



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

**EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PROVOCA LA CONCENTRACIÓN DEL SULFATO
FÉRRICO EN EL SULFATO DE ALUMINIO, CUANDO LA MEZCLA ES UTILIZADA COMO
COAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

Jorge Emanuel Castillo Palencia

Asesorado por M.A. Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PROVOCA LA CONCENTRACIÓN DEL SULFATO
FÉRRICO EN EL SULFATO DE ALUMINIO, CUANDO LA MEZCLA ES UTILIZADA COMO
COAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE EMANUEL CASTILLO PALENCIA

ASESORADO POR M.A. ING. RENATO GIOVANNI PONCIANO SANDOVAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

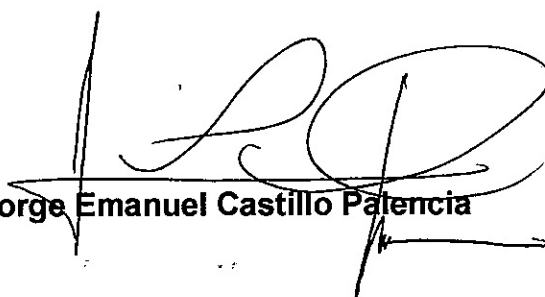
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdéz
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PROVOCA LA CONCENTRACIÓN DEL SULFATO
FÉRRICO EN EL SULFATO DE ALUMINIO, CUANDO LA MEZCLA ES UTILIZADA COMO
COAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 22 de octubre de 2011.



Jorge Emanuel Castillo Patencia



Guatemala, 14 de octubre de 2014

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Monzón:

Reciba por medio de la presente un cordial saludo de mi parte. El motivo por el que me dirijo a usted es para hacer de su conocimiento que he revisado y corregido el Informe Final del trabajo de graduación del estudiante **Jorge Emanuel Castillo Palencia**, carné universitario No. 200515889, denominado, **EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PROVOCA LA CONCENTRACIÓN DEL SULFATO FÉRRICO EN EL SULFATO DE ALUMINIO, CUANDO LA MEZCLA ES UTILIZADA COMO COAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**. Es mi opinión que el trabajo está listo para ser sometido a la revisión y escrutinio de los revisores nombrados por la Escuela de Ingeniería Química, por lo que por este medio le comunico mi **APROBACIÓN** del mismo y solicito que se le dé el trámite correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted con todo respeto.

Atentamente,
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Renato Giovanni Ponciano Sandoval
INGENIERO QUÍMICO

Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
Asesor de Tesis
Profesor Titular VI



Guatemala, 21 de agosto de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.056.2015.

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **179-2011** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Jorge Emanuel Castillo Palencia**.
Identificado con número de carné: **2005-15889**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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

EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PROVOCA LA CONCENTRACIÓN DEL SULFATO FÉRRICO EN EL SULFATO DE ALUMINIO, CUANDO LA MEZCLA ES UTILIZADA COMO COAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Renato Giovanni Ponciano Sandoval**.

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. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERMA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.145.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JORGE EMANUEL CASTILLO PALENCIA** titulado: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PROVOCA LA CONCENTRACIÓN DEL SULFATO FÉRRICO EN EL SULFATO DE ALUMINIO, CUANDO LA MEZCLA ES UTILIZADA COMO COAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale





DTG. 532.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PROVOCA LA CONCENTRACIÓN DEL SULFATO FÉRRICO EN EL SULFATO DE ALUMINIO, CUANDO LA MEZCLA ES UTILIZADA COMO COAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Emanuel Castillo Palencia**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2015

/gdech



AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios, en donde he iniciado el camino de mi carrera profesional.
Facultad de Ingeniería	Porque en sus aulas me apasioné por la ingeniería, pasión que ha perdurado en mi alma.
Mis amigos de la Facultad	Douglas Gallo, Fernando Chajón, Edgar Arana, Carlos Álvarez, Danilo Hernández, Mariceli Suchini y Edwin Marroquín, por su amistad incondicional.
Ing. Renato Ponciano	Por haber brindado su tiempo, asesoría y experiencia, en la elaboración del presente trabajo de graduación.
Ing. Jorge Mario Estrada	Por su profesionalismo durante la revisión del presente trabajo de graduación.
Representaciones Químicas	Por darme la oportunidad de iniciar mi carrera laboral, en especial a los Ings. Jorge Ávalos y Estuardo Morfín.

