



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

**DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN, MEDIANTE LOS COAGULANTES
SULFATO DE ALUMINIO Y SULFATO FERROSO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE
UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

Rony Estuardo Vielman Ramírez

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, enero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN, MEDIANTE LOS COAGULANTES
SULFATO DE ALUMINIO Y SULFATO FERROSO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE
UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RONY ESTUARDO VIELMAN RAMÍREZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Julio David Vargas García
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:

**DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN, MEDIANTE LOS COAGULANTES
SULFATO DE ALUMINIO Y SULFATO FERROSO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE
UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de julio de 2017.



Rony Estuardo Vielman Ramírez

Guatemala, 4 de septiembre de 2018

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

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del Trabajo de Graduación "**DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN, MEDIANTE LOS COAGULANTES SULFATO DE ALUMINIO Y SULFATO FERROSO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS.**", del estudiante de Ingeniería Química Rony Estuardo Vielman Ramírez quien se identifica con el carné número 201220080 y CUI 2340 74884 0101.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,


Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Colegiado No. 685
Asesor



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



Guatemala, 15 de octubre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.048.2018.

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

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **019-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por el estudiante universitario: **Rony Estuardo Vielman Ramírez**.
Identificado con el CUI: **2340 74884 0101**.
Identificado con registro académico: **2012-20080**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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

**DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN, MEDIANTE LOS COAGULANTES
SULFATO DE ALUMINIO Y SULFATO FERROSO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

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

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"




Ing. Gerardo Ordoñez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.004.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **RONY ESTUARDO VIELMAN RAMÍREZ** titulado: **"DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN, MEDIANTE LOS COAGULANTES SULFATO DE ALUMINIO Y SULFATO FERROSO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero 2019

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

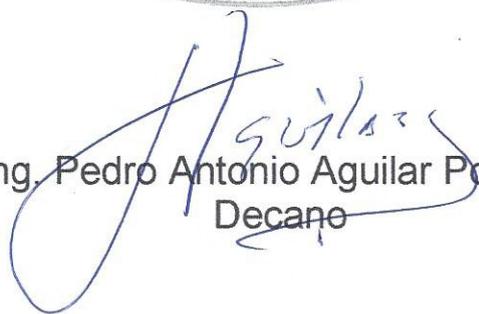
Cc: Archivo
CSWD/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química del trabajo de graduación titulado: **“DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN, MEDIANTE LOS COAGULANTES SULFATO DE ALUMINIO Y SULFATO FERROSO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS”** presentado por el estudiante universitario: **Rony Estuardo Vielman Ramirez** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, Enero de 2019

ACTO QUE DEDICO A:

Mi mamá

Ana Elvira Ramírez por ser mi guía en esta vida, ser el mayor ejemplo que tengo y le agradezco todo el apoyo a lo largo de los años, siempre me dejó perseguir mis sueños.

Mi papá

Edwin René Vielman por apoyar mis decisiones, siempre, darme el mayor cariño y fomentar los valores y el buen corazón que tengo.

Mis hermanos

Marielos, Sheila y René Vielman, Andrés y Gustavo Estrada, por todas las aventuras vividas, todos los consejos y enseñanzas aprendidas a través de los años.

Mi familia

Siempre presente en mi vida, mis primos, mis tíos, mis abuelos, sobrinos, porque no hay mejores personas para brindar apoyo incondicional en todas las etapas de la vida.

Mis amigos de la vida

Por todo lo vivido durante tantos años, lecciones, aprendizajes juntos y ser ese grupo de amigos que siempre estuvieron para mí en todo momento, muchas gracias.

Mis amigos del colegio

Porque nunca es tarde para conocer grandes personas, y agradezco las amistades que obtuve en el corto tiempo que estuve en el Capouilliez, amistades que me apoyaron en todas mis decisiones y me aguantaron durante ese lapso.

**Amigos de la
Universidad**

Amigos que obtuve durante mi vida universitaria, gracias por aguantarme y ayudarme en las clases, los buenos ratos durante las clases y fuera de ellas, y por apoyarme en todas las adversidades presentadas tanto dentro de la universidad como afuera.

**María Andrea Herrera
Huard**

Le agradezco porque estuvo en casi toda mi vida universitaria a mi lado, me apoyo en mis decisiones y nunca dejó de alentarme, siempre avanzamos juntos y nunca voy a olvidar el apoyo incondicional que me dio durante casi 6 años.

**Ana Maricel Herrera
Huard**

Le agradezco por ser esa hermana pequeña que nunca tuve, por ayudarme a ver las cosas claras y apoyarme en toda mi vida universitaria, una persona especial que siempre fue objetiva conmigo y me proporcionó un gran apoyo durante este trabajo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la institución que me brindó los estudios y conocimientos para poder formarme como profesional, por brindarme las herramientas y experiencias para poder contribuir por el desarrollo de Guatemala.

Facultad de Ingeniería

Por ser el centro de enseñanza que me brindó el conocimiento y las herramientas para formarme como ingeniero.

**Asesor Ing. Jorge Mario
Estrada Asturias**

Por su ayuda, su tiempo, paciencia y conocimientos para llevar a cabo este trabajo de investigación.

**Laboratorio Unificado de
Química y Microbiología
Sanitaria “Doctora Alba
Tabarini Molina”, de la
Facultad de Ingeniería de
la Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme las instalaciones, el equipo y su apoyo para la realización de la parte experimental de este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Aguas residuales	7
2.1.1. Definición.....	7
2.1.2. Aguas residuales industriales	8
2.2. Tratamientos de aguas residuales.....	12
2.3. Aspectos legales	15
2.4. Sólidos en agua.....	15
2.4.1. Sólidos totales	16
2.4.2. Sólidos disueltos.....	16
2.4.3. Sólidos suspendidos.....	16
2.4.4. Sólidos volátiles y sólidos fijos.....	17
2.4.5. Sólidos sedimentables.....	18
2.5. Coagulación.....	18
2.5.1. Mecanismos básicos del proceso de coagulación..	18
2.5.2. Factores que influyen en el proceso de coagulación.....	19

2.5.3.	pH óptimo para la coagulación	23
2.6.	Dosificación de coagulante	24
2.7.	Dosificación de coagulante en función de turbiedad y pH.....	26
3.	MARCO METODOLÓGICO	27
3.1.	Localización	27
3.2.	Variables.....	27
3.2.1.	Variables Independientes	27
3.2.2.	Variables dependientes	27
3.3.	Delimitación del campo de estudio.....	28
3.4.	Recursos humanos disponibles	28
3.5.	Recursos materiales disponibles.....	29
3.5.1.	Equipo	29
3.6.	Técnica cuantitativa de la investigación	30
3.6.1.	Instrumentos de medición de turbidez.....	31
3.6.2.	Sólidos en suspensión	33
3.6.3.	Diseño experimental.....	34
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información.....	36
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	44
3.9.	Análisis estadístico.....	49
3.10.	Plan de análisis de los resultados	50
3.10.1.	Métodos y modelos de los datos	50
3.10.2.	Programas por utilizar para el análisis de datos.....	50
4.	RESULTADOS.....	51
4.1.	Límite máximo permisible según el Acuerdo Gubernativo 236-2006.....	51

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	69
APÉNDICES	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comportamiento de la turbiedad en función de la dosis del sulfato de aluminio.....	52
2.	Comportamiento de los sólidos suspendidos en función de la dosis del sulfato de aluminio.....	53
3.	Comportamiento de la turbiedad en función del pH del sulfato de aluminio.....	54
4.	Comportamiento de los sólidos suspendidos en función del pH del sulfato de aluminio.....	55
5.	Comportamiento de la turbiedad en función del rango de pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio.	56
6.	Comportamiento de los sólidos suspendidos en función del rango de pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio.	57
7.	Comportamiento de la turbiedad en función del pH para el sulfato ferroso.....	58
8.	Comportamiento de los sólidos suspendidos en función del pH para el sulfato ferroso.....	59

TABLAS

I.	Clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales.....	14
II.	pH óptimo de coagulación.....	24

III.	Dosificación de combinaciones de coagulantes	25
IV.	Unidades del turbidímetro	32
V.	Diseño de tratamientos.....	34
VI.	Determinación de la dosis óptima del coagulante 1	36
VII.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1	37
VIII.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1	38
IX.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1	39
X.	Determinación de la dosis óptima del coagulante 2	40
XI.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 2	41
XII.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 2	42
XIII.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 2	43
XIV.	Determinación de la dosis óptima del coagulante 1	44
XV.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1	45
XVI.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1	46
XVII.	Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1	47
XVIII.	Determinación de la dosis óptima del coagulante 2	48
XIX.	Criterio de comparación del valor de F de Fisher y la F crítica.....	49
XX.	Determinación del pH óptimo de coagulación en función de los sólidos suspendidos y la turbiedad de los coagulantes	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
°C	Grados Celsius
LMP	Límite máximo permisible
mg/L	Miligramos por litro
mL	Milímetro
Min	Minutos
pH	Potencial de hidrógeno
rpm	Revoluciones por minuto
NTU	Unidades nefelométricas de turbiedad
SS	Sólidos suspendidos (mg/L)
Pf_o	Peso de filtro inicial (g)
Pf_f	Peso de filtro final (g)
V	Volumen (mL)

GLOSARIO

Aguas residuales	Las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias.
Coagulación	Consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus cargas, dando lugar a la formación de un floculo o precipitado.
Coágulos	Partículas aglutinadas con peso específico superior al agua y poca masa.
Coloides	Partículas que son grandes en la escala molecular, pero lo bastante pequeñas como para permanecer suspendidas indefinidamente en un sistema de disolvente.
Cuerpo receptor	Río, lago, laguna, embalse natural, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, aguas costeras, pantano y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.
Floculación	Proceso físico de mezcla rápida y lenta, por medio del cual se incrementa la posibilidad de choque entre partículas y por consiguiente la formación del floculó.

Flóculos	Masa formada por la acumulación de partículas suspendidas. Puede ocurrir de forma natural, pero es usualmente inducido en orden de ser capaz de eliminar ciertas partículas del agua residual.
Parámetro	Variable que indica una característica de las aguas residuales, aguas de reúso, lodos, asignándole un valor numérico.
Sólidos en agua	Incluye toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos.
Sólidos suspendidos	Constituyen la diferencia entre los sólidos totales de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada.
Sulfato de aluminio	Se le conoce también como alumbre. Es el coagulante estándar usado en tratamiento de aguas. El producto comercial tiene usualmente la fórmula $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O)$, con masa molecular de 600.
Sulfato ferroso	Coagulante utilizado en el tratamiento de aguas, su fórmula es $(FeSO_4 \cdot 7H_2O)$, se empaca como cristales o granos verdes fácilmente solubles en agua.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo determinar el pH óptimo de coagulación para el tratamiento de aguas residuales de una industria de alimentos. Las pruebas se llevaron a cabo con aguas residuales provenientes de la industria de alimentos de harina de trigo ubicada en el Municipio de Santa Catalina Pinula, departamento de Guatemala. Dicho análisis se realizó por medio del ensayo de la prueba de jarras, una herramienta muy apreciable para medir la evaluación y caracterización de la eficiencia de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. Los resultados obtenidos permitieron determinar el pH óptimo de coagulación de los dos compuestos y cuál compuesto cumple con el acuerdo gubernativo 236-2006, en un rango de sólidos suspendidos menores a 100 mg/L y un rango de pH de 6-9, logrando minimizar los costos de la industria.

Los coagulantes evaluados son representativos de los productos más eficientes y utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Se desarrolló un análisis comparativo usando como referencia la turbidez para establecer el pH óptimo y reducir la mayor cantidad de sólidos suspendidos, en función de la concentración. Este análisis se realizó a diferente dosis del coagulante y manipulando el pH por medio del óxido de calcio (CaO).

Luego de realizar las pruebas de jarras con su dosis respectiva, se realizó un análisis de turbiedad y sólidos suspendidos, en ella se determinó que el pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio es el 6.6 en la cual se obtuvo una turbiedad de 25,6 NTU y una concentración de sólidos suspendidos de 28 miligramos por litro (mg/L) el cual cumple, según el acuerdo gubernativo

236-2006. En cambio, el coagulante sulfato ferroso no generó un cambio significativo en la turbiedad y en los sólidos suspendidos de las aguas residuales provenientes de una industria de alimentos de galletas, este resultado evidencia que se incumple con el acuerdo gubernativo 236-2006.

OBJETIVOS

General

Determinar el pH óptimo de coagulación, mediante los coagulantes sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y sulfato ferroso (FeSO_4) de las aguas residuales en una industria de alimentos.

Específicos

1. Medir la carga de sólidos suspendidos y la turbiedad del agua para determinar la calidad del agua residual obtenida.
2. Realizar pruebas con diferentes coagulantes y a diferentes pH al agua residual de la industria alimenticia y comparar con los límites máximos permisibles según el acuerdo gubernativo 236-2006, en un rango de pH de 6-9.
3. Establecer cuál es el pH óptimo para cada coagulante en función de sólidos suspendidos y turbiedad.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

Es posible determinar el pH de coagulación óptima para el tratamiento de aguas residuales en una industria de alimentos, que cumpla con los límites máximos permisibles según el acuerdo gubernativo 236-2006.

