para el análisis de los resultados obtenidos en la experimentación.

#### 3.8.1. Número de repeticiones

El número de repeticiones se realizó con el objetivo de disminuir los errores aleatorios y empíricos que permitió que la medición fuera más precisa.

El número de repeticiones para la experimentación se determinó con base en los criterios de confiabilidad del 90 %, y con un error estimado del 20 %, que es el que se debe al error que acarrea el equipo a utilizar.

Para estimar la cantidad de repeticiones a evaluar se utilizó la siguiente ecuación:

$$N = \frac{Z^2 * P * Q}{E^2}$$

[Ec. 1]

Donde:

- N = número de corridas
- Z = confiabilidad (para 90 % el valor es  $\pm 1,645$ )
- P= probabilidad de éxito (95 %)

- Q= probabilidad de fracaso (5 %)
- E= error

Sustituyendo los datos en la ecuación se obtiene:

$$N = \frac{(1,645)^2 * (0,90) * (0,10)}{(0,20)^2} = 3,21 \approx 3$$

Por lo tanto, para este caso, se analizarán 3 repeticiones por cada muestra.

### 3.8.2. Determinación de la media aritmética

La media aritmética se utilizó para determinar el valor promedio en diferentes rangos de operación. A partir de estos valores se realizó el análisis completo de los resultados.

La media aritmética de un conjunto finito de números es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

[Ec. 2]

Donde:

- $\bar{x}$  = media aritmética
- $n$  = número de datos
- $a_i$  = i-ésimo valor de un conjunto de datos

### 3.8.3. Determinación de la precisión

Luego de haber determinado la media aritmética fue necesario determinar la precisión de los datos que se utilizó para describir qué tan semejantes son los resultados con otros obtenidos exactamente a las mismas condiciones.

Para describir la precisión de un conjunto de datos repetidos se utiliza la varianza y desviación estándar.

#### 3.8.3.1. Varianza

Permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su media.

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

[Ec. 3]

Donde:

- $S^2$  = varianza
- $\bar{X}$  = media aritmética
- $n$  = número de datos
- $x_i$  = i-ésimo valor de un conjunto de datos

#### 3.8.3.2. Desviación estándar

Permite determinar el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media; para ello basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza.

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

[Ec. 4]

Donde:

- $S$  = desviación estándar
- $\bar{X}$  = media aritmética
- $n$  = número de datos
- $x_i$  = i-ésimo valor de un conjunto de datos

### 3.8.3.3. Coeficiente de variación

Permite medir la dispersión de los datos y el grado de variabilidad que la desviación estándar tiene con relación a la media.

A menor coeficiente de variación, existe mayor homogeneidad en los valores de la variable.

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

[Ec. 5]

Donde:

- $S$  = desviación estándar
- $\bar{X}$  = media aritmética





## 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado

### 4.1. Caracterización inicial del agua residual

Seguidamente se muestran los resultados acerca de la caracterización.

Tabla VII. **Datos originales de la caracterización inicial**

Toma de muestra	Turbidez (NTU)	Carga iónica (mV)	pH	Sólidos disueltos ( $\mu$ S)	Sólidos suspendidos (ppm)	Temperatura ( $^{\circ}$ C)
1	1 000	-7	6,6	1 320	935,8	21,2
2	1 000	-17	6,7	1 870	729,57	22,2
3	898	-37	6,8	1 400	780,79	13,3
4	827	-32	6,7	1 420	647,11	23,7
5	660	-42	6,9	1 070	665,19	24,7
6	665	-44	6,9	1 150	643,36	24
7	667	-36	6,5	1 010	686,81	22,4
8	661	-27	6,6	1 290	899,55	25,1
<b>Promedio</b>	797,25	-30,25	6,71	1 316,25	748,52	22,08
<b>Desviación estándar</b>	143,66	11,91	0,14	251,79	106,88	3,54
<b>C.V.</b>	18,02 %	39,38 %	2,03 %	19,13 %	14,28 %	16,04 %

Fuente: elaboración propia.

### 4.2. Evaluación respecto al tiempo de formación, de sedimentación y porcentaje de reducción de turbidez

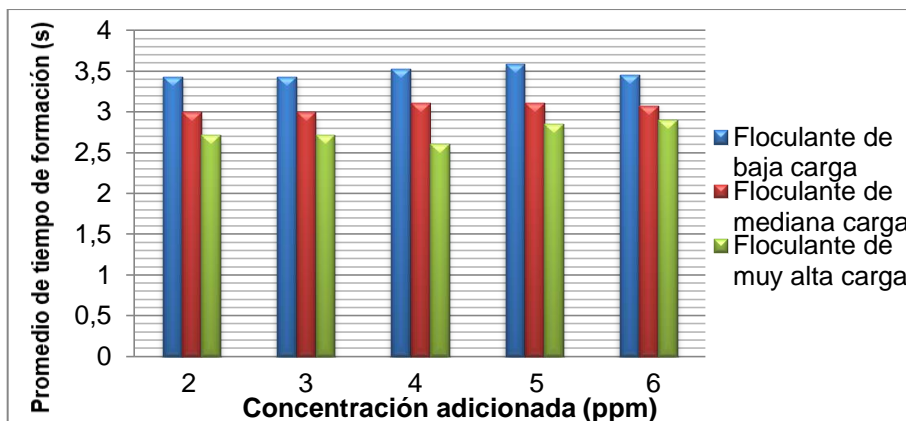
Seguidamente se muestran los resultados acerca de la evaluación.

Tabla VIII. Promedio del tiempo de formación de flóculo respecto a concentración adicionada

Tipo de floculante	Concentración adicionada (ppm)	Promedio de tiempo de formación (s)	Promedio final (s)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Floculante 1 baja carga	2	3,43	3,06	1,72	56,14 %
	3	3,43			
	4	3,53			
	5	3,58			
	6	3,46			
Floculante 2 mediana carga	2	2,99	3,49	1,71	49,18 %
	3	2,99			
	4	3,11			
	5	3,11			
	6	3,08			
Floculante 3 alta carga	2	2,71	2,75	0,51	18,37 %
	3	2,71			
	4	2,6			
	5	2,85			
	6	2,9			

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Tiempo de formación de flóculo respecto a concentración adicionada



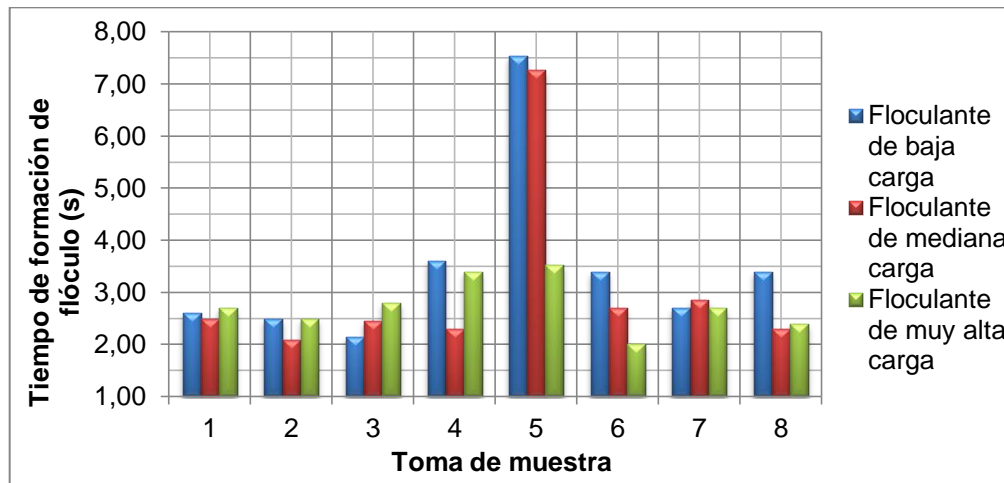
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Promedio de tiempo de formación para cada toma de muestra

Toma de muestra	Baja carga	Mediana carga	Muy alta carga
1	2,5	2,6	2,7
2	2,1	2,5	2,5
3	2,45	2,15	2,8
4	2,3	3,6	3,4
5	7,27	7,53	3,53
6	2,7	3,4	2
7	2,85	2,7	2,7
8	2,3	3,4	2,4

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Tiempo de formación de flóculo para cada toma de muestra