2.3.3.	Modelo de la doble capa eléctrica	14
2.3.4.	Potencial Z	15
2.4.	Coagulación	16
2.4.1.	Dosis óptima de coagulante	17
2.5.	Floculación	17
2.6.	Coagulantes metálicos	19
2.6.1.	Sales de aluminio como coagulantes	20
2.6.1.1.	Sulfato de aluminio sólido.....	22
2.6.1.2.	Sulfato de aluminio en solución.....	22
2.6.2.	Sales de hierro como coagulantes	23
2.6.2.1.	Sulfato férrico	24
2.6.2.2.	Cloruro férrico.....	25
3.	METODOLOGÍA	27
3.1.	Variables	27
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	28
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	30
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	30
3.5.	Técnica cuantitativa.....	30
3.5.1.	Procedimiento utilizado para la determinación de la mezcla más eficiente de coagulante.....	31
3.5.2.	Procedimiento de la prueba de jarras para la determinación de la dosis óptima de coagulante....	31
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	32
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	33
3.7.1.	Características de los coagulantes utilizados.....	33
3.7.2.	Datos obtenidos de las pruebas de jarras	36

3.7.2.1.	Cálculo de dosis de solución utilizada.....	36
3.7.2.2.	Cálculo de dosis de sulfato férrico	36
3.7.2.3.	Cálculo de dosis de sulfato de aluminio	37
3.7.2.4.	Cálculo de dosis de sales metálicas	37
3.7.3.	Determinación de la dosis óptima de coagulante ...	40
3.7.4.	Determinación del costo del tratamiento con la dosis óptima de coagulante	40
3.8.	Análisis estadístico	41
3.8.1.	Error absoluto en medida de concentraciones de soluciones madre.....	41
3.8.2.	Incertidumbre de equipos de medición	42
3.8.3.	Error relativo en cálculo de dosis de solución utilizada.....	43
3.8.4.	Error relativo en cálculo de dosis de sulfato férrico.....	43
3.8.5.	Error relativo en cálculo de dosis de sulfato de aluminio	44
3.8.6.	Error relativo en cálculo de dosis de sales metálicas.....	44
3.8.7.	Error relativo en determinación de la turbidez de la muestra tratada.....	44
3.8.8.	Error relativo en determinación del color de la muestra tratada.....	45
4.	RESULTADOS	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	57

CONCLUSIONES..... 61
RECOMENDACIONES..... 63
BIBLIOGRAFÍA..... 65
APÉNDICES..... 69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Modelo de la doble capa.	15
2.	Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 1	49
3.	Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 2	51
4.	Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 3	52
5.	Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 4	54
6.	Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 5	55

TABLAS

I.	Contaminantes importantes de las aguas residuales	7
II.	Definición de las variables a utilizar	27
III.	Variables a manipular	28
IV.	Variables de respuesta.....	28
V.	Características del coagulante núm. 1 utilizado en las pruebas.....	33
VI.	Características del coagulante núm. 2 utilizado en las pruebas.....	34
VII.	Características del coagulante núm. 3 utilizado en las pruebas.....	34
VIII.	Características del coagulante núm. 4 utilizado en las pruebas.....	35
IX.	Características del coagulante núm. 5 utilizado en las pruebas.....	35

X.	Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 1	38
XI.	Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 2	38
XII.	Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 3	39
XIII.	Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 4	39
XIV.	Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 5	40
XV.	Error absoluto en concentración de soluciones madre	42
XVI.	Incertidumbre de equipos de medición	42
XVII.	Error relativo en mediciones realizadas para coagulante núm. 1	45
XVIII.	Error relativo en mediciones realizadas para coagulante núm. 2	46
XIX.	Error relativo en mediciones realizadas para coagulante núm. 3	46
XX.	Error relativo en mediciones realizadas para coagulante núm. 4	47
XXI.	Error relativo en mediciones realizadas para coagulante núm. 5	47
XXII.	Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 1	50
XXIII.	Costo de dosis óptima, coagulante núm. 1	50
XXIV.	Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 2	51
XXV.	Costo de dosis óptima, coagulante núm. 2	52
XXVI.	Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 3	53
XXVII.	Costo de dosis óptima, coagulante núm. 3	53
XXVIII.	Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 4	54
XXIX.	Costo de dosis óptima, coagulante núm. 4	55
XXX.	Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 5	56
XXXI.	Costo de dosis óptima, coagulante núm. 5	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H ₂ O	Agua
Ca(HCO ₃) ₂	Bicarbonato de calcio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio
FeCl ₃	Cloruro férrico
P ₀	Concentración de polímero inicial
P	Concentración de polímero posterior a la adsorción.
K ₁	Constante de formación de floc
DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
Σp	Densidad de carga en el coloide
CO ₂	Dióxido de carbono
Θ	Fracción de sitios cubiertos en el coloide
C ₆ H ₁₂ O ₆	Glucosa
°C	Grados centígrados
Al(OH) ₃	Hidróxido de aluminio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio
Fe(OH) ₃	Hidróxido férrico
H ⁺	Ion hidronio
OH ⁻	Ion hidroxilo
Kg	Kilogramos
mg/l	Miligramo por litro
Min	Minuto