Hipótesis de estadística

- Hipótesis nula (h_0): la carga de sólidos y la turbiedad del agua no tiene un efecto significativo en la calidad del agua residual.
- Hipótesis alterna (h_1): la carga de sólidos y la turbiedad del agua tiene un efecto significativo en la calidad del agua residual.
- Hipótesis nula (h_0): las pruebas con diferentes coagulantes y diferentes pH no tienen un efecto significativo sobre el agua residual.
- Hipótesis alterna (h_1): las pruebas con diferentes coagulantes y diferentes pH tienen un efecto significativo sobre el agua residual.
- Hipótesis nula (h_0): el pH de las aguas residuales no tiene un efecto significativo en el uso de coagulantes para su tratamiento.
- Hipótesis alterna (h_1): el pH de las aguas residuales tiene un efecto significativo en el uso de coagulantes para su tratamiento.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las aguas residuales están altamente contaminadas. Las industrias son las fuentes de contaminación principales, por el mal o nulo tratamiento de aguas residuales. Existen diversas formas de tratar este problema, por ejemplo, una filtración para la materia flotante, sedimentación para los sólidos suspendidos, entre otros.¹

La contaminación de los mantos acuíferos del país por el mal tratamiento de las aguas residuales daña los recursos naturales, causa enfermedades a la población que utiliza los mantos acuíferos, limita el uso de estos últimos y reduce la calidad del agua.

En el año 2006, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales emitió el acuerdo gubernativo, 236-2006: “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”. En él se establecen los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reuso de aguas residuales y los mecanismos de evaluación, control y seguimiento para que el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales promueva la conservación y mejoramiento de los recursos hídricos.

En el tratamiento de agua mediante diferentes coagulantes se necesita determinar el pH óptimo del agua para disminuir los efectos de la contaminación de los mantos acuíferos y cumplir con el acuerdo gubernativo. Al mismo tiempo

¹ GONZÁLEZ, Luis. *Evaluación a nivel laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales proveniente de la producción de aceites y grasas comestibles*. p.5.

se procura la optimización de los costos y procesos de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales, por lo que la investigación será un aporte de eficiencia a la industria.

La caracterización consistió en determinar la calidad del agua residual mediante la carga de sólidos y su turbiedad. Luego, se realizó unas pruebas a escala laboratorio con el uso de dos coagulantes, que son el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y el sulfato ferroso (FeSO_4), a diferentes pH al agua residual de la industria alimenticia y compararlos con los límites máximos permisibles, según el acuerdo gubernativo 236-2006, que establece el pH óptimo para cada coagulante en función de sólidos suspendidos y turbiedad.

1. ANTECEDENTES

Se han realizado diversos estudios relacionados con el uso de coagulantes para el tratamiento de aguas residuales alrededor del mundo debido a la importancia que tienen. Entre ellos están los siguientes.

El trabajo de graduación de postgrado en educación en ciencias naturales con orientación en la enseñanza de la química de la Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán de José Nahum Díaz Claros, realizado en el 2014, titulado *Coagulantes-floculantes orgánicas e inorgánicas elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas*. Propone un programa de reciclaje factible y rentable de los principales contaminantes para convertirlos en descontaminantes que beneficien el entorno y mejoren la calidad de vida. Para ello, se recicla la chatarra metálica y se usan algunas plantas para obtener coagulantes y floculantes baratos, de fácil preparación y útiles para descontaminar aguas negras, de consumo humano e industriales de desechos textiles.

El trabajo de graduación de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de Luis Antonio Aldana Massella, en el 2014, *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*, se basó en el ensayo de la prueba de jarras, para analizar por medio de curvas, el tiempo de reacción y comparó los compuestos que reducen la mayor cantidad de sólidos suspendidos. El más eficiente fue el sulfato de aluminio con un 89,23 % de remoción de sólidos suspendidos en aguas residuales de tipo ordinario.

Luis Fernando González Serrano presentó su trabajo de graduación de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en 2011, *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*. En él evaluó la capacidad del sulfato de aluminio y el cloruro férrico para disminuir la demanda química (DQO) y bioquímica (DBO) de oxígeno, a tres concentraciones diferentes, variando tiempo y velocidad de agitación. El efluente tratado con el coagulante sulfato de aluminio presenta la menor demanda química y bioquímica de oxígeno, así como el mayor porcentaje de reducción de estos dos parámetros.

Véliz Lorenzo, Llanes Ocaña, Fernández García y Bataller Venta, del Centro de Investigaciones del Ozono, Ciudad de la Habana, Cuba y en la Universidad Autónoma de Sinaloa, Ciudad de Culiacán, México, presentaron en 2010 el artículo “Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales”. En él informan que evaluaron, a escala de laboratorio, la eficiencia de dos procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, coagulación-floculación y ozonización (cada uno por separada y con la combinación de ambos) para obtener aguas con características fisicoquímicas y microbiológicas, que permitan su vertimiento seguro o su reúso. Se evaluó la eficiencia de cada proceso para la turbiedad, los sólidos suspendidos totales, el color, los compuestos orgánicos medidos a 254 nm, la demanda química de oxígeno, el pH y el oxígeno disuelto. El esquema más eficiente fue el de la coagulación-floculación con una posterior ozonización, con remociones de contaminantes fisicoquímicos y de coliformes fecales superiores al 90 y 99,99 % respectivamente.

Mariana Romero-Aguilar, Arturo Colín.Cruz, Enrique Sánchez-Salinas y Laura Ortiz-Hernández, del Centro de Investigación en Biotecnología de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México, realizado en 2009 publicaron el artículo “Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica”. En él indican que se evaluó el porcentaje de remoción de la carga orgánica de aguas residuales, en un sistema de tratamiento por humedales artificiales de flujo horizontal y con dos especies vegetales. La carga orgánica del sistema se comportó de la siguiente manera: la DQO presentó una mayor remoción durante temporada de estiaje de 95,73 % en comparación con la temporada de lluvias con el 90,2 %.

Miriam Ninneth Pellecer Valle, en 2008 presentó el trabajo de graduación de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar *Comparación entre sulfato de aluminio y sulfato de hierro utilizados como coagulantes químicos para reducir el parámetro de sólidos suspendidos en aguas residuales generadas por actividades domésticas*. Comparó el sulfato de aluminio y el sulfato ferroso utilizados como coagulantes. Para ello, realizó pruebas con aguas residuales provenientes de la colonia Colinas de Monte María Sur ubicada en el municipio de Villa Nueva. El coagulante con mayor reducción del porcentaje de sólidos suspendidos fue el sulfato de aluminio en un rango de pH entre 4-5 y una concentración de 40 mg/L.

Manfred Alberto Melgar Padilla, de la facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Rafael Landívar, en el 2007 presentó su trabajo de graduación *Evaluación a nivel de laboratorio de coagulantes-floculantes como alternativas para eliminar los sólidos en suspensión de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café*. Se evaluó a nivel de laboratorio, 5 floculantes-coagulantes para reducir la cantidad de sólidos en suspensión, de las aguas residuales del

beneficiado húmedo del café para encontrar la alternativa más funcional y económicamente. El coagulante-floculante que más redujo la carga contaminante (DQO) fue el sulfato de aluminio a un rango de pH de 5,1-6,0. Para la acidez el coagulante-floculante con mejores resultados fue la cal hidratada en un rango de pH de 6,1-8,0. Para la turbidez el coagulante-floculante con mejores resultados fue el polímero CH 406 a un rango de pH de 3,5-5,0. El coagulante-floculante con menor costo comparado con el resto fue la cal hidratada.

Ana Lucía Funes López, de la carrera de Ingeniería Química Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar, en 2007 presentó su trabajo de graduación *Clarificación del agua residual del área de pintura base látex de una fabricación de pinturas mediante coagulación, floculación y filtración*. En él propuso el método de floculación, coagulación y filtración para la clarificación del agua residual proveniente del área de producción de pinturas base látex. Sugiere el uso de un químico coagulante-floculante que, al aplicarlo al agua forma flóculos de precipitación de buena sedimentación con mayor rapidez y perfección. El proceso demostró la eficiencia del método propuesto y la factibilidad técnica de él para su implementación a mayor escala.

Vargas Camareno y Romero Esquivel, en Costa Rica, en 2006 escribieron el artículo "Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica". Refieren que el tratamiento de aguas, tanto potables como residuales, se basa en un tratamiento químico a base de coagulantes y floculantes. Entre los químicos utilizados están el sulfato de aluminio y otros polímeros industriales. El Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), a través del Centro de Investigación en Protección Ambiental, pretende encontrar materiales alternativos y de bajo costo para utilizarlos como coagulantes y floculantes.

El trabajo de graduación *Investigación de la polimerización del dimetil-dialil-cloruro de amonio y su utilización como coagulante en el tratamiento de aguas* de Melvin José Recinos Enríquez, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar, publicado en 2002 investigó el proceso de polimerización por radicales libres del dimetil-dialil-cloruro de amonio para obtener el poli-dimetil-dialil-cloruro de amonio para ser usado como coagulante/floculante auxiliar al sulfato de aluminio en el tratamiento de aguas. Concluyó que, al usarlo como coagulante auxiliar, reduce la cantidad de sulfato de aluminio utilizado, hasta un 40 %, lo que se traduce a una reducción de costos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas que proceden de viviendas, poblaciones o zonas industriales y arrastra suciedad y detritos.

2.1.1. Definición

“Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias”.²

“Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual”.³

Así, de acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como:

² BLAZQUEZ, Pamela y MONTERO, Cecilia. *Reutilización de agua en Bahía Blanca Plata 3ra. Cuenca*. p.6.

³ *Ibíd.*

- Domésticas: se utilizan con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.
- Industriales: son líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria.
- Infiltración y caudal adicionales: las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza, etc. Hay también aguas pluviales, que son descargadas por medio de varias fuentes, como canales, drenajes y colectores de aguas de lluvias.
- Pluviales: son agua de lluvia, que descargan grandes cantidades de agua sobre el suelo. Parte de esta agua es drenada y otro escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo.⁴

2.1.2. Aguas residuales industriales

Proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice agua. Presentan características muy distintas de las aguas residuales urbanas. Su caudal y composición es variable, sus características difieren de una industria a otra y en un mismo tipo de industria.

⁴ BLAZQUEZ, Pamela y MONTERO, Cecilia. *Reutilización de agua en Bahía Blanca Plata 3ra. Cuenca*. p.6.

A veces, las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas del año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día.

Están más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar. Su alta carga unida a la enorme variabilidad que presentan hace que el tratamiento de las aguas residuales sea complicado. Por esta razón, si no se profundiza el amplio mundo del conocimiento de las aguas residuales industriales, es posible equivocarse por generalización o extrapolación al aplicar técnicas que se destinadas a las aguas residuales urbanas. Por esta razón es necesario un estudio específico en cada caso.

Para conocer las aguas residuales de una industria determinada se deben abordar los problemas complejos que presenta el uso del agua dentro de ella. De esta forma, los problemas de polución y su tratamiento se abordarán después de conocer profundamente la problemática específica. No existe un procedimiento universal de depuración.

Se debe conocer la distribución del agua dentro de las líneas de fabricación y su consumo. Se deben obtener gráficas que indiquen los caudales máximos y mínimos utilizados, y relacionarlos con la fabricación, el personal, la hora del día o de la noche, ya que en la calidad de las aguas residuales influyen estos factores.

De acuerdo con lo anterior, nunca se podrá expresar la carga contaminante de un agua residual de una determinada industria por medio de una muestra media, ya que deben conocerse las concentraciones máximas y

mínimas de los contaminantes que influyen en el funcionamiento correcto de la estación de tratamiento y la frecuencia de los valores significativos.

La complejidad de las aguas residuales imposibilita su inclusión en una misma clasificación, por muy complicada que sea, ya que existen tantas aguas residuales industriales, como industrias. Por esto, se han propuestos muchas clasificaciones, pero ninguna se ha aceptado totalmente. La más recurrente se refiere a la clase de industria las originó y las agrupa por su composición cualitativa más probable.

De acuerdo con la posibilidad de biodegradación de la materia orgánica presente, se pueden distinguir tres clases de aguas:

- Aguas residuales industriales que contienen materia orgánica.
 - Con aporte de nitrógeno y fósforo.
 - Sin aporte de nitrógeno y fósforo.

- Aguas residuales industriales que solo contienen minerales.
 - Con sustancias tóxicas.
 - Sin sustancias tóxicas.

Aguas residuales mixtas: tiene en cuenta el grado de nocividad de determinadas sustancias contaminantes en relación con los organismos vivos presentes en el seno del agua.

- Aguas residuales industriales cuyas sustancias químicas contaminantes no interfieran la vida en el agua.

- Aguas residuales industriales cuyas sustancias contaminantes son nocivas para la vida en el agua.
- Aguas residuales industriales que tienen en su seno alguna sustancia tóxica que pueda entorpecer o ralentizar la vida en el agua.

Esta clasificación es muy relativa, implica tener en cuenta los conceptos de concentración y dilución, entre otros. La palabra concentración expresa la cantidad de sustancias disueltas en un volumen determinado de disolvente. Es un concepto relativo de nocividad de las sustancias orgánicas, porque se debe medir para tener una referencia. En este caso la concentración expresará la medida de las sustancias disueltas contenidas en la unidad de volumen o peso de la disolución o del disolvente.