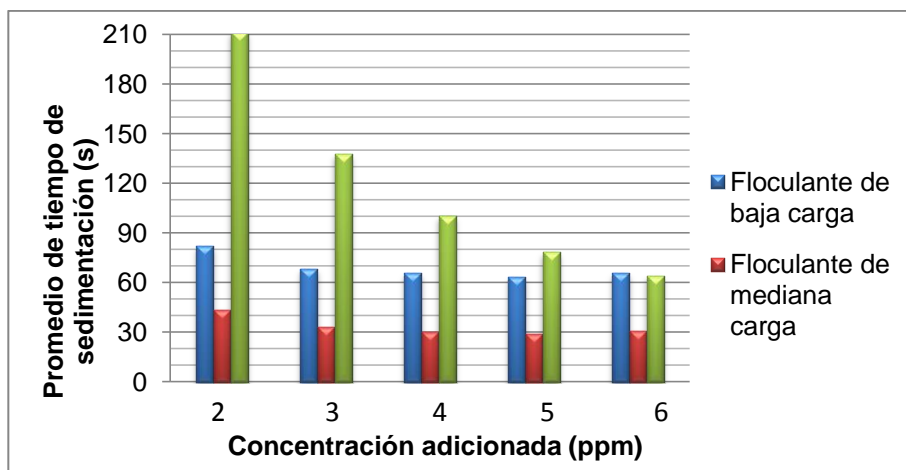
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Promedio de tiempo de sedimentación respecto a concentración adicionada**

Tipo de floculante	Concentración adicionada (ppm)	Promedio de tiempo de sedimentación (s)	Promedio final (s)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Floculante 1 baja carga	2	82,29	69,30	65,60	94,66 %
	3	68,58			
	4	66,04			
	5	63,58			
	6	66,00			
Floculante 2 mediana carga	2	43,71	33,49	14,37	42,89 %
	3	33,08			
	4	30,54			
	5	29,33			
	6	30,79			
Floculante 3 alta carga	2	211,63	118,63	91,66	77,26 %
	3	138,13			
	4	100,46			
	5	78,63			
	6	64,33			

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Tiempo de sedimentación de flóculo respecto a concentración adicionada**



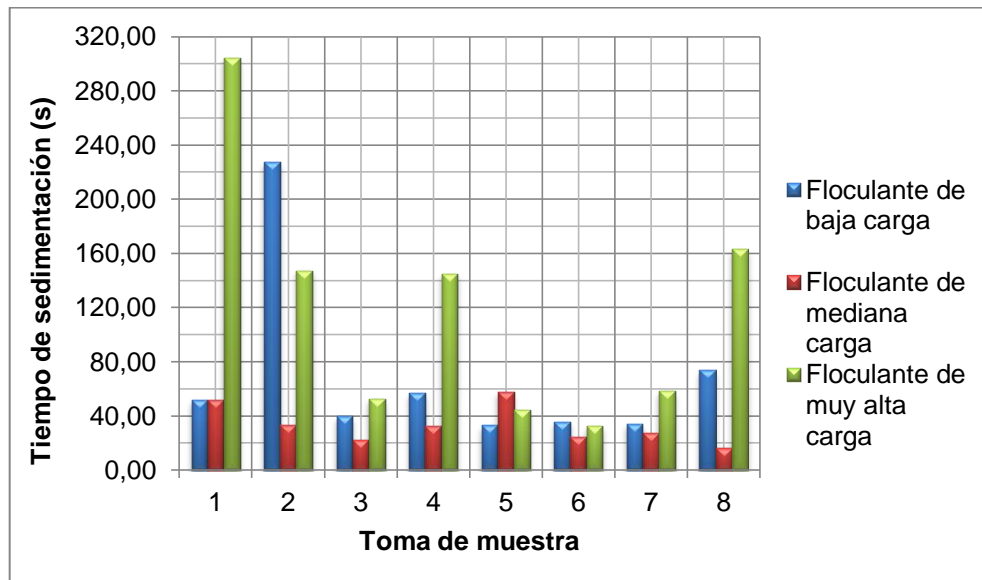
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Promedio de tiempo de sedimentación para cada toma de muestra**

Toma de muestra	Baja carga	Mediana carga	Muy alta carga
1	52,13	51,80	304,40
2	227,93	33,80	147,53
3	39,80	22,80	52,80
4	57,20	32,33	145,07
5	33,27	58,00	44,60
6	36,07	25,13	32,80
7	34,27	27,53	58,67
8	73,73	16,53	163,20

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Tiempo de sedimentación para cada toma de muestra**



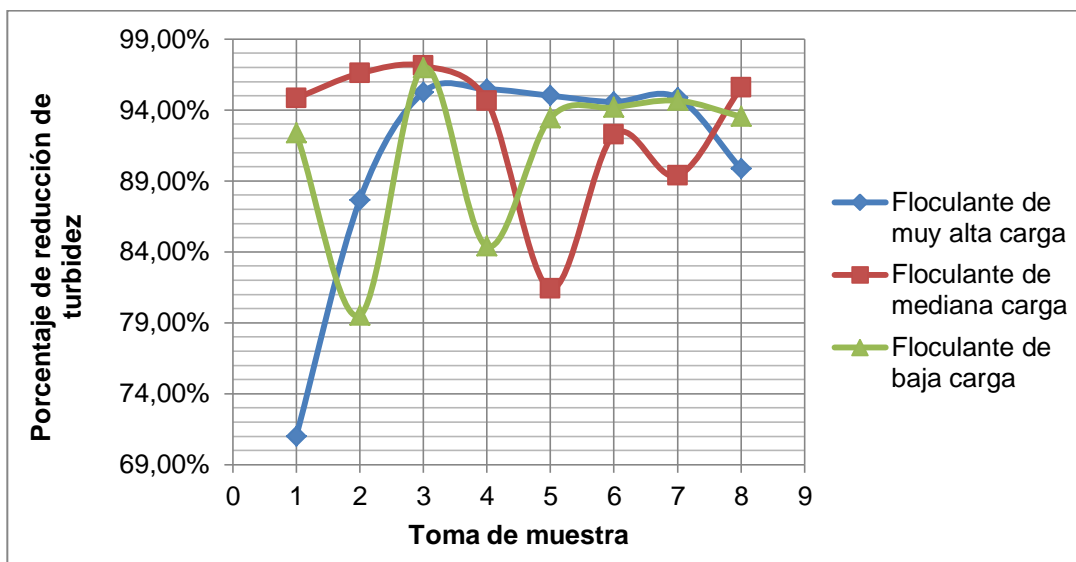
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Porcentaje de reducción de turbidez y eficiencia de cada floculante respecto a cada toma de muestra**

Toma de muestra	Baja carga	Mediana carga	Muy alta carga
1	92,36 %	94,83 %	70,99 %
2	79,52 %	96,58 %	87,65 %
3	96,97 %	97,10 %	95,24 %
4	84,39 %	94,65 %	95,47 %
5	93,44 %	81,39 %	95,01 %
6	94,18 %	92,25 %	94,56 %
7	94,66 %	89,37 %	94,86 %
8	93,53 %	95,58 %	89,85 %
<b>Promedio</b>	91,13 %	92,72 %	90,45 %
<b>Desviación estándar</b>	0,06	0,05	0,08
<b>Coefficiente de variación</b>	6,54 %	5,62 %	9,27 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Porcentaje de reducción de turbidez para cada toma de muestra**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.3. Efecto que ocasiona la variación del pH para cada muestra

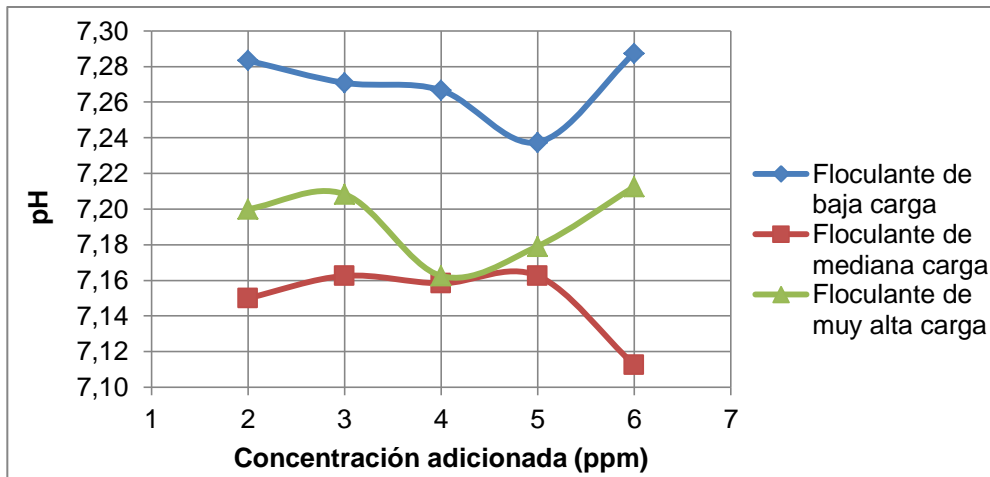
Seguidamente se muestran los resultados acerca de la variación de pH.