N	Número de partículas sin flocular
B	Número de segmentos adsorbidos por la molécula.
Al₂O₃	Óxido de aluminio
Fe₂O₃	Óxido férrico
O₂	Oxígeno molecular
Ppm	Partes por millón (mg/l)
(%m/m)	Porcentaje masa/masa
pH	Potencia de hidrogeno
ψ	Potencial de superficie
Q	Quetzales
rpm	Revoluciones por minuto
Al₂(SO₄)₃	Sulfato de aluminio
CaSO₄	Sulfato de calcio
Fe₂(SO₄)₃	Sulfato férrico
Noe	Superficie total cubierta con coagulante
PTFE	Teflón
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
U Pt-Co	Unidades Platino Cobalto

GLOSARIO

Afluyente	Agua captada por un ente receptor.
Aguas residuales	Aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.
Caudal	Volumen de agua por unidad de tiempo.
Coliformes fecales	Parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente.
Contaminación	Permanencia de cualquier impureza material o energética en un medio, a niveles superiores a los normales.
Contaminación ambiental	Contaminación de los medios ambientales con tal magnitud que puede resultar perjudicial para personas, animales, plantas u objetos; produce un deterioro en la calidad de la vida.
Demanda bioquímica de oxígeno	Medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable, durante un período de cinco días y una temperatura de 20 °C.

Demanda química de oxígeno	Medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.
Diseño	Trazo o conjunto de líneas de una figura o un edificio.
Efluente de aguas residuales	Aguas residuales descargadas por un ente generador.
Entes generadores	Persona individual, jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.
Flóculo	Conjunto de partículas pequeñas aglutinadas en partículas más grandes y con mayor capacidad de sedimentación, que se obtiene mediante tratamiento químico, físico o biológico.
Límite máximo permisible	Valor asignado a un parámetro, el cual debe ser excedido en las etapas correspondientes para las aguas residuales.
Muestra	Parte representativa a analizar, de las aguas residuales.
Parámetro	Variable que identifica una característica de las aguas residuales, asignándole un valor numérico.

Precipitación	Formación de partículas sedimentables por adición de sustancias químicas.
Productos químicos	Resultado material útil que posee un material activo proveniente de un proceso.
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
Puntos de descarga	Sitio en el cual el efluente de aguas residuales confluye en un cuerpo receptor o con otro efluente de aguas residuales.
Residuos industriales	Cantidad de residuos que genera una industria es función de la tecnología del proceso productivo, calidad de las materias primas o productos intermedios, propiedades físicas y químicas de las materias auxiliares empleadas, combustibles utilizados y los envases y embalajes del proceso.
Sistema	Conjunto de procesos o elementos interrelacionados con un medio para formar una totalidad encauzada hacia un objetivo común.
Tratamiento de aguas residuales	Cualquier tratamiento físico, químico biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

RESUMEN

En el presente informe se realizó la evaluación del efecto que provoca la concentración del sulfato férrico en el sulfato de aluminio, cuando la mezcla de ambos compuestos es utilizada como coagulante para la clarificación del agua residual producida en un edificio habitacional que previamente ha sido sometida a un tratamiento biológico. La finalidad de esta investigación es conocer cuál de ellos es el que representa la forma más económica de clarificar ese tipo de agua residual y si el sulfato férrico disminuye el costo de la clarificación. Para ello fue necesario determinar cuál era la dosis óptima de cada mezcla de coagulante y el costo que representa dicha dosis.