El conocer esta concentración ha sido la preocupación de muchos investigadores. Una vez conocida ésta es posible optimizar el tratamiento biológico de aguas residuales en presencia de tóxicos más o menos energéticos para los microorganismos, tanto que su dosis letal medio (DL50 es la concentración de tóxico tal que al cabo de cierto tiempo, generalmente 24 horas, han muerto del 50 % de los organismos objeto de experimentación), como en su dosis mínima mortal (dosis mínima de tóxico que provoca, al menos, la muerte aparente de determinada clase de organismos en el tiempo de duración de la experiencia).

Es complicado encontrar estas concentraciones porque se encuentra con una variedad grande de organismos y por las interacciones sinérgicas y antagónicas que pueden ejercer las diversas sustancias presentes en las aguas.

La dilución consiste en mezclar las aguas residuales con aguas limpias para reducir la concentración de los tóxicos por debajo de sus valores nocivos en un tiempo determinado, sobre los organismos que se consideran.

En esto se funda la evacuación de aguas residuales por dilución. Esta operación consiste en verter las aguas residuales, sin tratar, o tratadas de diverso grado, sobre cauces de agua sin polucionar. Esta práctica era frecuente en poblaciones donde el volumen de aguas residuales era escaso. En la actualidad solo se realiza excepcionalmente, aun siendo el coeficiente de dilución mayor 1:6 que es lo que se considera suficiente en aguas negras. En general, incluso con aguas residuales urbanas depuradas, hay que contemplar el efecto de dilución al verterlas al cauce receptor.⁵

2.2. Tratamientos de aguas residuales

El tratamiento adecuado de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria.⁶

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende de los límites de vertido para el efluente. La tabla I presenta una clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales.

⁵ FÉLEZ, Marta. *Situación actual del estado de depuración biológica. Explicación de los métodos y sus fundamentos.* p.20.

⁶ FERNÁNDEZ, Antonio, y otros. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.* p.6.

El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, bien directamente o pasando por una neutralización u homogeneización. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales. El objetivo del tratamiento terciario es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales.⁷

⁷ RAMALHO, R.S. *Tratamiento de aguas residuales*. p.26.

Tabla I. **Clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales**

Tratamiento Primario
<ul style="list-style-type: none"> • Cribado o desbrozo. • Sedimentación. • Flotación. • Homogeneización. • Neutralización.
Tratamiento Secundario
<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activos. • Aireación prolongada (procesos de oxidación total). • Estabilización por contacto. • Otras modificaciones del sistema convencional de lodos activos: aireación. • Por fases, mezcla completa, aireación descendente, alta carga, aireación con oxígeno puro. • Lagunaje. • Tratamientos anaerobios: procesos de contacto, filtros (sumergidos).
Tratamiento Terciario
<ul style="list-style-type: none"> • Microtamizado. • Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas...). • Precipitación y coagulación. • Adsorción (carbón activado). • Intercambio iónico. • Electrodialisis, cloración y ozonización, procesos de reducción de nutrientes.

Fuente: RAMALHO, R.S. *Tratamiento de aguas residuales*. p.26.

2.3. Aspectos legales

En Guatemala, entró en vigencia el Acuerdo Gubernativo 236-2006: Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos de la Presidencia Constitucional de la República de Guatemala en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Este acuerdo establece los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales y disposición de lodos en cuerpos receptores. También establece los mecanismos de evaluación, control y seguimiento para promover la conservación y mejoramiento del recurso hídrico.⁸

2.4. Sólidos en agua

Incluye toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos. Es necesario medir la cantidad del material sólido contenido en una gran variedad de sustancias líquidas y semilíquidas que van desde aguas potables hasta aguas contaminadas, aguas residuales, residuos industriales y lodos producidos en los procesos de tratamiento.

En aguas potables, la determinación de sólidos totales es la de mayor interés, por ser muy pequeña la cantidad existente de sólidos suspendidos. En aguas residuales la determinación de sólidos totales es ordinariamente de poco valor ya que es difícil interpretar su significado en forma real y exacta.

La determinación de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles es importante para evaluar la concentración o fuerza de aguas residuales ya para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento. En

⁸ Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales*. p.9.

plantas de lodos activados, estas determinaciones se usan para controlar el proceso y como factores de diseño de unidades de tratamiento biológico secundario.

La determinación de sólidos sedimentables es básica para establecer la necesidad del diseño de tanque de sedimentación como unidades de tratamiento y para controlar su eficiencia.

2.4.1. Sólidos totales

Se define como sólidos la materia que permanece como residuo después de evaporación y secada a 376 grados Kelvin (103 °C). El valor de los sólidos totales incluye materia disuelta y no disuelta (sólidos suspendidos).

2.4.2. Sólidos disueltos

Representan el material soluble y coloidal, el cual requiere usualmente, para su remoción, oxidación biológica o coagulación y sedimentación. En la práctica los sólidos disueltos son aquellos con tamaño menor de 1.2 micrómetros (μm).

2.4.3. Sólidos suspendidos

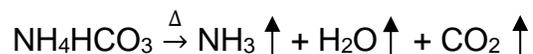
A este tipo de sólidos también se les llama no disueltos. Constituyen la diferencia entre los sólidos totales de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada. Los sólidos suspendidos tienen tamaño mayor de 1.2 micrómetros (μm).

2.4.4. Sólidos volátiles y sólidos fijos

En aguas residuales y lodos, esta determinación se realiza para obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. El procedimiento estándar es el de someter las cápsulas, con el residuo retenido después de complementar el ensayo para sólidos totales, o el crisol Gooch, después de completar el ensayo para sólidos suspendidos, a calcinamiento en una mufla, a una temperatura de 823 ± 323 K (550 ± 50 °C) grados Kelvin, durante 15 a 20 minutos. La pérdida de peso se registra como miligramos por litro mg/L de sólidos volátiles y el residuo como miligramos litro mg/L de sólidos fijos.

El contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica. Se tiene en cuenta que a 550 ± 50 grados centígrados la materia orgánica se oxida a una velocidad razonable formando CO_2 y H_2O que se volatilizan. Sin embargo, la interpretación no es exacta puesto que la pérdida de peso incluye también pérdidas debidas a descomposición o volatilización de ciertas sales minerales.

Compuestos de amonio, como el bicarbonato de amonio se volatilizan completamente durante la calcinación:



Otros como el carbonato de magnesio no son estables, a 350 grados centígrados, ocurre lo siguiente:



2.4.5. Sólidos sedimentables

La denominación se aplica a los sólidos en suspensión que se sedimentarán, bajo condiciones tranquilas, por acción de la gravedad. La determinación se hace llenando un cono Imhoff de 1 litro de volumen y registrando el volumen de material sedimentado en el cono, al cabo de una hora, en miligramos por litro (mg/L).⁹

2.5. Coagulación

La coagulación consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus cargas, dando lugar a la formación de un floculo o precipitado. La coagulación de las partículas coloidales se consigue añadiéndole al agua un producto químico (electrolito) llamado coagulante. Normalmente se utilizan las sales de hierro y aluminio.

2.5.1. Mecanismos básicos del proceso de coagulación

- Neutralización de la carga del coloide: el electrolito al solubilizarse en agua libera iones positivos con la suficiente densidad de carga para atraer a las partículas coloidales y neutralizar su carga. Se ha observado que el efecto aumenta marcadamente con el número de cargas del ion coagulante. Así pues, para materias coloidales con cargas negativas, los iones Ba y Mg, bivalentes, son en primera aproximación 30 veces más efectivos que el Na, monovalente; y, a su vez, el Fe y Al, trivalentes, unas 30 veces superiores a los divalentes. Para los coloides con cargas positivas, la misma relación

⁹ ALDANA, Luis. *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*. p.10.

aproximada existe entre el ion cloruro, Cl^- , monovalente, el sulfato, $(\text{SO}_4)^{-2}$, divalente, y el fosfato, $(\text{PO}_4)^{-3}$, trivalente.

- Inmersión en un precipitado o floculo de barrido: los coagulantes forman en el agua ciertos productos de baja solubilidad que precipitan. Las partículas coloidales sirven como núcleo de precipitación quedando inmersas dentro del precipitado.

2.5.2. Factores que influyen en el proceso de coagulación

- El pH es un factor crítico en el proceso de coagulación. Siempre hay un intervalo de pH en el que un coagulante específico trabaja mejor, que coincide con el mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado. Siempre que sea posible, la coagulación se debe efectuar dentro de esta zona óptima de pH, ya que de lo contrario se podría dar un desperdicio de productos químicos y un descenso del rendimiento de la planta.

Si el pH del agua no fuera el adecuado, se puede modificar mediante el uso de coadyuvantes o ayudantes de la coagulación, entre los que se encuentran:

- Cal viva.
- Carbonato sódico.
- Sosa Cáustica.
- Agitación rápida de la mezcla

Para que la coagulación sea óptima, es necesario que la neutralización de los coloides sea total antes de que comience a formarse el flóculo o precipitado. Por lo tanto, al ser la neutralización de los coloides el objetivo de principal la introducción del coagulante, es necesario que el reactivo empleado se difunda con la mayor rapidez posible, ya que el tiempo de coagulación es muy corto.

- Tipo y cantidad de coagulante: los coagulantes principalmente utilizados son las sales de aluminio y de hierro. Las reacciones de precipitación que tienen lugar con cada coagulante son las siguientes.¹⁰
 - Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$): puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo. Su fórmula teórica es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$.

Su concentración se define por su contenido en alúmina, expresada en Al_2O_3 , es decir, 17 % aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de 1,000 kg/m³.

El contenido en alúmina Al_2O_3 de la forma líquida fluctúa generalmente entre 8 y 8,5 %; es decir, 48 a 49 % en equivalente polvo o también 630 a 650 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ por litro de solución acuosa.

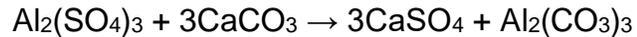
El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH varía entre 2 y 3,8, según la relación molar sulfato/alúmina. Por esta razón, su almacenamiento debe hacerse en un lugar seco, libre de humedad.

Es necesario tener en cuenta esta tendencia ácida para la preparación de las soluciones y los empaques para su distribución, y emplear, por lo general, materiales de plástico.

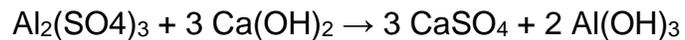
¹⁰ GONZÁLEZ, Luis. *Evaluación a nivel laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales proveniente de la producción de aceites y grasas comestibles*. p.9.

Principales reacciones del sulfato de aluminio con la alcalinidad:

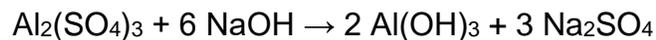
- Sulfato de aluminio (líquido o sólido):



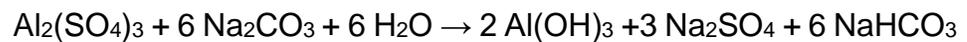
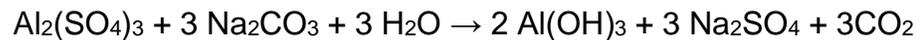
- Sulfato de aluminio + cal:



- Sulfato de aluminio + soda cáustica:



- Sulfato de aluminio + carbonato sódico:



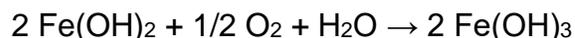
- Sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): el sulfato ferroso usado en el tratamiento de agua es un polvo de color verde muy soluble y tiene una masa volumétrica aparente próxima a 900 kg/m^3 . Su contenido en hierro es de aproximadamente 19 %. Por su naturaleza ácida, el pH de una solución 10 % es de 2,8 aproximadamente. Por esta razón, para su almacenamiento y preparación se usa material plástico.

Reacciones del sulfato ferroso:

- Con la alcalinidad del agua



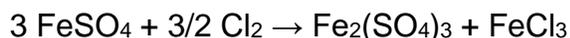
En aguas aereadas, el hidróxido ferroso formado se oxida a hidróxido férrico:



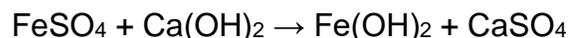
- Reacción con el cloro



Si se usan sulfato ferroso y cloro para el tratamiento del agua, pueden dosificarse por separado o bien oxidarse previamente la solución de sulfato ferroso con cloro. Se obtiene entonces una mezcla de sulfato y cloruro férrico, a la que se conoce comercialmente con el nombre de cloro-sulfato férrico, según la reacción:



- Reacción con la cal



- Interacción de los coagulantes inorgánicos con el agua y la alcalinidad: dado que los coagulantes químicos usados en el tratamiento del agua tienen naturaleza ácida, debido a su origen (sales producto de la neutralización de un ácido fuerte con una base débil), es necesario repasar los conceptos de ácidos bases y alcalinidad, para luego aplicarlos al comportamiento de las soluciones de los coagulantes inorgánicos.¹¹

¹¹ BARRENECHEA, Ada. *Coagulación: tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. p.174.

2.5.3. pH óptimo para la coagulación

El valor de pH es uno de los factores de mayor importancia y efecto sobre el proceso de coagulación, este parámetro afecta la solubilidad de los precipitados formados por el hierro y el aluminio, así como el tiempo requerido para la formación del floculo y la carga sobre las partículas coloides.