Tabla XIII. Promedio de pH respecto a concentración adicionada

Tipo de floculante	Concentración adicionada (ppm)	Promedio de pH	Promedio final	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Floculante 1 baja carga	2	7,28	7,27	0,019	0,26 %
	3	7,27			
	4	7,27			
	5	7,24			
	6	7,29			
Floculante 2 mediana carga	2	7,15	7,15	0,022	0,30 %
	3	7,16			
	4	7,16			
	5	7,16			
	6	7,11			
Floculante 3 alta carga	2	7,20	7,19	0,022	0,30 %
	3	7,21			
	4	7,16			
	5	7,18			
	6	7,21			

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **pH respecto a la concentración adicionada de cada  
floculante**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. **Dosis óptima del floculante respecto a la turbidez y carga iónica**

Seguidamente se muestran los resultados acerca de la dosis óptima.

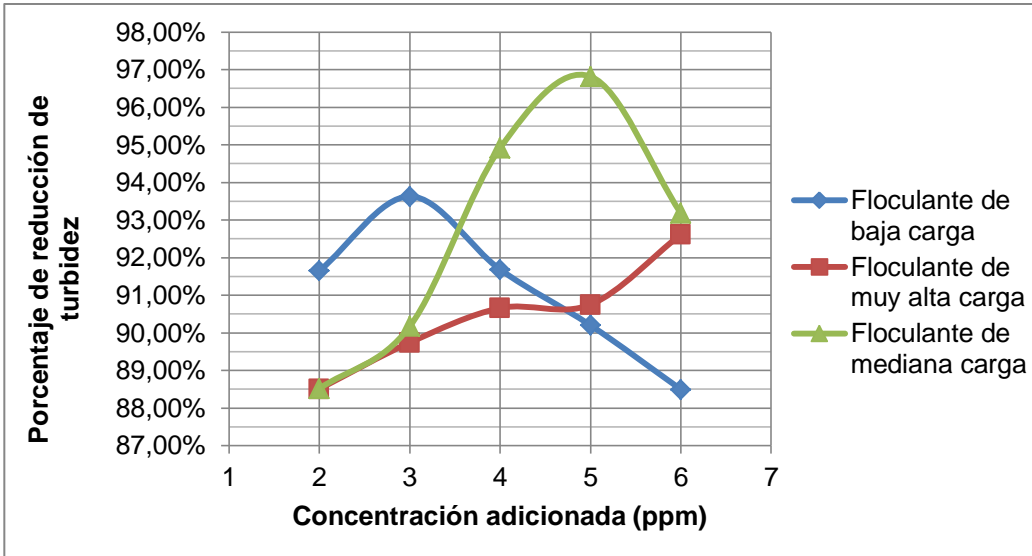


Tabla XIV. **Promedio de porcentaje de reducción de turbidez respecto a la concentración adicionada**

Tipo de floculante	Concentración adicionada (ppm)	Promedio de %reducción de turbidez	Promedio final	Desviación estándar	Coefficiente de variación
<b>Floculante 1 baja carga</b>	2	91,65 %	91,13 %	0,019	2,10 %
	3	93,63 %			
	4	91,68 %			
	5	90,20 %			
	6	88,50 %			
<b>Floculante 2 mediana carga</b>	2	88,52 %	92,72 %	0,034	3,66 %
	3	90,17 %			
	4	94,92 %			
	5	96,82 %			
	6	93,18 %			
<b>Floculante 3 alta carga</b>	2	88,51 %	90,46 %	0,015	1,67 %
	3	89,74 %			
	4	90,66 %			
	5	90,75 %			
	6	92,62 %			

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Porcentaje de reducción de turbidez respecto a la concentración adicionada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Dosis óptima para cada floculante respecto a la turbidez**

Tipo de floculante	Dosis óptima de floculante (ppm)	Eficiencia del floculante respecto a la reducción de turbidez
De baja carga	3	93,63 %
De mediana carga	5	96,82 %
De muy alta carga	6	92,62 %

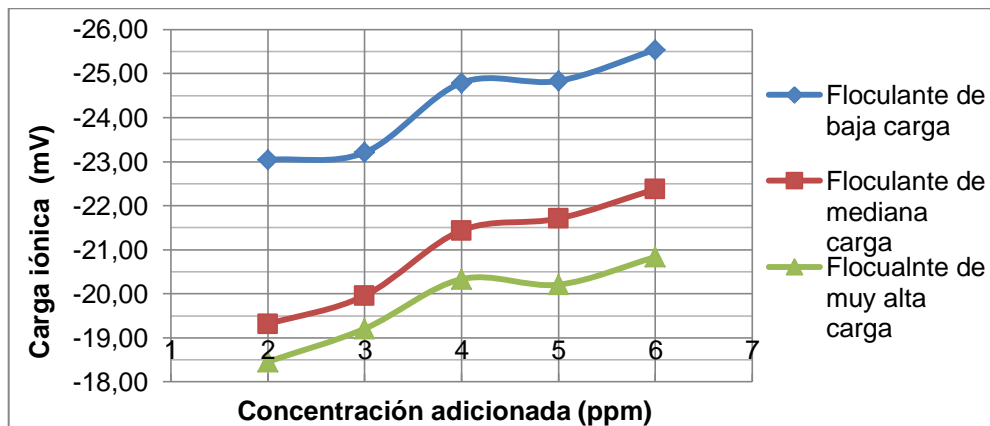
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Promedio de carga iónica respecto a la concentración adicionada de floculante

Tipo de floculante	Concentración adicionada (ppm)	Promedio de carga iónica (mV)	Promedio final (mV)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Floculante 1 baja carga	2	-23,04	-24,28	1,099	4,53 %
	3	-23,21			
	4	-24,79			
	5	-24,83			
	6	-25,54			
Floculante 2 mediana carga	2	-19,31	-20,96	1,278	6,10 %
	3	-19,96			
	4	-21,44			
	5	-21,71			
	6	-22,38			
Floculante 3 alta carga	2	-18,46	-19,81	0,956	4,82 %
	3	-19,21			
	4	-20,33			
	5	-20,21			
	6	-20,83			

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Carga iónica respecto a la concentración adicionada



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Dosis óptima para cada floculante respecto a la carga iónica**

Tipo de floculante	Dosis óptima de floculante (ppm)	Promedio total de carga iónica
De baja carga	2	-24,28
De mediana carga	2	-20,96
De muy alta carga	2	-19,81

Fuente: elaboración propia.

#### 4.5. Comparación y determinación del floculante más efectivo respecto al tiempo de formación y sedimentación, porcentaje de reducción de turbidez y menor costo

Seguidamente se muestran los resultados acerca de la comparación y determinación del floculante más efectivo.

Tabla XVIII. **Comparación de los tres floculantes respecto a tiempos y dosis**

	Tiempo de formación (s)	Tiempo de sedimentación (s)	Porcentaje de reducción de turbidez	Dosis óptima respecto a % reducción de turbidez (ppm)	Dosis óptima respecto a carga iónica (ppm)
<b>Floculante 1 baja carga</b>	3 485	69 300	91,13 %	3	2
<b>Floculante 2 mediana carga</b>	3 058	33 492	92,72 %	5	2
<b>Floculante 3 muy alta carga</b>	2 754	118 633	90,46 %	6	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Comparación de los tres floculantes respecto al costo basado en la dosis óptima**

	Agua tratada al día (m <sup>3</sup> /día)	Costo de floculante por kg (\$/kg)	Costo por metro cúbico de agua tratada (\$/m <sup>3</sup> )	Costo total de agua tratada al día (\$/día)	Kilogramos de floculante utilizados al día (kg/día)	diferencia respecto al floculante de menor costo total
<b>Floculante 1 baja carga</b>	2500	6,00	0,0180	45,00	7,50	0
<b>Floculante 2 mediana carga</b>		5,75	0,0288	72,00	12,52	0,60
<b>Floculante 3 muy alta carga</b>		6,50	0,0390	97,50	15,00	1,17

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Determinación del floculante más efectivo basado en la dosis óptima**

Floculante 1 - Baja carga							
Dosis óptima (ppm)	Promedio % reducción de turbidez	Promedio de tiempo de sedimentación (s)	Promedio de tiempo de formación (s)	Promedio de carga iónica (mV)	Promedio de pH	Costo por metro cúbico de agua tratada (\$/m <sup>3</sup> )	Costo total de agua tratada al día (\$/día)
3	93,628 %	68,580	2,990	-23,21	7,27	0,0180	45,00

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó la comparación de tres floculantes polielectrolitos de naturaleza aniónica que varían en su densidad de carga: baja, media y muy alta carga. Los mismos se sometieron a un estudio que consistió de cuatro etapas muy importantes: caracterización, evaluación, comparación y determinación.