Para conocer la dosis óptima de cada uno de los coagulantes se realizaron pruebas de jarras, clarificando la muestra con ocho dosis diferentes por cada coagulante evaluado, determinando así que la dosis óptima es la menor dosis con la cual se obtiene la mayor remoción de la turbidez y el color en el agua. Posteriormente, conociendo cual era la dosis óptima de cada uno de los coagulantes, además del precio por unidad de cada uno de ellos, se determinó el precio de clarificar el agua residual con las dosis óptimas. Luego de determinar el precio de clarificar el agua residual con la dosis óptima de cada uno de los coagulantes, se compararon los costos, observando que el coagulante con el menor costo de clarificación fue el sulfato férrico en total ausencia de sulfato de aluminio, siendo el costo de Q 0,28 por metro cúbico de agua residual tratada.

OBJETIVOS

General

Determinar el efecto que tiene la concentración de sulfato férrico en el sulfato de aluminio, cuando una mezcla de estos se utiliza como coagulante para la clarificación del agua proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de un edificio habitacional.

Específicos

1. Caracterizar las muestras de agua proveniente de la PTAR de un edificio habitacional, la cual no posee etapa de clarificación. Dichas muestras serán utilizadas para el estudio.
2. Determinar cuál de las combinaciones propuestas de mezcla de sulfato de aluminio/sulfato férrico es la que produce la mayor eficiencia en la clarificación de aguas residuales, tomando en cuenta las dosis óptimas y la eficiencia en la clarificación.
3. Determinar la reducción de la turbidez mediante la coagulación del agua de una PTAR, en una etapa posterior a las etapas biológicas.
4. Determinar el impacto económico del contenido de sulfato férrico en el sulfato de aluminio, cuando la mezcla se utiliza como coagulante.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

- Las tres combinaciones de la mezcla de sulfato férrico/sulfato de aluminio tienen mayor eficiencia que el sulfato de aluminio libre de sulfato férrico para la clarificación del agua proveniente de la PTAR. Entre ellas, hay una que tiene mayor eficiencia y, por lo tanto, es la proporción recomendable para el proceso de clarificación de agua.

Hipótesis estadística

- H_0 , hipótesis nula: ninguna de las tres mezcla de sulfato férrico/sulfato de aluminio, tiene mejor eficiencia que sulfato de aluminio libre de hierro utilizado como coagulante en la clarificación.
- H_1 , hipótesis alterna: alguna de las tres mezclas de sulfato férrico/sulfato de aluminio tiene mejor eficiencia que el sulfato de aluminio libre de hierro utilizado como coagulante en la clarificación.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento biológico de las aguas residuales es un proceso que, por lo regular, persigue la disminución de la demanda biológica y química de oxígeno (DBO y DQO, respectivamente) en el agua a tratar, así como la disminución de los sólidos sedimentables. También se persigue la disminución de grasas, microorganismos patológicos, regulación del pH, fosfatos, nitrógeno, sólidos en suspensión, entre otros.

Los parámetros que deben controlarse y sus límites dependen del diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en cuestión, diseño que corresponde a los objetivos fijados desde la conceptualización de la planta. En algunos casos, solo se persigue la disminución de las concentraciones de grasas, DBO, DQO y sólidos sedimentables. Otras plantas persiguen la disminución no solo de los sólidos sedimentables, sino también de los sólidos en suspensión, la disminución de microorganismos, fosfatos, nitratos, entre otros.

Los sólidos presentes en el agua constituyen una de las características más importantes y apreciables físicamente. Los sólidos en el agua pueden estar en tres formas: sólidos sedimentables, los cuales pueden ser separados por acción de la gravedad; sólidos en suspensión, que por estar en forma de coloides no es posible separarlos solamente con la acción de la gravedad, y los sólidos disueltos, que son en su mayoría sales, las cuales son muy difíciles de separar, por lo que muchas veces la disminución de estos no está entre los objetivos de una PTAR.

La concentración de los sólidos en suspensión en el agua residual está directamente relacionada con la turbidez y, por lo tanto, con la apariencia del agua tratada. Como se mencionó anteriormente, los sólidos en suspensión son aquellos que se comportan como un coloide dentro del agua a tratar, por lo cual son muy estables y no pueden ser separados solo por sedimentación o flotación (acción de la gravedad). Los coagulantes rompen las fuerzas electroestáticas del coloide, permitiendo de esta forma que los sólidos en suspensión puedan sedimentar o flotar y posteriormente ser separados.