En las curvas de solubilidad para los hidróxidos férricos y de aluminio, se observa que a pH menor de 3.5 los hidroxilos (OH^-) son insuficientes para precipitar el Fe^{+3} completamente. Por la misma razón, es necesario tener una alcalinidad durante la coagulación química. También debe notarse que la solubilidad del $\text{Al}(\text{OH})_3$ aumenta a pH mayor de 7, esto se debe a la formación del ion aluminado a pH alto, o sea, las propiedades anfóteras del $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Los hidróxidos metálicos, como el hidróxido ferroso son solubles en ácido, pero no en base; por lo contrario, los hidróxidos no metálicos son solubles en base, pero no en ácidos. Sin embargo, ciertos hidróxidos como los de aluminio, zinc, azufre y cromo entre otros, son solubles tanto en ácido como en bases. Estos hidróxidos son conocidos como anfóteros. El pH óptimo de los coagulantes metálicos, en general, son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla II. **pH óptimo de coagulación**

COAGULANTE	pH
Alumbre	4-7
Sulfato ferroso	>8,5
Sulfato ferroso y cloro	3,5-6,5 y >8,5
Cloruro férrico	3,5-6,5 y >8,5
Sulfato férrico	3,5-7,0 y >9,0

Fuente: ALDANA, Luis. *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.* p.15

2.6. Dosificación de coagulante

Los coagulantes metálicos como sulfato de aluminio y sales de hierro, han sido los más empleados en la clarificación del agua. Estos productos actúan como coagulantes floculantes a la vez. Añadidos al agua forman especies cargadas positivamente en el intervalo de pH típico para la clarificación que va entre 6 y 7. Esta reacción produce aluminio gelatinoso insoluble o hidróxido férrico.

Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH. Si el pH no está dentro del rango adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro o el aluminio. Cuanto menor sea la dosis de coagulante, tanto mayor será la sensibilidad del flóculo a cambios en el pH. Las combinaciones de coagulantes más usadas en el tratamiento de aguas crudas se muestran en la tabla III.¹²

¹² ALDANA, Luis. *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.* p.17.

Tabla III. **Dosificación de combinaciones de coagulantes**

COAGULANTES	DOSIFICACIÓN TÍPICA RELACIÓN DE 1º. AL 2º.
Sulfato de aluminio + Sosa cáustica	3/1
Sulfato de aluminio + Carbonato de calcio	3/1
Sulfato de aluminio + Carbonato de sodio	1/1-2/1
Sulfato de aluminio + Aluminato de sodio	4/3
Sulfato férrico + Carbonato de calcio	5/2
Sulfato ferroso + Carbonato de calcio	4/1
Sulfato ferroso + Cloro	8/1
Aluminato de sodio + Cloruro férrico	1/1
Sulfato de aluminio + Sílice activada	9/1-14/1

Fuente: ALDANA, Luis. *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.* p.18.

2.7. Dosificación de coagulante en función de turbiedad y pH

Los coagulantes metálicos (alumbre): $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ y sales de hierro, han sido los más empleados en la clarificación del agua. Estos productos actúan como coagulantes.

Añadidos al agua forman especies cargadas positivamente en el intervalo de pH típico para la clarificación que va entre 6 y 7. Esta reacción produce aluminio gelatinoso insoluble o hidróxido férrico. Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del rango adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro o el aluminio. Cuanto menor sea la dosis de coagulante, tanto mayor será la sensibilidad del floculo a cambios en el pH.¹³

¹³ ALDANA, Luis. *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*. p.19.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Localización

La parte experimental de la investigación se realizó en la Universidad de San Carlos de Guatemala; específicamente en el siguiente laboratorio:

- Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Tabarini Molina”, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

3.2. Variables

Se determinaron cuáles eran las variables que afectan en la parte experimental de la investigación.

3.2.1. Variables Independientes

- Sistema de aplicación del coagulante
- Concentración del coagulante
- Dosis de floculante

3.2.2. Variables dependientes

- pH
- Temperatura
- Tiempo de mezclado

- Tiempo de sedimentación

3.3. Delimitación del campo de estudio

En este trabajo de investigación se analizó las aguas residuales procedentes de una industria de alimentos de harina de trigo, que se ubica en el municipio de Santa Catalina Pínula, departamento de Guatemala. Para desarrollar la investigación se tomó información de varias fuentes, como libros de texto, artículos publicados en internet, tablas de datos, normas gubernativas, artículos publicados en revistas y documentos emitidos por entidades gubernamentales y no gubernamentales guatemaltecas. Se tomaron datos referenciales y comparativos del Acuerdo Gubernativo 236-2006 Reglamento de la Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos publicado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en el 2006.

Este documento tiene por objeto regular la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores de agua, estableciendo los límites máximos admisibles de los parámetros más importantes, así como una proyección de dichos parámetros para los años 2020 y 2024. Este trabajo de investigación se ha regido por los parámetros de comparación allí establecidos, *Perfil ambiental de Guatemala* publicado en el 2004, por el Instituto de Incidencia Ambiental y el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y ambiente; es un informe sobre el estado del ambiente y bases para su evaluación sistemática.

3.4. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Rony Estuardo Vielman Ramírez.
- Asesor: Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias.

3.5. Recursos materiales disponibles

Para la toma de muestras y el ensayo de jarras se utilizó cristalería equipo de laboratorio calificado para obtener resultados satisfactorios.

3.5.1. Equipo

- Hielera con hielo para conservar la muestra
- Recipiente de polietileno para transportar la muestra
- Balón aforado 100 mL
- Papel filtro
- Papel medidor de pH
- Papel parafinado
- Varilla de vidrio para agitación
- Turbidímetro
- Agitador para la prueba de jarras
- Potenciómetro
- Balanza analítica
- Termómetro
- Cristalería
- Cronómetro
- Jarras (2000 mL)
- 6 Beaker (100 mL)
- 6 jeringas
- 2 buretas
- 2 pipetas
- 50 vasos plásticos (50 mL)
- 6 Erlenmeyer (1000 mL)

3.6. Técnica cuantitativa de la investigación

La prueba de jarra es la técnica más usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros. En ella se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio. En el mercado existe una gran variedad de equipos para pruebas de jarras, pero su versatilidad radica en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (r.p.m). En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos. Entre éstos:

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

El pH desempeña un papel muy importante en el estudio de los fenómenos de coagulación-floculación, una parte de la carga de las partículas coloidales, que han absorbido iones OH^- , queda destruida por un aumento de la concentración de iones H_3O^+ que ocasiona una disminución de la estabilidad de la suspensión coloidal.

Preferiblemente el pH debe quedar dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante usado. Para sales de hierro la zona de pH es mucho más amplia, se alcanza el mínimo de solubilidad a $\text{pH} > 5$. El pH del medio en la coagulación tradicional con hidróxido de aluminio ha demostrado que solo coagula cuando es inferior a 7,4 o superior a 8,5; sin embargo, la eliminación de las materias orgánicas se efectúa mejor en

medio ácido (pH inferior a 7,4) o como sucede con el hidróxido férrico que coagula a un pH superior a 6, pero el alto contenido de materia orgánica del agua cruda proporcionará la formación de sales orgánicas de hierro y el agua quedará coloreada.

El coagulador férrico está indicado en la coagulación de aguas cuyo pH está comprendido entre 7,0 y 8,0, zona en la que el sulfato de alúmina coagula muy mal. El coagulador cúprico se utiliza en aguas alcalinas, en las que asegura su decoloración. Este tipo de coagulante posee un poder desodorante muy acentuado y evita el desarrollo de algas en decantadores y filtros.

La temperatura del agua también influye en la efectividad de la coagulación y en la velocidad de formación del flóculo. Según disminuye la temperatura del agua debe aumentarse la dosis de productos químicos coagulantes, para asegurar la formación de flóculos adecuados.

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

3.6.1. Instrumentos de medición de turbidez

Los turbidímetros o nefelómetros son los instrumentos que emplean un método cuantitativo y deben cumplir los siguientes criterios en el diseño óptico:

- La longitud de onda de la radiación incidente debe ser de 860 nm. La fuente de luz puede ser lámpara de tungsteno; diodos (leds) o láser.

- El ancho de banda espectral debe ser menor o igual a 60 nm.
- La convergencia de la radiación incidente no debe exceder $\pm 1.5^\circ$ en turbidímetros de radiación difusa y u o $\pm 2.5^\circ$ en turbidímetros de radiación atenuada.
- El ángulo de medición entre la radiación incidente y la radiación difusa debe ser de $90^\circ \pm 2.5^\circ$ en turbidímetros de radiación difusa y u o $0^\circ \pm 2.5^\circ$ en turbidímetros de radiación atenuada.
- La distancia recorrida por la luz incidente y dispersada dentro del tubo de muestra no debe exceder 10 cm.

Los turbidímetros o nefelómetros deben estar diseñados con niveles muy pequeños de luz extraviada, para no tener una deriva significativa en el periodo de estabilización del instrumento y, también, para no interferir en mediciones de turbidez de baja concentración.

En la expresión de resultados, las unidades utilizadas actualmente son:

Tabla IV. **Unidades del turbidímetro**

NOMBRE	SÍMBOLO Y UNIDAD
Unidad Nefelométrica de Turbidez	NTU (1)
Unidad Nefelométrica de Formazina	FNU (1)

Fuente: elaboración propia.

Normativa

Existen diferentes normas vigentes con los lineamientos para la determinación de turbidez en la calidad del agua, tanto internacionales como nacionales, algunas de ellas son:

- ISO 7027. (1999). Water quality - Determination of turbidity.
- DIN 38404-10. (1995). German standard methods for the examination of water, waste water and sludge.
- ASTM D1889-00. Standard test method for turbidity of water.
- Method 180.1 USEPA: Determination of turbidity by nephelometry.
- NMX-AA-038-SCFI-2001: Análisis de agua - determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental, agua para uso y consumo humano.

Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. De manera general estas normas contemplan el método de medición, equipo; materiales de referencia para calibración, toma de muestras, almacenaje, expresión de resultados, así como los límites de control de la turbidez en la calidad del agua.

3.6.2. Sólidos en suspensión

Es imposible utiliza un método de análisis gravimétrico en el proceso de tratamiento de aguas, por lo que se utilizan métodos indirectos como la turbidez.

La concentración de sólidos disueltos es un parámetro sumamente importante en el proceso de tratamiento de los lodos. Los sólidos en suspensión

se pueden determinar en línea con los métodos de luz dispersa o absorción. En condiciones normales, la relación con el análisis gravimétrico es muy buena. WTW ha definido unas matrices con las características más importantes de los lodos, con esta información, aún sin una calibración especial para el cliente, se puede lograr una excelente de los sólidos totales en suspensión. Sin embargo, las partículas de lodos diferentes tienen colores, tamaños y estructuras distintas.

Por ello, se ha incluido una función de calibración de puntos múltiples. Esto también se puede hacer con la determinación gravimétrica obligatoria de los sólidos suspendidos.

3.6.3. Diseño experimental

Para obtener el pH óptimo de coagulación para el tratamiento de aguas residuales, se utilizarán diferentes coagulantes. Para ello se empleará un diseño experimental completamente al azar, obteniendo como variable respuesta, el pH óptimo de coagulación.

Tabla V. **Diseño de tratamientos**

Coagulantes	Jarras																	
	Jarra 1			Jarra 2			Jarra 3			Jarra 4			Jarra 5			Jarra 6		
1																		
2																		

Fuente: elaboración propia.

- Cantidad de coagulantes: 2
- Cantidad de jarras: 6
- Cantidad de repeticiones 3

Número de tratamientos= 2 coagulantes * 6 jarras * 3 repeticiones = 36
tratamientos.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

La recolección y ordenamiento de la información de las pruebas de jarras realizadas en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Tabarini Molina”, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, se realizó a través de las siguientes tablas:

Tabla VI. **Determinación de la dosis óptima del coagulante 1**

Coagulante 1										
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)	pH		
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1**

Coagulante 1							
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1**

Coagulante 1							
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1**

Coagulante 1								
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)	
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Determinación de la dosis óptima del coagulante 2**

Coagulante 2									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)	pH	
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 2**

Coagulante 2							
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 2**

Coagulante 2							
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 2**

Coagulante 2								
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Tiempo de sedimentación (min)	
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Fuente: elaboración propia.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A través de las siguientes tablas se tabuló todos los parámetros necesarios y medidos durante la parte experimental de la investigación.

Tabla XIV. **Determinación de la dosis óptima del coagulante 1**

Coagulante 1		Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	Ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)	pH
		1										
		2										
		3										
		4										
		5										
		6										

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1**

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1**

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Determinación del pH óptimo de coagulación del coagulante 1**

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Determinación de la dosis óptima del coagulante 2

Coagulante 2										
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)	pH
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Fuente: elaboración propia.

3.9. Análisis estadístico

Se realizó por medio del análisis de varianzas, el cual evalúa el comportamiento de una variable independiente en función de las variaciones de la variable dependiente. El análisis de varianzas requiere el uso de repeticiones y de tratamientos, donde los tratamientos se refieren las variaciones que experimenta la variable dependiente.

Se evaluó mediante el análisis de varianzas si los coagulantes a su pH óptimo de coagulación tienen un efecto significativo sobre la turbiedad y los sólidos suspendidos del agua residual de una industria de alimentos. El criterio utilizado se basó en el criterio de la F de Fisher, el cual brindó la conclusión de las hipótesis planteadas (ver: hipótesis).

Tabla XIX. **Criterio de comparación del valor de F de Fisher y la F crítica**

Si $F > F_{crítica}$ se rechaza la hipótesis nula.
Si $F < F_{crítica}$ se acepta la hipótesis nula.