La caracterización del agua residual muestra cómo se encuentran los parámetros de turbidez, carga iónica, pH, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y la temperatura del agua, inicialmente, sin haber adicionado algún coagulante o floculante. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

En la tabla VII se presentan los datos originales de la caracterización para cada toma de muestra, donde se observa que la turbidez disminuyó y se mantuvo entre 797 NTU, lo que conduce a que presenta gran cantidad de sólidos disueltos y suspendidos, lo que puede verse influenciado por la producción del día y la calidad de y restos de aves fueron esparcidos dentro del agua. Respecto a la carga iónica, esta varió considerablemente ya que tiene una estrecha relación con la sangre por la que se encuentra compuesta mayoritariamente el agua residual. Según la concentración de sangre en el agua, la carga iónica puede incrementar o disminuir, también, los sólidos disueltos en ella se ven afectados. El pH se ve afectado por los sólidos disueltos y, por lo tanto, el agua se encuentra ligeramente ácida.

Los sólidos suspendidos tienen una relación estrecha con la turbidez, ya que los mismos por encontrarse en suspensión, afectan la calidad del agua haciéndola parecer más sucia, por lo que no es apta para ser vertida según el

acuerdo gubernativo 236-2006. Generalmente dichos sólidos están compuestos de plumas y restos de partes del cuerpo del ave lo que puede ser removido por medios mecánicos fácilmente. Por último, la temperatura que se encuentra ligeramente elevada está relacionada estrechamente con las partículas suspendidas ya que estas absorben el calor de la luz del sol que hacen que las aguas turbias se vuelvan más calientes y reducen la concentración de oxígeno en el agua.

En cuanto al análisis sobre la etapa de evaluación de cada floculante, en la tabla VIII se presenta el promedio de tiempo de formación de flóculo respecto a la concentración adicionada para cada uno de los floculantes evaluados.

En primera instancia podría empezarse a interpretar que los promedios obtenidos para los tres distintos floculantes son muy cercanos; pero con base en la desviación estándar y el coeficiente de variación, se observa que el floculante de muy alta carga presenta la menor variabilidad, por lo tanto, los resultados son mucho más precisos en comparación de los otros dos.

Asimismo, en la figura 17 se observa que el floculante de muy alta carga es el que presenta el menor tiempo de formación del flóculo, esto se debe a que por presentar mayor densidad de carga negativa atrae con mayor facilidad los iones positivos que se encuentran dispersos en el agua residual. Cabe mencionar que estos iones positivos son producto de la sangre que se encuentra en mayor proporción dentro del agua residual. También, se puede apreciar que el floculante de muy alta carga posee el menor coeficiente de variación, por lo que la variabilidad de los datos es poca, considerándose precisos.



Si se quiere comparar los floculantes utilizados respecto a cada toma de muestra, la tabla IX presenta este análisis de promedio de tiempo y cabe resaltar que el floculante de baja carga es el que posee más tomas de muestra donde su tiempo ha sido menor, por lo que existe mayor probabilidad a que el mismo forme floc más rápido; sin embargo, la menor variabilidad respecto a la media la posee el floculante de muy alta carga, lo cual le genera mayor estabilidad.

En la figura 18 se presentan los resultados del tiempo de formación de flóculo para cada toma de muestra, donde puede observarse que el tiempo se mantuvo entre los intervalos de 2 a 3 segundos, excepto en la toma de muestra 5, lo que puede deberse a la producción del día que presenta mayor cantidad de sangre; sin embargo, el floculante de muy alta carga es el que presenta mayor estabilidad en cuanto al tiempo de formación.

En la tabla X se presenta el promedio de tiempo de sedimentación respecto a la concentración adicionada para cada uno de los floculantes evaluados. Los tiempos varían significativamente respecto de un floculante a otro, esto se debe a que existen varios factores que influyen en la sedimentación como la densidad de carga aniónica del floculante, el peso molecular del floculante, el tamaño de flóculo y su consistencia.

La influencia que ejerce el peso molecular del floculante respecto a la sedimentación se observa cuando se utiliza un floculante de alto peso como lo es el floculante 3 en comparación con el muy alto peso del floculante 1 y 2. Al incrementarse el peso molecular, el flóculo formado es más grande. Como consecuencia, el contenido de agua dentro del flóculo incrementa y es más fácil que pueda sedimentar. Es por ello que los floculantes 1 y 2 presentan bajos tiempos de sedimentación.

Sin embargo, también existe una diferencia del doble de tiempo entre el floculante 1 y 2, esto se debe a la influencia que ejerce la densidad de carga aniónica. Ya que a mayor carga aniónica que presente el floculante, se obtienen flóculos más compactos. Esto es porque hay más grupos de unión para interactuar con las partículas de sangre del agua residual. La densidad es más alta y esta permite que exista un incremento en las propiedades de resistencia, dando mayor consistencia al flóculo formado.

Es por ello que el floculante 2, que es el de mediana carga, presenta el menor tiempo de sedimentación; como también posee la menor variabilidad de datos, lo cual se representa en la figura 19. De igual manera, esto también se reproduce cuando se analiza el promedio de tiempo de sedimentación respecto a cada toma de muestra, ya que el floculante 2 lidera la tabla XI con más veces donde su tiempo ha sido menor.

En la figura 20 se presentan los tiempos de sedimentación para cada toma de muestra donde se observa que para el floculante de mediana carga la variación es poca, por lo que se considera más estable por tener datos más precisos que el floculante de baja y alta carga.

Si se quiere analizar de forma cualitativa la formación y sedimentación del flóculo para los tres floculantes polielectrolitos utilizados, en los apéndices 3, 4 y 5 se puede observar con mayor claridad lo anteriormente descrito.

En la tabla XII se presenta el promedio de porcentaje de reducción de turbidez que difiere considerablemente entre el floculante de mediana carga y los otros dos floculantes. La variabilidad que presentan los floculantes para reducir la turbidez por cada toma de muestra es poca, lo cual se puede apreciar en la figura 21. Por consiguiente, se determina que los tres floculantes son muy

estables; no descartando que exista uno mejor que otro. En la misma tabla se presenta la eficiencia de cada floculante respecto a la reducción de turbidez, donde el floculante de mediana carga es el que presenta el mayor porcentaje de eficiencia.

Esto se debe a dos factores clave: el tamaño del flóculo y sus propiedades. Este último factor se entiende como la habilidad de los flóculos para resistir la degradación debida a fuerzas cortantes por la turbulencia del agua. Estos factores influyen en la formación y la retención del flóculo.

Debido a que el floculante de mediana carga presenta una mayor retención de cargas opuestas a él por su densidad; además, por su peso molecular forma un flóculo más consistente y grande, los flóculos no se deforman o se rompen tan fácilmente en comparación con los floculantes de baja y muy alta carga. Lo que hace que existan menos partículas dispersas dentro del agua que la hacen ver más clara.

Seguidamente se presenta el análisis del efecto que ocasiona el pH por cada floculante utilizado.

Teóricamente, se ha establecido que el pH es un parámetro muy importante que se ve influenciado en el rendimiento del proceso electroquímico cuando se utilizan floculantes. Para determinar su efecto, luego de colocar el coagulante cloruro férrico a la muestra madre, se ajustó el pH de 2,23 a 7,00. Esto se realizó utilizando hidróxido de sodio ya que en ese rango los floculantes potencializan mejor sus propiedades.

En la tabla XIII se presentan los datos del pH promedio respecto a las concentraciones adicionadas para cada floculante. Se puede observar que el

pH incrementa poco para las concentraciones utilizadas, sin embargo, el floculante de mediana carga es el que posee los valores más cercanos a 7,00, lo cual manifiesta una menor variabilidad fisicoquímica de la muestra de agua residual.

Para entender mejor el efecto que ocasiona se observa la figura 22, donde los floculantes demuestran un punto óptimo a una concentración específica. Esto quiere decir que en ese punto el agua presenta la mayor semejanza con el pH medido al inicio, lo que es mejor porque es el punto donde menos ha cambiado sus propiedades.

Respecto a la dosis óptima de floculante se puede observar la tabla XIV que demuestra el porcentaje de reducción de turbidez contra la concentración adicionada para cada tipo de floculante. La primera impresión que ocasionan dichos resultados es que el floculante de mediana carga es el que posee el mayor porcentaje de reducción, seguidamente por el floculante de baja carga y por último el floculante de alta carga.