En el mercado guatemalteco actual, el coagulante más comúnmente utilizado para la clarificación de las aguas residuales es el sulfato de aluminio. En la mayoría de casos, el sulfato de aluminio que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales posee cierto contenido de sulfato férrico, el cual proviene de la materia prima utilizada. El sulfato férrico, como tal, también es utilizado como coagulante, por lo tanto, su presencia en el sulfato de aluminio es muy pocas veces perjudicial, incluso, en algunos casos, es agregado deliberadamente al sulfato de aluminio, con el fin de mejorar la eficiencia de esta sal como coagulante.

Si fuese posible demostrar que el contenido de sulfato férrico favorece o, al menos, no perjudica la eficiencia del sulfato de aluminio como coagulante, sería un hecho de mucha importancia, dado que las materias primas que se utilizan para la fabricación del sulfato de aluminio con contenido importante de hierro son mucho más económicas que las que no contienen o contienen muy poco hierro, sobre todo en Centro América que es una región que carece de materias primas con alto contenido de aluminio y bajo contenido de hierro.

La eficacia de un coagulante depende mucho de las características del agua que se clarificará, es decir que un coagulante puede ser bueno para un tipo de

agua residual, pero no para otro. La característica de un agua residual a tratar está influida por muchos factores, por lo que sin experimentación es muy difícil determinar si un coagulante será eficiente o no en el agua residual en cuestión. Para esto se realizan las pruebas de jarras, las cuales consisten en realizar pruebas de coagulación a nivel laboratorio, utilizando el coagulante en estudio y una muestra del agua residual a tratar.

1. ANTECEDENTES

El trabajo de investigación fue realizado por medio de la observación de una serie de pruebas, con el fin de evaluar la hipótesis realizada, basándose en la teoría actualmente aceptada. Debido a la necesidad cada vez más evidente de buscar maneras de reutilizar el agua, se han publicado una serie de investigaciones a nivel mundial respecto al tema, alguna de ellas son las siguientes:

- Gloria Rodríguez Martínez, 1997, trabajo de graduación de posgrado de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: *Comparación de la eficiencia de la coagulación de aguas naturales coloreadas de la región andina con sulfato de aluminio y cloruro férrico*. El estudio pretende ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de las aguas naturales con predominancia de color natural y todo su complejo inorgánico, a través de la simulación del proceso de coagulación, con base en la premisa de que este difiere de aquellas aguas que contienen apenas una fracción aislada de materia orgánica y que se ha considerado que es un buen indicador del comportamiento de los orgánicos naturales presentes en las aguas superficiales.

La investigación se realizó a escala de laboratorio utilizando aguas de una fuente natural, el río Pasto, fuente de abastecimiento de la ciudad de San Juan de Pasto, simulando el proceso de tratamiento convencional, con el fin de evaluar la cinética de la coagulación con el uso de los

coagulantes, sulfato de aluminio y cloruro férrico, bajo diferentes condiciones de pH y dosis de coagulante.

Los resultados obtenidos permiten observar que es posible, a nivel de las estaciones de tratamiento, mediante la construcción y el uso del diagrama de coagulación para remoción de color y turbiedad, obtener mayores eficiencias, minimizando los costos operativos y empleando las dosis óptimas para coagulación efectiva. El sulfato de aluminio fue consistentemente más efectivo en la remoción del color natural que el cloruro férrico, contrario a los resultados reportados en la literatura.

- María Clemencia Corzo Pacheco, 2004, trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico: *Floculación como tratamiento en las aguas residuales de la industria avícola, utilizando sulfato de aluminio en un sistema de simulación en laboratorio*. Se propuso un tratamiento de floculación utilizando sulfato de aluminio a 3 diferentes concentraciones (200 mg/l, 250 mg/l y 300 mg/l), el cual se utilizó en las aguas residuales de la industria avícola de Guatemala. Para efectos de evaluación del tratamiento, se realizaron los análisis de los parámetros fisicoquímicos siguientes: pH, sólidos sedimentables, sólidos en suspensión, sólidos totales, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO5).

El inicio de la parte experimental consistió en la toma de 7 muestras representativas, siendo esta una parte esencial para obtener información precisa y confiable, por lo que el muestreo se realizó tomando las muestras en forma compuesta, es decir que se tomaron varias submuestras.