Fuente: *análisis de varianzas y análisis de correlación lineal en prácticas experimentales mediante el uso de Excel, Área de Fisicoquímica, Universidad San Carlos de Guatemala. p.7.*

Modelo matemático de prueba de F de Fisher

$$F = \frac{\left(\frac{RSS_0 - RSS_1}{m}\right)}{\left(\frac{1 - RSS_0}{n - k}\right)}$$

Donde:

- RSS_0 = coeficiente de determinación del modelo sin restringir (R^2)
- RSS_1 = coeficiente de determinación del modelo restringido (R^2)
- m = coeficientes restringidos
- k = número de coeficientes estimados en el modelo sin restricciones
- n = número de observaciones del modelo

El valor resultante debe entonces compararse con el valor correspondiente de la tabla de valores críticos.

3.10. Plan de análisis de los resultados

Se utilizaron diferentes métodos, modelos y programas para el análisis de los datos recolectados, que se detallan a continuación.

3.10.1. Métodos y modelos de los datos

Los resultados fueron analizados de forma gráfica, matemática, económica y estadística para evaluar el comportamiento de los compuestos utilizados para determinar el pH óptimo de coagulación en función de los sólidos suspendidos y turbiedad del agua residual.

3.10.2. Programas por utilizar para el análisis de datos

- Qtiplot.
- Microsoft Word 2013.
- Microsoft Excel 2013.

4. RESULTADOS

4.1. Límite máximo permisible según el Acuerdo Gubernativo 236-2006

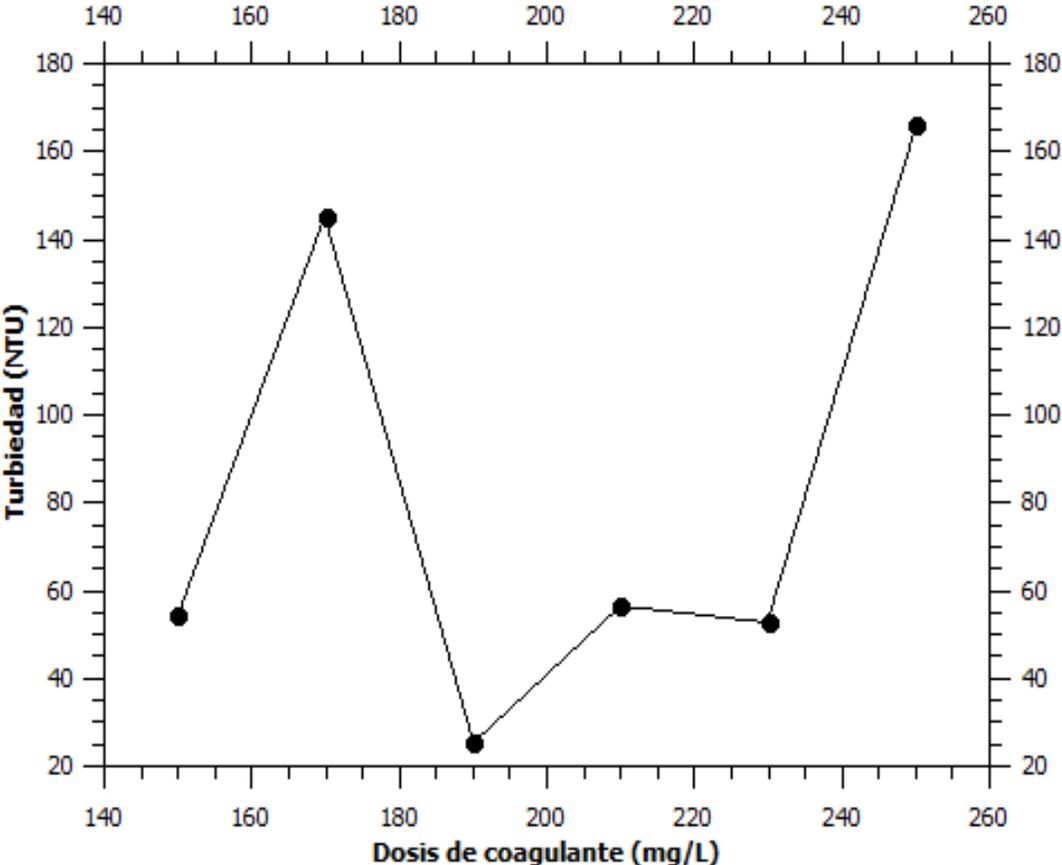
Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, el valor del límite máximo permisible para los sólidos suspendidos para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores es de 100 miligramos por litros (mg/L). Mientras que el rango permisible para el pH sería de 6 a 9.

Tabla XX. **Determinación del pH óptimo de coagulación en función de los sólidos suspendidos y la turbiedad de los coagulantes**

Coagulante	pH	Turbiedad (NTU)	Sólidos suspendidos (mg/L)
Sulfato de aluminio	6.6	25.6	28
Sulfato ferroso	6.8	165	170

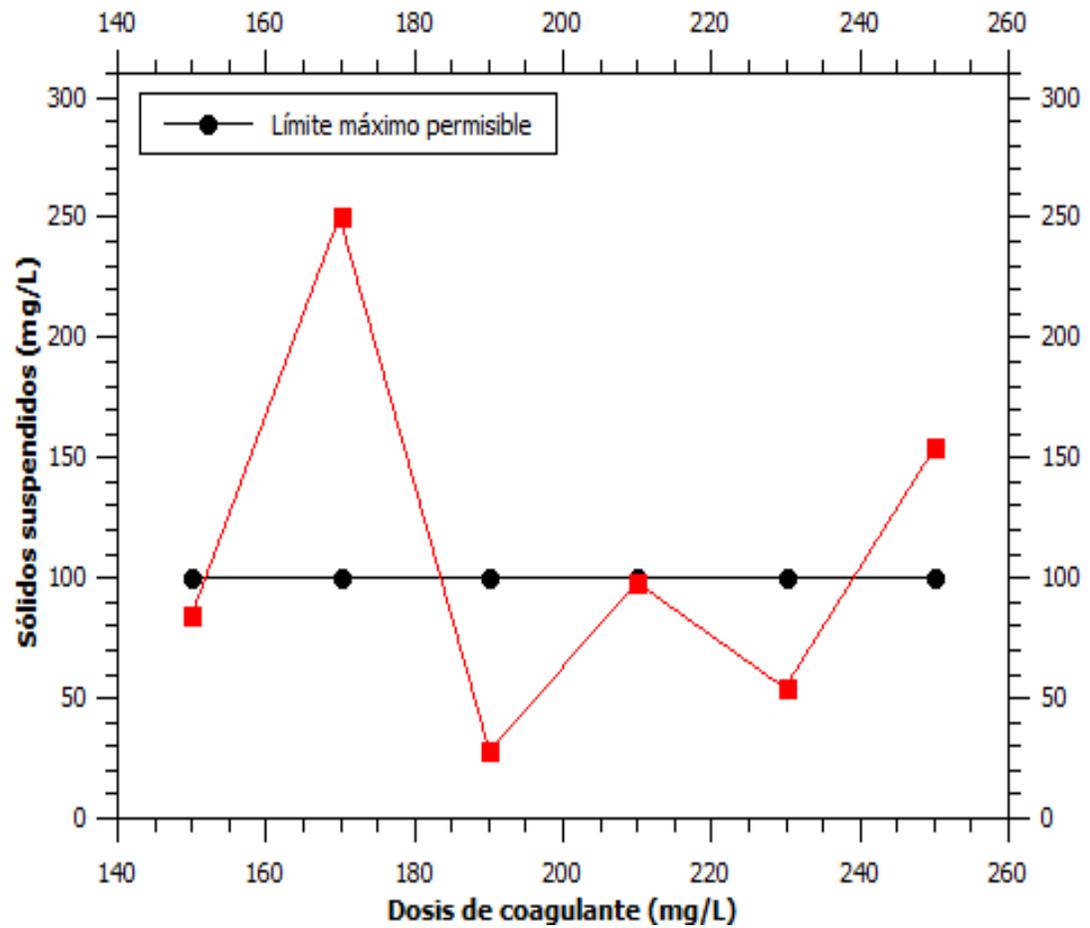
Fuente: elaboración propia.

Figura 1. **Comportamiento de la turbiedad en función de la dosis del sulfato de aluminio**



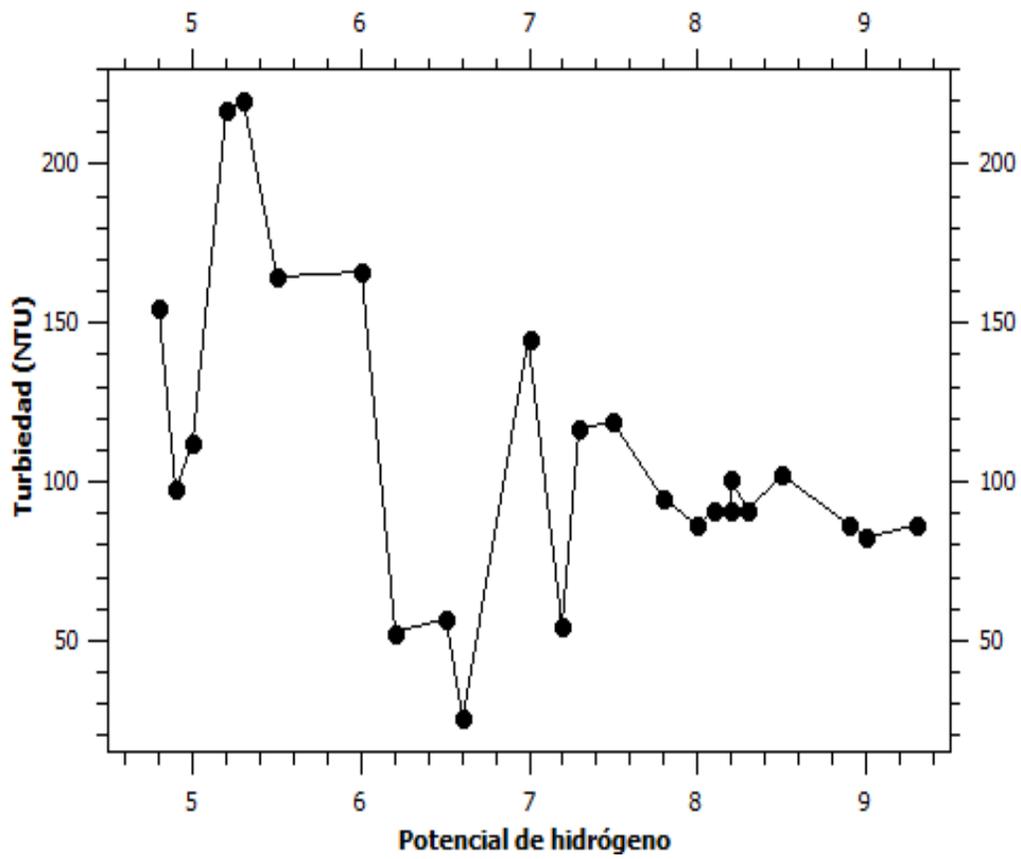
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Comportamiento de los sólidos suspendidos en función de la dosis del sulfato de aluminio**



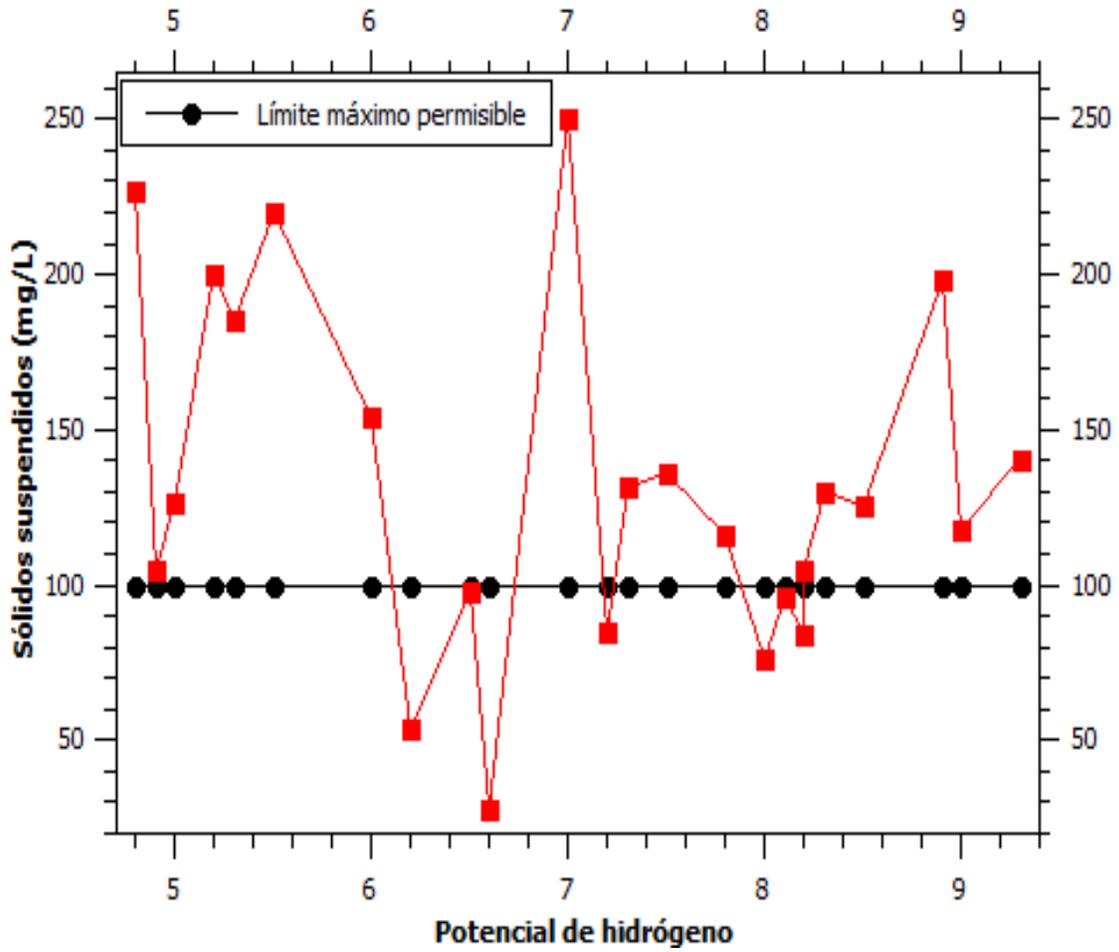
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Comportamiento de la turbiedad en función del pH del sulfato de aluminio