En la figura 23 puede verse que los tres floculantes difieren bastante entre sí; no obstante, para cada floculante la variación por concentración utilizada sí existe, obteniendo una concentración óptima, que en este caso es la que más porcentaje de reducción de turbidez obtenga.

Es por ello que en la tabla XV se presenta la dosis óptima para cada floculante respecto a la turbidez donde se observa que la eficiencia del floculante de mediana carga es la mayor, seguida por la de baja carga y, por último, la de muy alta carga. Sin embargo, el floculante de baja y muy alta carga difieren aproximadamente en 1 %; es decir, ambos se compensan en ciertos aspectos; como el floculante de baja carga que presenta un peso molecular alto

y por ello sedimenta a mayor velocidad, pero tiene una baja carga aniónica y no forma un flóculo tan compacto, por lo que incrementa la turbidez. Asimismo, el floculante de muy alta carga presenta el mayor tiempo de sedimentación por no ser de peso molecular alto, es por ello que demuestra mayor turbidez; sin embargo, presenta mayor carga aniónica por lo que tiene un flóculo más compacto, haciendo que la turbidez descienda mientras más floculante se dosifique.

La dosis óptima para el floculante de baja carga es menor que la de mediana carga, aunque el mismo tenga mayor eficiencia. Para determinar cual será el mejor, es necesario realizar la comparación de costos.

Respecto a la carga iónica, la tabla XVI hace la referencia de como varía la misma para cada concentración adicionada de floculante. Se presenta que la menor variabilidad la tiene el floculante de baja carga; sin embargo, los menores promedios los representa el floculante de muy alta carga. Este hecho puede verse de una mejor forma en la figura 24 donde los tres floculantes presentan una tendencia lineal ascendente, lo que afirma que a mayor concentración adicionada de floculante, mayor carga iónica en valor absoluto. Como este hecho presenta una tendencia proporcional, significa que a medida que disminuye la carga iónica, las partículas pueden aproximarse aumentando la posibilidad de una colisión, es por ello que el floculante de muy alta carga es el que presenta los valores más cercanos a la neutralidad y, por lo mismo, presenta el tiempo de formación de flóculo menor.

Lo que se requiere es que se obtengan valores lo más cercanos a cero, sin necesidad de neutralizarlo todo por completo, ya que si se añade demasiado floculante las partículas pueden cargarse con el signo contrario lo que conlleva a que vuelvan a dispersarse.

En la tabla XVII se presenta la dosis óptima respecto a la carga iónica y para todos los floculantes la mejor dosis es a 2 ppm, debido a que en ese punto presentan el menor promedio de carga iónica que es lo que se requiere para no afectar las propiedades del agua que se está tratando y las propiedades del mismo floculante.

Respecto al análisis de comparación y determinación del floculante más efectivo, este se realizó con base en tres factores: tiempo de sedimentación, porcentaje de reducción de turbidez y costos respecto a cada floculante utilizado.

En la tabla XXIII se presenta la comparación de los tres floculantes respecto a tiempos y dosis. Los datos presentan que el tiempo de formación es menor en el floculante de muy alta carga; sin embargo, los tiempos no tienen una diferencia significativa por lo que se considera que este parámetro no afecta la decisión del floculante más efectivo por quedar muy cercanos los resultados de los tres.

Seguidamente, se presenta el tiempo de sedimentación donde cada floculante difiere aproximadamente el doble de tiempo. En este caso el floculante de mediana carga es el que presenta el menor tiempo de sedimentación, lo que se debe a su peso molecular y a su carga aniónica, propiedades descritas con anterioridad. Respecto al porcentaje de reducción de turbidez, el floculante de mediana carga es el que muestra la mayor reducción, sin embargo, los tres floculantes se consideran efectivos en la remoción de contaminantes por tener valores mayores al 90 %; en este caso también influye la cantidad de coagulante utilizada ya que al utilizar una cantidad óptima establecida de 350 ppm, la utilización de los floculantes será efectiva.

Posteriormente se presenta la dosis óptima de cada floculante respecto a la reducción de turbidez, donde el floculante de baja carga obtiene la concentración más baja para adicionar, haciendo que el uso del mismo sea menor para conseguir una reducción aceptable, la tendencia del mismo también influye en que mientras más concentración se adicione menos reducción de turbidez existe. Esto puede deberse a que la dosificación del polímero es eficiente hasta una cierta concentración, que en este caso es 3 ppm; más allá de ella puede conducir a un aumento de la turbidez debido a la re dispersión de partículas coloidales floculadas. Si se sobredosifica, el exceso de floculante afecta el proceso de floculación y las propiedades del flóculo, como la pérdida de resistencia.

Por último, se puede observar que los resultados de dosis óptima respecto a la carga iónica son de 2 ppm para los tres floculantes, esto se debe a que al dosificar con menor cantidad el agua se consigue no afectar tanto sus propiedades. El efecto de la carga iónica para los tres floculantes es el mismo ya que la concentración es directamente proporcional a la carga.

Al realizar la comparación de los tres floculantes respecto al costo basado en la dosis óptima, se hace referencia a la tabla XIX que presenta que el floculante que es más barato por kilogramo es el floculante de mediana carga, sin embargo, el floculante de baja carga presenta el menor costo por metro cúbico de agua tratada y por agua tratada al día. Esto se debe a que se basa en la dosis óptima de floculante respecto al porcentaje de reducción de turbidez, y como la dosis es menor para el floculante de baja carga, este representa el menor costo.

Se determina que el floculante más efectivo con base en la dosis óptima es el floculante de baja carga, los resultados se presentan en la tabla XX, donde se observa que el promedio de reducción de turbidez es aceptable, el promedio de tiempo de sedimentación fue el segundo mejor tiempo; sin embargo esto le da la versatilidad al floculante de buscar otras alternativas de remoción de sólidos, la cual puede ser por inyección de aire, donde los tiempos de sedimentación no son significativos.

El promedio de tiempo de formación es rápido, no obstante, este parámetro no afecta la decisión de la efectividad del floculante, como se mencionó anteriormente. El promedio de carga iónica, al igual que el tiempo de formación, no afecta de manera significativa la efectividad del floculante, ya que por las propiedades de densidad de carga del mismo, la cual es baja, no afecta con sus iones el agua de tal forma de cambiar su carga y crear el efecto inverso de re dispersión del material coloidal. Respecto al pH, este se encuentra en rango para poder ser vertida el agua tratada, según el acuerdo gubernativo 236-2006; y por último, los costos son los más bajos de los tres floculantes evaluados, debido a que su dosis óptima fue la más baja.



## CONCLUSIONES

1. La caracterización del agua residual presenta el no cumplimiento en cuanto a sólidos suspendidos (748 mg/L), según el acuerdo gubernativo 236-2006, artículo 20.
2. La mayor eficiencia en cuanto al tiempo de formación de flóculo la obtuvo el floculante de muy alta carga con 2,75 segundos, referente a la mayor eficiencia del tiempo de sedimentación, el floculante de mediana carga la obtuvo con 33,49 segundos. Por último, la mayor eficiencia respecto al porcentaje de reducción de turbidez es proporcionada por el floculante de mediana carga con un 92,72 %.
3. El efecto que ocasiona el pH respecto a la dosificación de los tres floculantes es que se obtiene un punto óptimo a cierta concentración añadida, dando como resultado para el floculante de baja carga un pH de 7,24 a 5mg/L, para el de mediana carga un pH de 7,11 a 6 mg/L y para el de muy alta carga un pH de 7,16 a 4 mg/L.
4. La dosis óptima para el floculante de baja carga respecto al comportamiento de la turbidez es de 3 mg/L con eficiencia del 93,63 %, para el floculante de mediana carga es de 5 mg/L con eficiencia de 96,82 % y para el floculante de muy alta carga es de 6 mg/L con eficiencia de 92,62 %. Respecto a la carga iónica, la dosis óptima para los floculantes de baja, mediana y alta carga es de 2 mg/L, dando un resultado final de -24,28 mV, -20,96 mV, -19,81 mV, respectivamente.

5. El floculante más efectivo con base a la dosis óptima es el floculante de baja carga, por presentar un porcentaje de reducción de turbidez de 93,63 %, un tiempo promedio de sedimentación de 68,58 segundos y el costo más bajo por agua tratada al día de 45 dólares. Respecto al tiempo de formación, no se considera como un parámetro significativo que afecte la decisión de la efectividad de los floculantes empleados.
  
6. El floculante óptimo es el de baja carga aniónica al obtener una eficiencia de 93,63 % y un costo de tratamiento de 2 500 metros cúbicos de 45,00 \$/día.