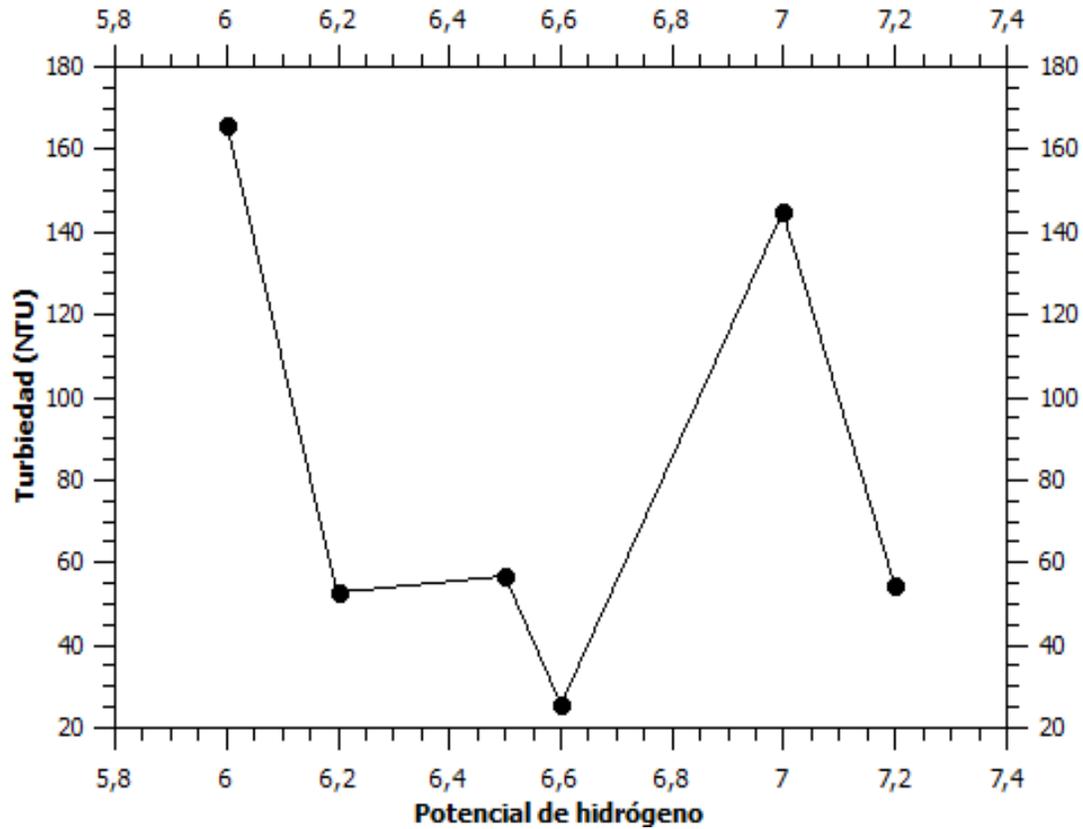
Fuente: elaboración propia,

Figura 4. Comportamiento de los sólidos suspendidos en función del pH del sulfato de aluminio



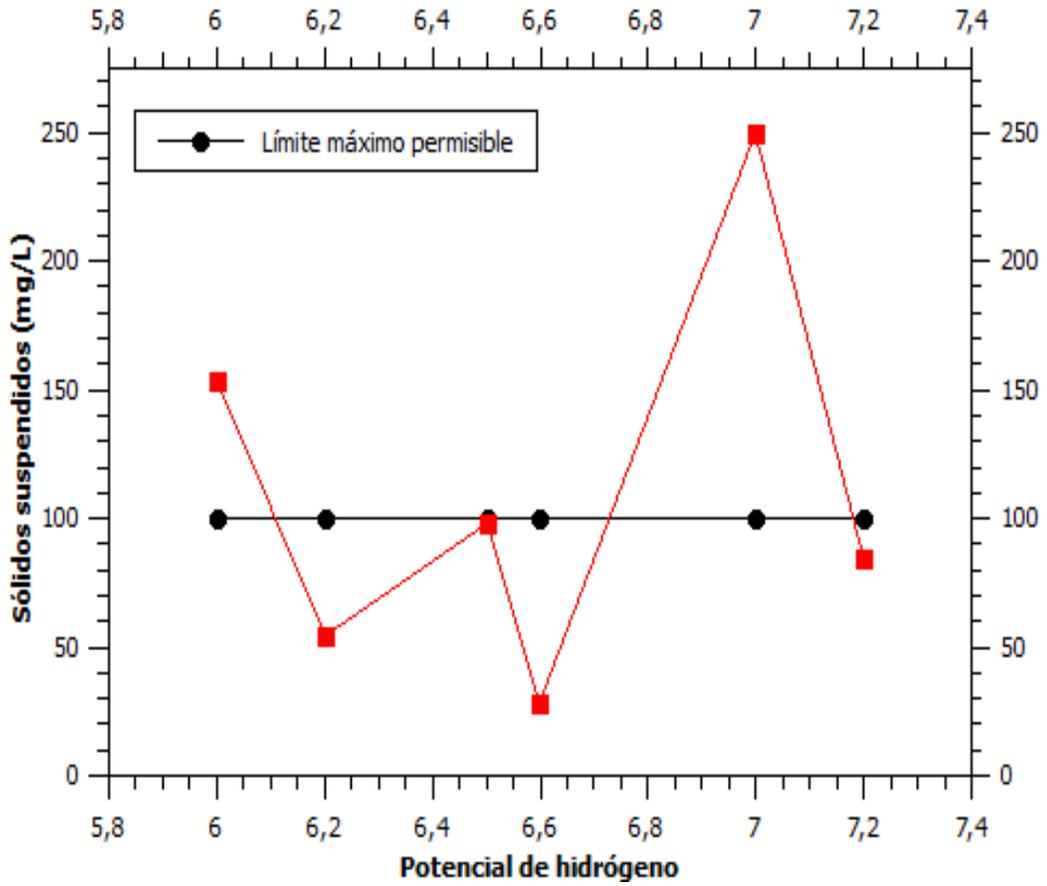
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Comportamiento de la turbiedad en función del rango de pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio**



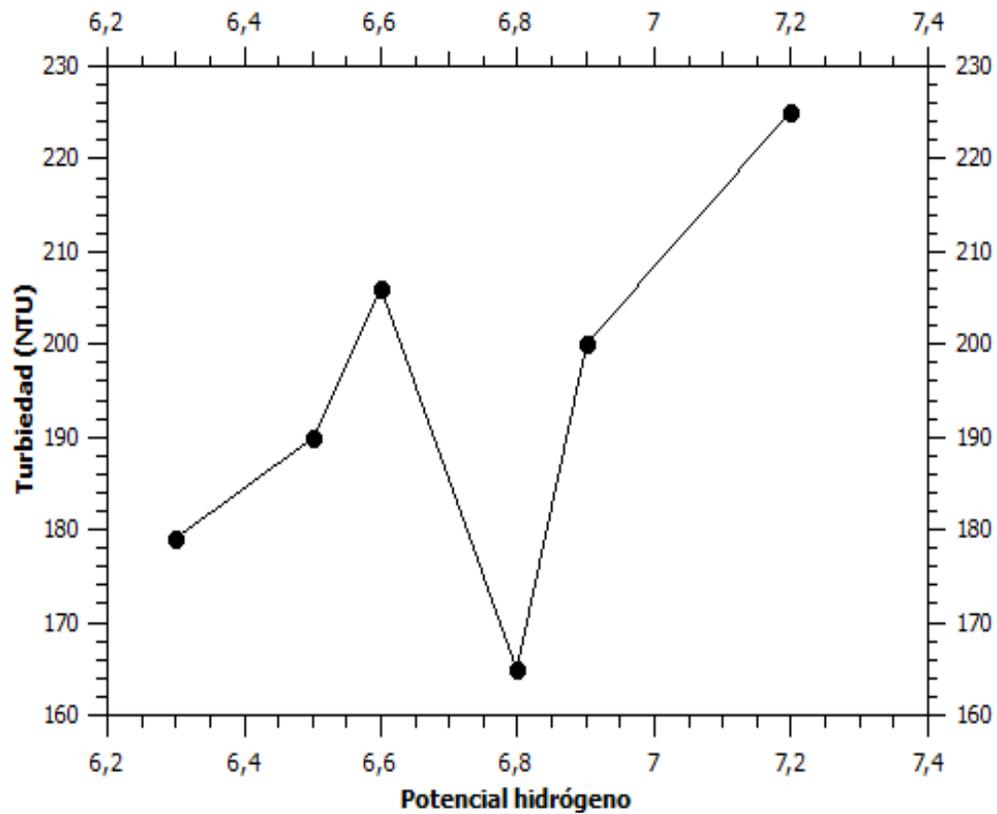
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Comportamiento de los sólidos suspendidos en función del rango de pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio**



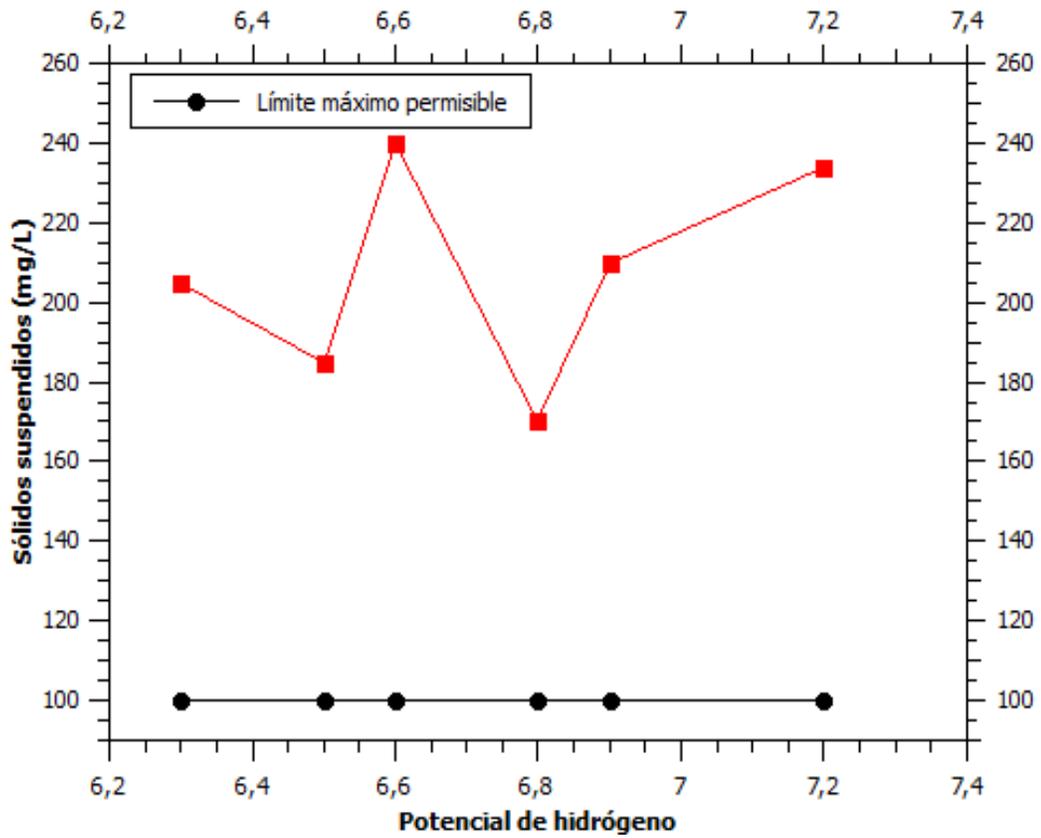
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Comportamiento de la turbiedad en función del pH para el sulfato ferroso



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Comportamiento de los sólidos suspendidos en función del pH para el sulfato ferroso



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La coagulación consiste en la desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados. Mediante la prueba de jarra se simulan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. El sulfato de aluminio trabaja de forma eficiente en un rango de pH de 6.5 a 8, mientras que el sulfato ferroso en un rango de pH de 5.5 a 8, según el acuerdo gubernativo 236-2006 el límite máximo permisible del pH para las descargar de aguas residuales a cuerpos receptores es de 6 a 9. Lo cual se trabajó en este rango de pH para determinar el pH óptimo de coagulación, variando así la dosis del coagulante y el pH, mediante la adición de óxido de calcio (CaO).