## RECOMENDACIONES

1. Se debe tomar en cuenta que la turbidez disminuye con un aumento de la dosificación del polímero hasta cierta dosis, un aumento adicional en la dosificación puede conducir a un aumento de la turbidez, lo que genera dispersión de las partículas coloidales que ya estaban floculadas.
2. Una alternativa más eficaz para la remoción de sólidos, en cuanto al ahorro de tiempo, es el método por flotación, donde son inyectadas burbujas de gas que se adhieren a las partículas que se quieren remover y cuando se encuentran en la superficie pueden ser barridas con mayor facilidad; de esta forma, los tiempos de sedimentación no son significativos.
3. Respecto a la concentración adicionada de coagulante, se toma en cuenta que la misma es óptima únicamente para el cloruro férrico, si se desea utilizar otro coagulante la misma puede variar, lo que puede afectar la elección de floculantes.
4. Para que el agua residual pueda ser vertida, es necesario realizar el tratamiento secundario, de esta forma se garantizará que la misma no contaminará efluentes.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CAIXETA, Cláudia; CAMMAROTA, Magali; XAVIER, Alcina. *Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor*. Brasil: Departamento de Ingeniería Bioquímica, Federal University of Rio de Janeiro, 2002. 369 p.
2. CALDERA, Yaxcelys; GUTIÉRREZ, Edixon; CHÁVEZ, Javier; RUESGA, Leopoldo. *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de industria avícola*. Vol.10. No. 4. Venezuela: Universidad de Zulia, Laboratorio de Investigaciones Ambientales, 2010. 9 p.
3. CANO, Carlos. *Evaluación de un tratamiento de floculación-flotación para el agua residual generada en el procesamiento de subproductos avícolas*. Trabajo de graduación de Ing. Ambiental. Bogotá: Universidad Libre, Facultad de Ingeniería Química, 2015. 57 p.
4. CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. [En línea]. <[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)>. [Consulta: 21 de abril de 2016].
5. ESPINOSA, Juan. *Tratamiento de aguas residuales de matadero con elevado contenido en sangre mediante la combinación de procesos anaerobio de película fija (BAPF) y aerobio de*

*membrana (MBR)*. Trabajo de graduación de Ing. Química. España: Universidad de Burgos, Facultad de Ingeniería Química, 2011. 379 p.

6. Fondo Europeo de Desarrollo Regional. *Guía de la producción limpia para el sector de matadero y transformación de carne avícola de la comunidad valenciana*. España: Escuela de Organización Industrial, EOI, 2009. 120 p.
7. KOBYA, Mehmet. *Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation*. Turquía: Departamento de Ingeniería Química, Gebze Institute of Technology, 2005. 315 p.
8. LENNTECH. *Potencial Zeta*. [En línea]. <<http://www.lenntech.es/potential-zeta.htm>>. [Consulta: 21 de abril de 2016].
9. LOPEZ, Manuel. *Tratamiento biológico de aguas residuales aplicable a la industria avícola*. [En línea]. <<http://www.engormix.com/MA-avicultura/manejo/articulos/tratamiento-biologico-aguas-residuales-t1481/124-p0.htm>>. [Consulta: 21 de abril de 2016].
10. MALDONADO, Julio. *Sistema de tratamiento para aguas residuales industriales en mataderos*. Vol. 1. Colombia: Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Ambiental, 2006.
11. MALDONADO, Víctor. *Sedimentación*. [En línea]. <<https://es.slideshare.net/glodita/siete-7582612>>. [Consulta: 2 de mayo de 2017].

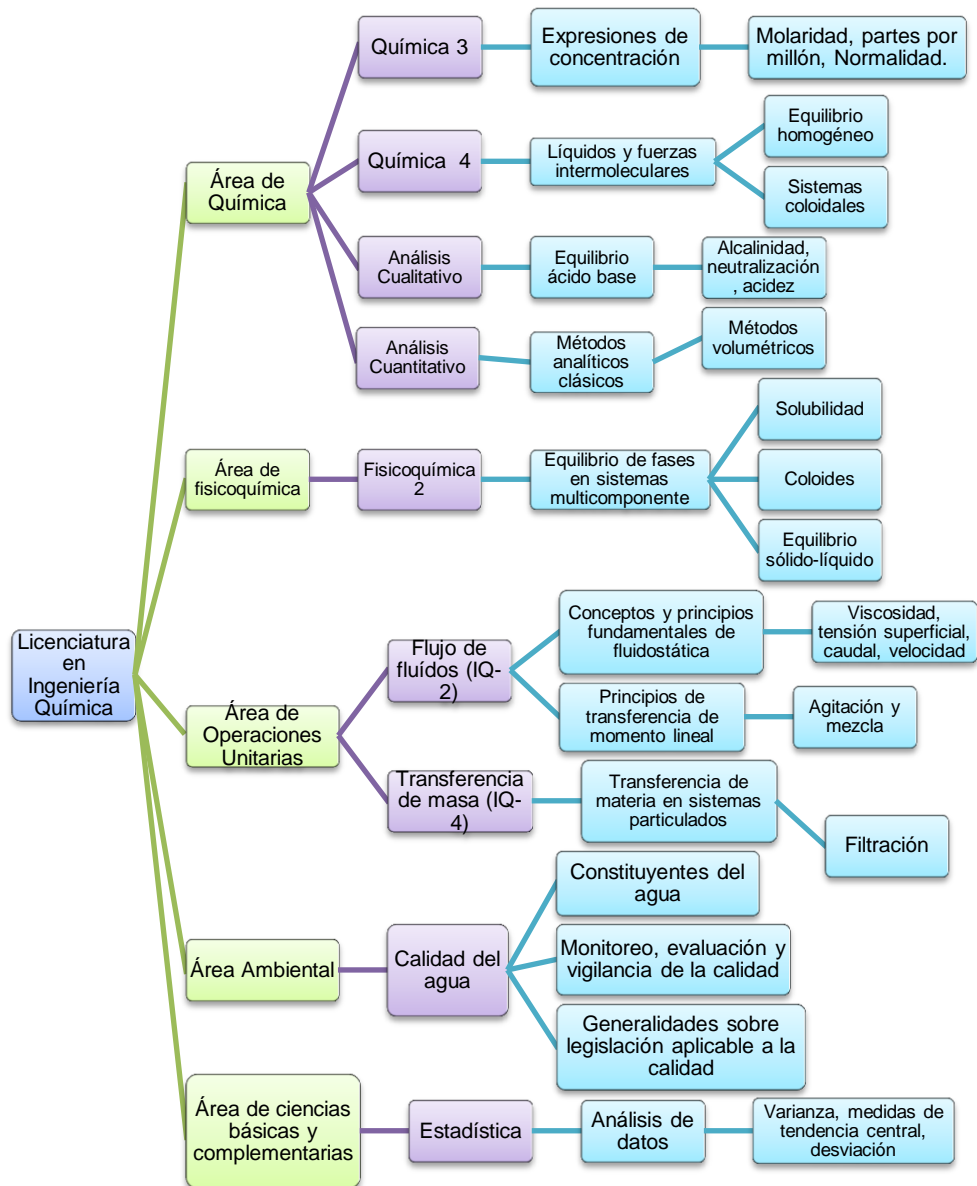
12. MELGAR, Manfred. *Evaluación a nivel de laboratorio de coagulantes-floculantes como alternativas para eliminar sólidos en suspensión de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Agrónomo. Universidad Rafael Landívar, 2007. p. 77.
13. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Acuerdo Gubernativo 236-2006. Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Guatemala: 15 de mayo de 2006. 14 p
14. MUTAR, Mohammed; et al. *Preparation of copolymer of acrylamide and acrylic acid and its application for slow release sodium nitrate fertilizer*. Iraq: Universidad de Al-Qadissiya, Departamento de Química. 2005. 21 p.
15. NAVARRO, Fabiola. *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Tesis doctoral Ing. Química. Ciudad Real: Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de Ciencias Químicas, 2007. 279 p.
16. PROGRAMA AMBIENTAL REGIONAL PARA CENTROAMÉRICA, PROARCA. *Guía Básica de Manejo Ambiental de Rastros Municipales*. Centroamérica, 2004. 74 p.
17. RODRÍGUEZ, A.; et al. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. [En línea]. <[https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2\\_Tratamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdf](https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf)>. [Consulta: 14 de abril de 2016].

18. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. *Características de las aguas residuales*. [En línea]. <<http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>>. [Consulta: 20 de abril de 2016].
  
19. WILSON, Lee. *Un vistazo a la tecnología de coagulación-floculación*. [En línea]. <[http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/V14\\_N4\\_Agua\\_Wilson.pdf](http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/V14_N4_Agua_Wilson.pdf)>. [Consulta: 21 de abril de 2016].