Los coagulantes son productos químicos que al interactuar con el agua producen una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad para formar un precipitado voluminoso. Debido a que se lleva a cabo una reacción química, se monitoreó el cambio de temperatura y el tiempo de sedimentación, que fue de 15 minutos, la velocidad de agitación que fue 1 minuto a 100 RPM y 15 minutos a 40 RPM y, por último, la dosis de óxido de calcio que se añadió para manipular el pH, a una dosis óptima de coagulante.

La variación de temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad, es decir, se da una variación en la densidad del agua, que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo cual la coagulación se hace más lenta. Por este motivo, se tomó en cuenta como variable la temperatura, ya que afecta directamente la sedimentación de un flóculo.

La variable más influyente para la determinación del pH óptimo de coagulación es la dosis del coagulante, ya que influye directamente en la eficiencia de la coagulación. Por lo tanto, si no se añade suficiente dosis del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de las partículas, por lo que la formación de los microflóculos sería escasa. Esto daría una turbiedad residual elevada, en cambio, se excede la dosis de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación serían muy bajas, por lo que da una turbiedad residual elevada. Se realizaron diferentes pruebas para determinar la dosis óptima de coagulante, a través de la disminución de la turbiedad y los sólidos suspendidos.

Con base en la figura 1 y 2 de la sección de resultados, se determinó la dosis óptima a la que el sulfato de aluminio es más eficiente para realizar la coagulación. La dosis óptima es de 190 miligramos por litro (mg/L) de sulfato de aluminio, el cual dio una turbiedad de 25.6 NTU, implica que la dosis de coagulante es suficiente para desestabilizar las partículas y producir la coagulación. Con base en los sólidos suspendidos, la dosis óptima del sulfato de aluminio presentó el porcentaje de remoción más alto a una concentración de 28 miligramos por litro (mg/L) de dicho reactivo. Esto implica que la concentración de sólidos suspendidos a la dosis óptima cumple con el límite máximo permisible del acuerdo gubernativo 236-2006, que es de 100 miligramos por litro (mg/L).

Al determinar la dosis óptima de coagulación para el sulfato de aluminio, por medio del óxido de calcio (CaO) se manipuló el potencial de hidrógeno (pH) de las aguas residuales. En las figuras 3 y 4 se observa el comportamiento de los sólidos suspendidos y la turbiedad en función del potencial de hidrógeno (pH), en la cual se utilizó un rango de 4,8 a 9,3 para el potencial de hidrógeno para observar el comportamiento del sulfato de aluminio a diferentes pH, debido a que

su rango de pH para la coagulación es de 6,5 a 8, en la cual se hace evidente que el pH óptimo de coagulación para estas aguas residuales es de 6.6, el cual coincide con la dosis óptima del coagulante, con una turbiedad de 25.6 NTU y una concentración de sólidos suspendidos de 28 miligramos por litro (mg/L). Se amplió el rango del potencial de hidrógeno (pH) porque este depende del tipo de coagulante a utilizar y de la naturaleza del agua a tratar, esto implica que si la coagulación se realizará fuera del rango de pH definido para el sulfato de aluminio entonces la dosis del coagulante requerido es alta.

El pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio es de 6.6. En ella se observa, específicamente, el comportamiento de la turbiedad y los sólidos suspendidos en las figuras 5 y 6, se tiene una turbiedad de 25,6 NTU. La turbiedad mide el efecto de la dispersión que las partículas presentan al paso de la luz, en función del número, tamaño y forma de partículas; los 25,6 NTU representan la profundidad de centímetros de transparencia, que sería de 25 a 30 centímetros. La coagulación de estas partículas se facilita cuando se trabaja en el pH óptimo. En el agua residual cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial está en función de la distancia que los separa y con los iones de carga opuestas del sulfato de aluminio interrumpe la fuerza de repulsión, es decir, las partículas coloidales poseen carga negativa en sus superficies, estas cargas atraen los iones positivos del sulfato de aluminio y forman la primera capa adherida al coloide. Sin embargo, la anulación del potencial obtenido por adición del sulfato de aluminio, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriéndose una energía complementaria necesaria; que sería la realización de agitación mecánica por medio de las pruebas de jarra. La anulación del potencial se observa por medio de la remoción de sólidos suspendidos desde 480 miligramos por litro (mg/L) hasta 28 miligramos por litro (mg/L), el cual cumple con el límite máximo

permisible del acuerdo gubernativo 236-2006 que es de 100 miligramos por litro (mg/L).

Se observa en las figuras 7 y 8 que el coagulante sulfato ferroso no generó un cambio significativo en la turbiedad y en los sólidos suspendidos de las aguas residuales provenientes de una industria de alimentos de galletas. Es decir, incumple el acuerdo gubernativo 236-2006, con una concentración de 170 miligramos por litro (mg/L) para el parámetro de sólidos suspendidos que es de 100 miligramos por litro (mg/L). Esto se debe a que el sulfato ferroso no pudo realizar la coagulación, es decir, no desestabilizó las partículas coloidales que se encuentran en suspensión. Esto impidió el crecimiento y aglomeración de los flóculos para aumentar el tamaño y peso y sedimentar con facilidad. Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y que es interrumpida por medio de los iones de carga contrario del coagulante, sin embargo, los iones del sulfato ferrosos no generaron suficiente carga para poder anular el potencial de repulsión que se generan entre partículas en las aguas residuales tratadas. El sulfato ferroso no es eficiente para la realización de la coagulación para el tratamiento de estas aguas residuales.

CONCLUSIONES

1. El pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio es de 6,6 cumpliendo con el acuerdo gubernativo 236-2006 mientras que el sulfato ferroso fue insuficiente para realizar la coagulación con un pH de 6,8.
2. Para el sulfato de aluminio la carga de sólidos suspendidos fue de 28 mg/L y la turbiedad de 25,6 NTU, mientras que, para el sulfato ferroso, la carga de sólidos suspendidos fue de 170 mg/L y la turbiedad de 165 NTU, se midieron estos parámetros para determinar la calidad del agua residual obtenida de la industria de alimentos.
3. Se realizó una comparación entre los límites máximos permisibles de los parámetros pH y sólidos suspendidos del acuerdo gubernativo 236-2006, determinando el cumplimiento de estos para el sulfato de aluminio con 28 mg/L de sólidos suspendidos y un pH de 6,6, mientras que el sulfato ferroso se encuentra por encima del límite máximo permisible de los sólidos suspendidos con una carga de 170 mg/L.
4. Al obtener la carga de sólidos suspendidos y la turbiedad, 28 mg/L y 25,6 NTU respectivamente, se estableció un pH óptimo de coagulación para el sulfato de aluminio de 6,6, mientras que el sulfato ferroso no fue eficiente en la realización de la coagulación, obteniendo una carga de sólidos suspendidos de 170 mg/L y turbiedad de 165 NTU a un pH de 6,8.

RECOMENDACIONES

1. Es indispensable tratar las aguas residuales de una industria de alimentos. Antes de descargar los cuerpos receptores se deben disminuir los sólidos suspendidos por debajo del límite máximo permisible según el acuerdo gubernativo 236-2006.
2. El sulfato de aluminio fue más eficiente que el sulfato ferroso al realizar la coagulación para el tratamiento de aguas residuales de una industria de alimentos. Por ello, se considera el sulfato de aluminio como el coagulante más indicado para la disminución de la turbiedad y los sólidos suspendidos.
3. Es conveniente seguir evaluando otros coagulantes y poder compararlos con los actuales para determinar cuál podría ser más eficiente para la realización de la coagulación.
4. La disminución de los sólidos suspendidos y la turbiedad son parámetros importantes para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, será necesario realizar otro estudio para analizar y medir la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO), ya que estos parámetros están relacionados con las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores.

5. El sulfato de aluminio, a pesar de ser más eficiente, también es menos costoso que el sulfato ferroso. Por ello, es importante utilizarlo y se considera una mejor alternativa para la disminución de los sólidos suspendidos y la turbiedad en el tratamiento de aguas residuales de una industria de alimentos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales*. Guatemala. 2006. 40 p.
2. ALDANA, Luis. *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*. Trabajo de graduación en Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2014. 92 p.
3. Asociados, Metas y metrólogos. *Medición de turbidez en la calidad del agua* [en línea]. <<http://www.metas.com.mx/guiametas/la-guia-metas-10-01-turbidez.pdf>> [Consulta: abril 2017].
4. BARRENECHEA, Ada. *Cogulación: tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, Perú. 2004. 56 p.
5. BLAZQUEZ, Pamela y MONTERO, Cecilia. *Reutilización de agua en Bahía Blanca Plata 3ra. Cuenca*. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina. 2010. 29 p.

6. DÍAZ, José. *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas*. Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán, San Pedro Sula Cortés, Honduras. 2014. 172 p.
7. FÉLEZ, Marta. *Situación actual del estado de depuración biológica. Explicación de los métodos y sus fundamentos*. Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España. 2009. 215 p.
8. FERNÁNDEZ, Antonio, y otros. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía, Madrid, España. 137 p.
9. FUNES, Ana. *Clarificación del agua residual del área de pintura base látex de una fábrica de pinturas mediante coagulación, floculación y filtración*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química, Universidad Rafael Landívar, Guatemala. 2007. 92 p.
10. GONZÁLEZ, Luis. *Evaluación a nivel laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales proveniente de la producción de aceites y grasas comestibles*. Trabajo de graduación en Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2011. 165 p.
11. LABARCES, Eulfo. *Evaluación del proceso coagulación-floculación a partir de sulfato de aluminio preparado utilizando envases reciclados del metal y aluminio modificado en la potabilización de*

aguas. Universidad Industrial de Santander, Santander, España. 2007. 66 p.

12. LORENZO, Yaniris. *Estado del arte de tratamientos de aguas por coagulación-floculación*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de Caña de Azúcar, La Habana, Cuba. 2006. 235 p.
13. MARICRUZ, VARGAS y ROMERO, Luis. *Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamientos de aguas en Costa Rica*. Tecnología en Marcha, Cartago, Costa Rica. 2006. 37 p.
14. MELGAR, Manfred. *Evaluación a nivel de laboratorio de coagulantes-floculantes como alternativas para eliminar los sólidos en suspensión de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café*. Trabajo de graduación en Ingeniería Química, Universidad Lándivar, Guatemala. 2007. 124 p.
15. PRAMPARO, Laura. *Introducción a la problemática de las aguas residuales industriales y su tratamiento*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. 2016. 68 p.
16. PELLECCER, Miriam. *Comparación entre sulfato de aluminio y sulfato de hierro utilizados como coagulantes químicos para reducir el parámetro de sólidos suspendidos en aguas residuales generadas por actividades domésticas*. Trabajo de graduación en Ingeniería Química, Universidad Lándivar, Guatemala. 2008. 142 p.

17. RAMALHO, R.S. *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté, S.A., Quebec, Canadá. 1990. 148 p.
18. RECINOS, Melvin. *Investigación de la polimerización del dimetil-dialil-cloruro de amonio y su utilización como coagulante en el tratamiento de aguas*. Trabajo de graduación en Ingeniería Química, Universidad Lándivar, Guatemala. 2002. 112 p.
19. ROMERO-AGUILAR, Mariana, y otros. *Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 25, México. 2009. 167 p.
20. *Turbidez y sólidos suspendidos* [en línea]. <https://www.wtw.com/fileadmin/upload/Service/Downloads/Kataloge/Online/ES/Onl_034_039_Turbidez-y-Solidos-disuelto_390-KB_ES-pdf.pdf> [Consulta: abril 2017].
21. VÉLIZ, ELIET, y otros. *Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales*. CENIC Ciencias Químicas, La Habana, Cuba. 2010. 56 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos calculados

Determinación de la dosis óptima para el sulfato de aluminio, corrida 1 con tiempo de sedimentación de 15 minutos.

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	Ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	pH
1	150	15	305	54.5	480	85	21.7	100/40	7.2
2	170	17	305	145	480	250	21.7	100/40	7.0
3	190	19	305	25.6	480	28	21.7	100/40	6.6
4	210	21	305	56.7	480	98	21.7	100/40	6.5
5	230	23	305	52.6	480	54	21.7	100/40	6.2
6	250	25	305	166	480	154	21.7	100/40	6.0

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Determinación de la dosis óptima para el sulfato de aluminio, corrida 2 con tiempo de sedimentación de 15 minutos.

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	Ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	pH
1	150	15	308	56.5	486	90	22.6	100/40	7.2
2	170	17	308	150	486	260	22.6	100/40	6.9
3	190	19	308	25.6	486	28	22.6	100/40	6.6
4	210	21	308	59.7	486	100	22.6	100/40	6.4
5	230	23	308	53.4	486	58	22.6	100/40	6.2
6	250	25	308	163	486	158	22.6	100/40	6.0

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Determinación de la dosis óptima para el sulfato de aluminio, corrida 3 con tiempo de sedimentación de 15 minutos.

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	Ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	pH
1	150	15	302	53.5	482	80	23.8	100/40	7.3
2	170	17	302	140	482	255	23.8	100/40	6.8
3	190	19	302	25.6	482	28	23.8	100/40	6.6
4	210	21	302	52.7	482	94	23.8	100/40	6.5
5	230	23	302	58.8	482	50	23.8	100/40	6.2
6	250	25	302	160	482	150	23.8	100/40	6.1

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Determinación del pH óptimo de coagulación del sulfato de aluminio con tiempo de sedimentación de 15 minutos.