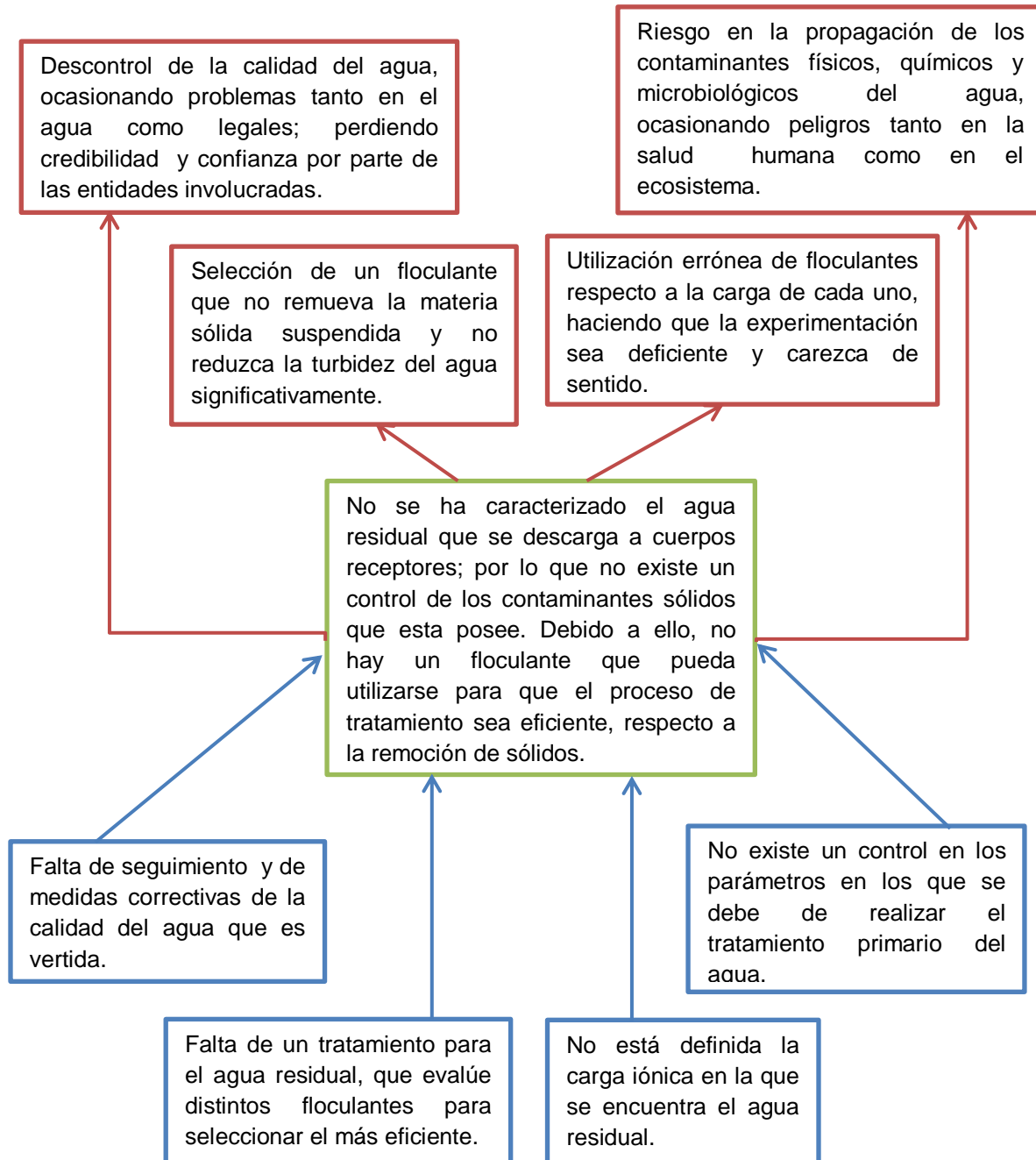
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

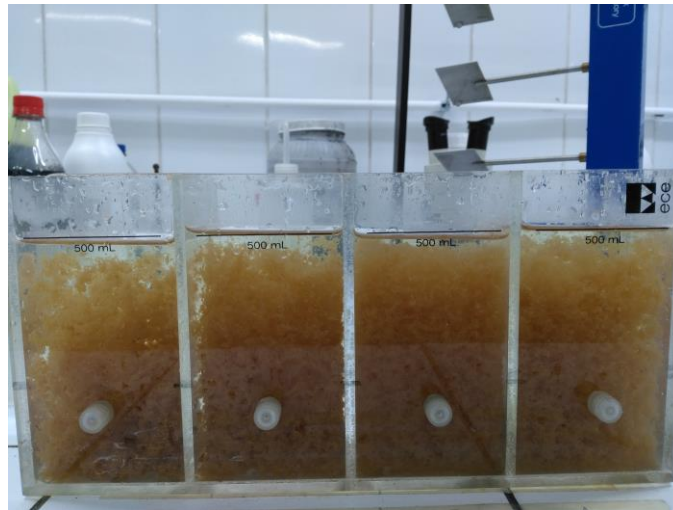
## Apéndice 2. Árbol de problemas



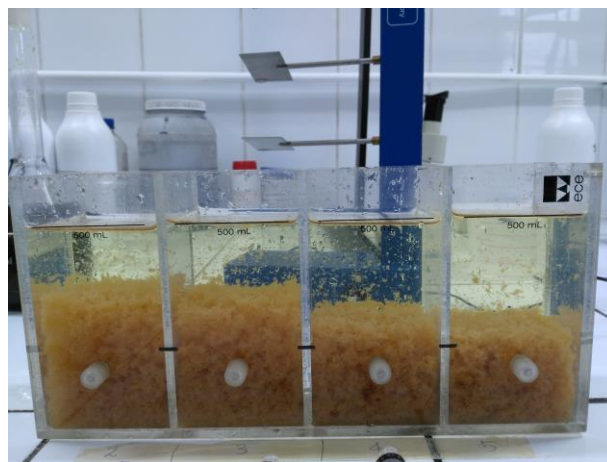
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Fotografías de la formación y sedimentación del floculante de muy alta carga**

- Formación:



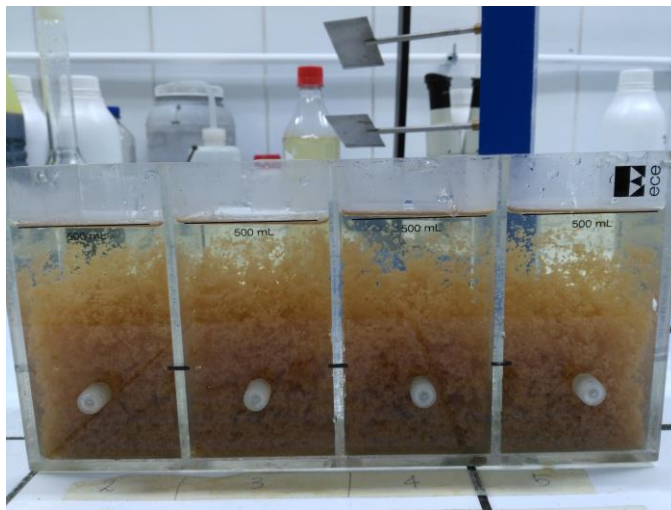
- Sedimentación:  
Índice de Willcomb: 6



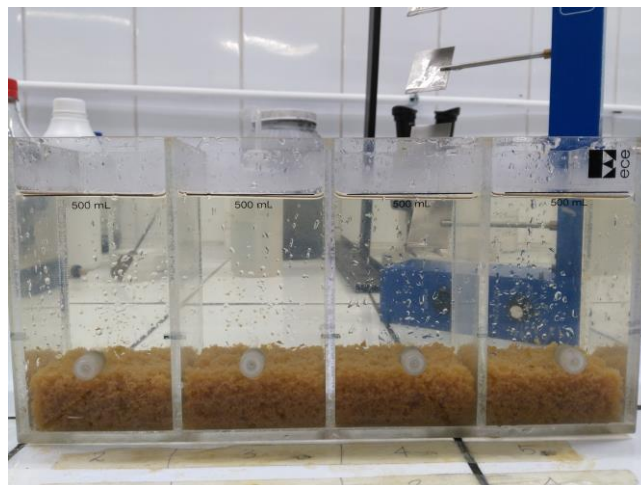
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Fotografías de la formación y sedimentación del floculante de baja carga**

- Formación:



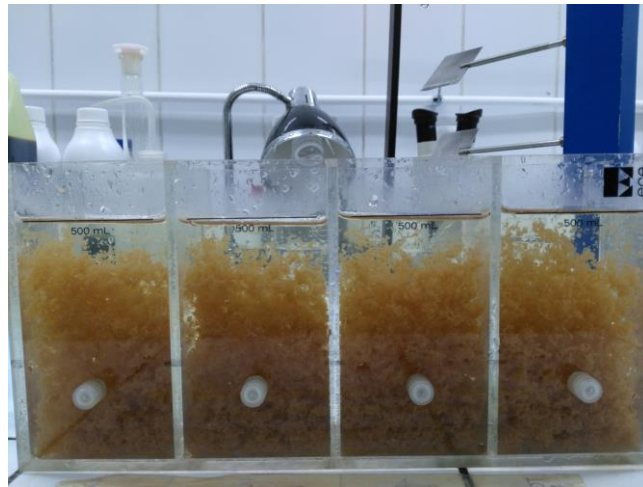
- Sedimentación:  
Índice de Willcomb: 8



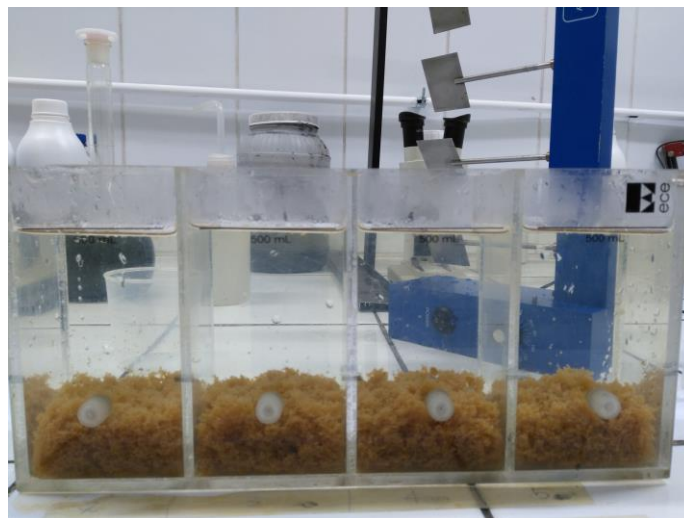
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Fotografías de la formación y sedimentación del floculante de mediana carga**

- Formación:



- Sedimentación:  
Índice de Willcomb: 10



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 6. Fotografías de la adición de coagulante

- Muestra madre de agua residual
- Adición de coagulante

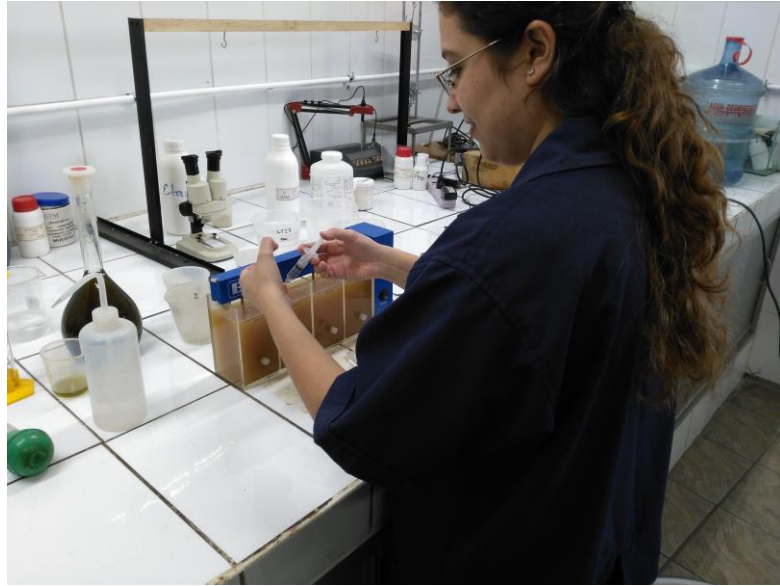


- Medición de pH de la muestra residual



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Fotografía de la adición de floculante**



Fuente: elaboración propia.





## ANEXOS

### Anexo 1. Hoja técnica del floculante de baja carga

<b>Potable Water Grade Anionic Polyelectrolyte</b>															
<b>Chemical Nature</b>	Copolymer of acrylamide and acrylic acid														
<b>Application Areas</b>	<p>Polyelectrolyte used as a coagulant aid for clarification and filtration of potable water, and for the conditioning of substrates prior to thickening and dewatering.</p> <p>American Standard ANSI/NSF 60 compliant for coagulation and flocculation to a maximum concentration of 1.0mg/L.</p> <p>This product is FDA approved. Contact a sales representative for more information.</p>														
<b>Benefits</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reduction of the inorganic coagulant dosage</li><li>• Increased clarifier throughput</li><li>• Reduction of sludge production</li><li>• Reduction in overall treatment cost</li></ul>														
<b>Typical Properties</b>	<table><tbody><tr><td>Product type:</td><td>Powder</td></tr><tr><td>Physical form:</td><td>Off-white granular solid</td></tr><tr><td>Anionic charge:</td><td>Medium-low</td></tr><tr><td>Molecular weight:</td><td>Very high</td></tr><tr><td>Specific gravity:</td><td>0.75</td></tr><tr><td>Bulk density:</td><td>46.8 lb/ft<sup>3</sup></td></tr><tr><td>Ph 1% solution:</td><td>6-8</td></tr></tbody></table>	Product type:	Powder	Physical form:	Off-white granular solid	Anionic charge:	Medium-low	Molecular weight:	Very high	Specific gravity:	0.75	Bulk density:	46.8 lb/ft <sup>3</sup>	Ph 1% solution:	6-8
Product type:	Powder														
Physical form:	Off-white granular solid														
Anionic charge:	Medium-low														
Molecular weight:	Very high														
Specific gravity:	0.75														
Bulk density:	46.8 lb/ft <sup>3</sup>														
Ph 1% solution:	6-8														

Fuente: Empresa JARSA, S.A.

Anexo 2. **Hoja técnica para el floculante de mediana carga**

<b>Solid Grade Anionic Polyelectrolyte</b>															
<b>Chemical Nature</b>	Copolymer of acrylamide and acrylic acid														
<b>Application Areas</b>	<p>Polyelectrolyte for the conditioning of a variety of municipal and industrial substrates prior to mechanical or static solid/liquid separation.</p> <p>This product is not compliant for use in potable water applications.</p> <p>This product is FDA approved. Contact a sales representative for more information.</p>														
<b>Benefits</b>	Highly effective across a wide range of applications including mechanical dewatering, thickening, flotation, and clarification. Operation over a wide pH range (4-9).														
<b>Typical Properties</b>	<table><tbody><tr><td>Product type:</td><td>Powder</td></tr><tr><td>Physical form:</td><td>Off-white granular solid</td></tr><tr><td>Anionic charge:</td><td>Medium</td></tr><tr><td>Molecular weight:</td><td>Very high</td></tr><tr><td>Specific gravity:</td><td>0.75</td></tr><tr><td>Bulk density:</td><td>46.8 lb/ft<sup>3</sup></td></tr><tr><td>Ph 1% solution:</td><td>6-8</td></tr></tbody></table>	Product type:	Powder	Physical form:	Off-white granular solid	Anionic charge:	Medium	Molecular weight:	Very high	Specific gravity:	0.75	Bulk density:	46.8 lb/ft <sup>3</sup>	Ph 1% solution:	6-8
Product type:	Powder														
Physical form:	Off-white granular solid														
Anionic charge:	Medium														
Molecular weight:	Very high														
Specific gravity:	0.75														
Bulk density:	46.8 lb/ft <sup>3</sup>														
Ph 1% solution:	6-8														

Fuente: Empresa JARSA, S.A.

Anexo 3. **Hoja técnica para el floculante de muy alta carga**

<b>Solid Grade Anionic Polyelectrolyte</b>	
<b>Chemical Nature</b>	Copolymer of acrylamide and acrylic acid
<b>Application Areas</b>	Polyelectrolyte for the conditioning of a variety of municipal and industrial substrates prior to mechanical or static solid/liquid separation. This product is not compliant for use in potable water applications. This product is FDA approved. Contact a sales representative for more information.
<b>Benefits</b>	Highly effective across a wide range of applications including mechanical dewatering, thickening, flotation, and clarification. Operation over a wide pH range (4-9).
<b>Typical Properties</b>	Product type: Powder Physical form: Off-white granular solid Anionic charge: Ultra high Molecular weight: High Specific gravity: 0.75 Bulk density: 46.8 lb/ft <sup>3</sup> Ph 1% solution: 6-8

Fuente: Empresa JARSA, S.A.