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)
1	190	7.3	296	117	465	132	22.3	100/40	1
2	190	7.5	296	119	465	136	22.1	100/40	1.5
3	190	7.8	296	95	465	116	21.7	100/40	2
4	190	8.0	296	86.6	465	76	21.7	100/40	2.5
5	190	8.1	296	90.9	465	96	21.6	100/40	3
6	190	8.2	296	90.6	465	84	21.6	100/40	3.5

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Determinación del pH óptimo de coagulación del sulfato de aluminio con tiempo de sedimentación de 15 minutos.

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)
1	190	8.2	301	101	470	105	23.6	100/40	5
2	190	8.3	301	91.3	470	130	23.7	100/40	5.5
3	190	8.5	301	102	470	126	24	100/40	6
4	190	8.9	301	86.4	470	198	24	100/40	6.5
5	190	9.0	301	82.8	470	118	24.1	100/40	7
6	190	9.3	301	86.5	470	140	24	100/40	7.5

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Determinación del pH óptimo de coagulación del sulfato de aluminio con tiempo de sedimentación de 15 minutos.

Coagulante 1									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	pH	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Dosis de floculante (mL)
1	250	5.5	440	165	475	220	22.8	100/40	0
2	270	5.3	440	220	475	185.7	23.1	100/40	0
3	290	5.2	440	217	475	200.5	23.1	100/40	0
4	310	5.0	440	112	475	126.7	23	100/40	0
5	330	4.9	440	98.1	475	105	22.9	100/40	0
6	350	4.8	440	155	475	226.7	23	100/40	0

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1

Determinación del pH óptimo de coagulación del sulfato ferroso con tiempo de sedimentación de 15 minutos.

Coagulante 2									
Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	ml de solución a aplicar	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	Sólidos suspendidos iniciales (mg/L)	Sólidos suspendidos finales (mg/L)	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	pH
1	150	15	310	225	450	234	22.6	100/40	7.2
2	170	17	310	200	450	210	22.6	100/40	6.9
3	190	19	310	165	450	170	22.6	100/40	6.8
4	210	21	310	206	450	240	22.6	100/40	6.6
5	230	23	310	190	450	185	22.6	100/40	6.5
6	250	25	310	179	450	205	22.6	100/40	6.3

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Muestra de cálculo

Porcentaje de remoción de color y cloro

La concentración de sólidos suspendidos se determinó de la siguiente manera:

$$SS = \frac{P_{ff} - P_{fo}}{V} * 1,000,000$$

Donde:

SS = sólidos suspendidos (mg/L)

P_{fo} = peso del filtro inicial (g).

P_{ff} = peso de filtro final (g).

V = volumen filtrado (mL)

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se usó el análisis de varianzas. El análisis de varianzas evalúa la variación de una variable independiente en función de las variaciones de la variable dependiente.

Se evaluó si existe diferencia significativa entre el pH óptimo de coagulación de cada coagulantes respecto de la turbiedad y los sólidos suspendidos.

Turbiedad

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL SULFATO DE ALUMINIO						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	47 486,08	5	9 497,22	949,1	3,764E-15	3,106
Dentro de los grupos	120,08	12	10,007			
Total	47 606,16	17				

Fuente: elaboración propia

Continuación apéndice 3

Sólidos suspendidos

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL SULFATO DE ALUMINIO						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	100 730,44	5	20 146,09	1 323,5	5,1462E-16	3,106
Dentro de los grupos	182,67	12	15,22			
Total	100 913,11	17				

Fuente: elaboración propia

Como la F de Fisher es mayor a la F crítica en ambos casos, se rechaza la hipótesis nula (H_0), y se concluye que el pH óptimo de coagulación del sulfato de aluminio sí tiene un efecto significativo en la turbiedad y los sólidos suspendidos en las aguas residuales de una industria de alimentos.

Apéndice 4. Requisitos académicos

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Química	Área de operaciones unitarias	IQ2	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de fluidos
		Laboratorio de química 1	<ul style="list-style-type: none"> • Caídas de presión
	Química Industrial	Microbiología	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de equipo de laboratorio
		Calidad del Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de muestreo de calidad del agua <ul style="list-style-type: none"> • Coagulantes • Tratamientos de aguas residuales
	Complementaria	Biología	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación taxonómica

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Presupuesto para muestreo**

DESCRIPCIÓN	MONTO
Depreciación vehículo	5 000,00
Combustible	1 000,00
Sulfato de aluminio	100,00
Sulfato ferroso	100,00
Poliacrilamida	200,00
Hidróxido de sodio	56,00
Ácido clorhídrico	80,00
Botes plásticos	200,00
SUBTOTAL	Q 6 736,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Presupuesto para comunicación**

DESCRIPCIÓN	MONTO
Servicio telefónico	1 000,00
Datos móviles	1 500,00
Internet	1 000,00
SUBTOTAL	Q 3 500,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Presupuesto para la cristalería y equipos

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MONTO UNITARIO	SUBTOTAL
Hielera con hielo para conservar la muestra	1	200,00	200,00
Recipiente de polietileno para transportar la muestra	1	100,00	100,00
Balón aforado 100 mL	1	56,00	56,00
Papel filtro	1	20,00	20,00
Papel parafinado	1	15,00	15,00
Turbidímetro	1	500,00	500,00
Agitador para la prueba de jarras	1	10,00	10,00
Potenciómetro	1	800,00	800,00
Balanza analítica	1	1 000,00	1 000,00
Termómetro	1	450,00	450,00
Cristalería	1	900,00	900,00
Cronómetro	1	350,00	350,00
Jarras (2000 mL)	6	200,00	1 200,00
Beaker (100 mL)	6	100,00	600,00
Jeringas	6	6,00	36,00
Buretas	2	200,00	400,00
Pipetas	2	55,00	110,00
Vasos plásticos (50 mL)	50	4,50	225,00
Erlenmeyer (1000 mL)	6	50,00	1 500,00
SUBTOTAL			Q 8 472,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Presupuesto para comunicación**

DESCRIPCIÓN	MONTO
Servicio telefónico	1 000,00
Datos móviles	1 500,00
Internet	1 000,00
SUBTOTAL	Q 3 500,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Presupuesto para análisis de laboratorio ***

DESCRIPCIÓN	MONTO
Sólidos suspendidos	1 980,00
Turbiedad	1 800,00
Electricidad	3 000,00
SUBTOTAL	Q 6 780,00

Fuente: elaboración propia.

*Arancel del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Tabarini Molina”, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Apéndice 10. **Presupuesto para recursos humanos**

DESCRIPCIÓN	MONTO
Investigador	8 000,00
Asesor	8 000,00
Consultores externos	10 000,00
SUBTOTAL	Q 26 000,00

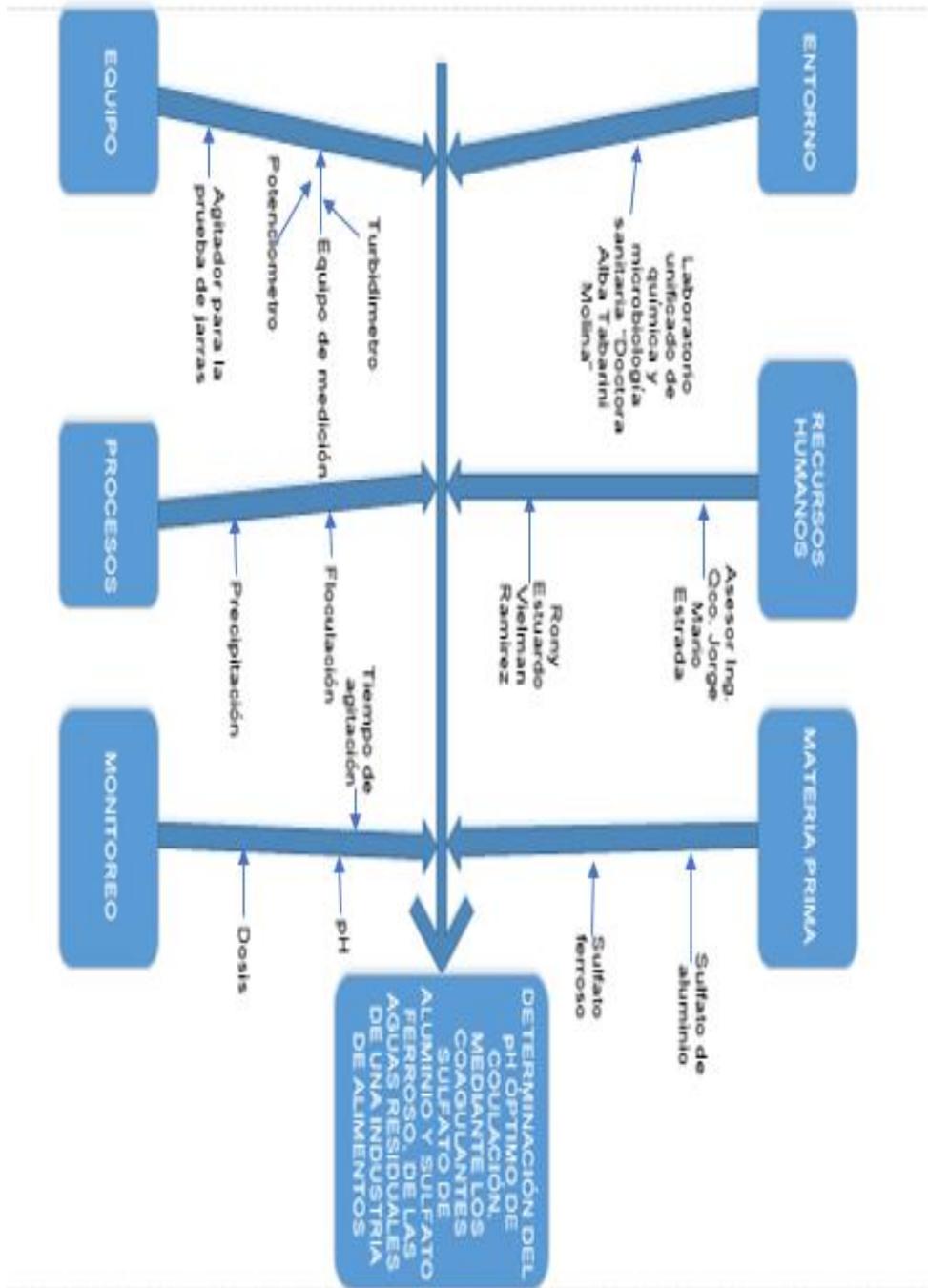
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Presupuesto final**

DESCRIPCIÓN	MONTO
Muestreos	6 736,00
Comunicaciones	3 500,00
Cristalería y equipos	8 472,00
Redacción del informe final	1 700,00
Análisis de laboratorio	6 780,00
Recursos humanos	26 000,00
TOTAL	Q 53 188,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Diagrama Ishikawa



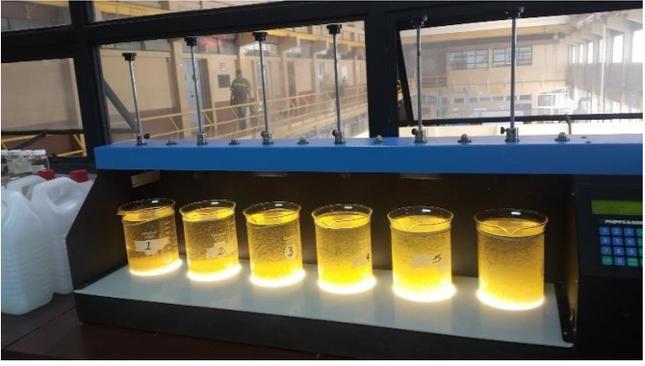
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Fotografías de la planta de tratamiento de donde se realizó el muestreo**



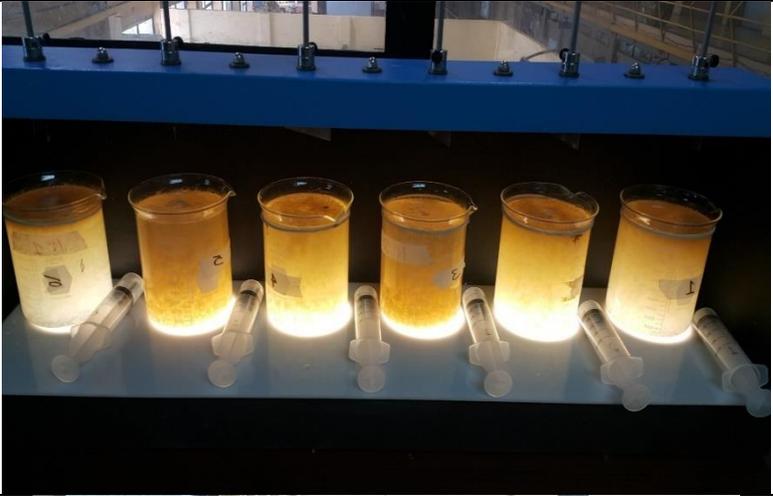
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Fotografías de las pruebas de jarra**

Coagulante	pH	Fotografía
Sulfato de aluminio	6.0 – 7.2	
Sulfato de aluminio	7.3 – 8.2	
Sulfato de aluminio	8.2 – 9.3	

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 14

Sulfato de aluminio	4.8 – 5.5	
Sulfato ferroso	6.3 – 7.2	

Fuente: elaboración propia.