De acuerdo a los resultados de demanda química de oxígeno en las muestras, se obtuvo una remoción a una concentración de 200 mg/l de sulfato de aluminio de 60,4 % de materia orgánica, con 250 mg/l de sulfato de aluminio la remoción fue de 68,3 % materia orgánica y con 300 mg/l de sulfato de aluminio la remoción fue de 75,4 % de materia orgánica.

Por los datos obtenidos de los parámetros de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), el tratamiento de floculación (utilizando sulfato de aluminio) es efectivo para las aguas residuales de las avícolas, ya que la DQO y la DBO5 obtenidas se encuentran entre los límites permitidos según el Acuerdo Gubernativo núm. 60-89 de la Comisión Nacional del Medio Ambiente *Reglamento de requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas residuales*. La utilización del tratamiento de floculación (sulfato de aluminio) para las aguas residuales de las avícolas es factible técnica y económicamente, ya que a diferentes concentraciones del tratamiento, entre 250 mg/l y 300 mg/l del floculante (sulfato de aluminio), el costo para las dos es de Q 0,01 por ave. Se recomienda que este tratamiento sea incluido entre su proceso de producción, para que sea una mejora continua y sostenible del compromiso ambiental.

- Néstor Alejandro Gómez Puentes, 2005, trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico: *Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación*. Este estudio es una herramienta conceptual y analítica que suministra información relacionada con el tratamiento de agua residual para la remoción de materia orgánica por coagulación – floculación. En general, en el trabajo se hace una descripción teórica de la remoción de materia orgánica por coagulación – floculación en diferentes tipos de aguas residuales, estableciendo los coagulantes, las condiciones

de operación y los métodos de trabajo y optimización que producen las mejores remociones de materia orgánica. Se incluyen, además, dos propuestas de trabajo de investigación aplicables a la realidad colombiana.

- Francisco Sanchez Lavado, 2007, tesis para optar al grado de doctor en ciencias, sección química: *Tratamientos combinados físico-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera*. En la tesis se informa de los resultados obtenidos en el estudio de diferentes tratamientos para la reducción del carácter contaminante y para la depuración de aguas residuales de la industria del corcho. Se han estudiados los procesos fisicoquímicos (coagulación, floculación y sedimentación), los tratamientos de oxidación química (ozono y reactivo Fenton) y el proceso con carbón activo. A partir de los ensayos de laboratorio, se han buscado las condiciones de tratamiento óptimas de cada uno de los procesos estudiados, así como la ventaja de utilizar varios procesos consecutivos.

En los experimentos de coagulación y floculación, se ha procedido a la búsqueda de las condiciones óptimas de operación para el proceso de coagulación floculación, mediante el procedimiento denominado “jar-test”. Para ello se han utilizado aguas con distintas concentraciones de materia orgánica, cuya contaminación oscila según la cantidad de calderadas. Con este método se realiza una serie de ensayos para la determinación de la dosis óptima de coagulante (cloruro férrico y sulfato de aluminio) floculante y otros parámetros como la velocidad de agitación, tiempo de mezcla, temperatura y pH.

2. MARCO TEÓRICO

Al referirse al tratamiento del agua, se tiene claro que es la modificación de las características iniciales de la misma, por medio de diferentes etapas sucesivas, las cuales pueden ser físicas, químicas o biológicas, con el fin de que el agua, al final del proceso, sea apta para un propósito específico o cumpla con ciertas características necesarias.

Entonces hay dos estados del agua a tratar, el inicial y el final. El estado del agua es determinado objetivamente por la caracterización de la misma, la cual consiste en medir varias propiedades relevantes, tanto físicas, químicas como biológicas. Existen varias clasificaciones de los tratamientos del agua, obviamente estos están regidos por el estado (caracterización) inicial en que ingresa el agua al proceso y el estado del agua que se debe alcanzar al final del proceso. Al mismo tiempo, cada una de las etapas del tratamiento del agua, están definidas por un cambio que se desea realizar en una o varias propiedades del agua a tratar.

Dados los argumentos anteriores, para entender claramente el tratamiento del agua, sus diferentes tipos y etapas, en primer lugar se debe conocer y entender la caracterización del agua, en otras palabras, se deben conocer todos los parámetros y valores del agua que constituyen la caracterización.

Este trabajo se interesa principalmente por el agua residual, por eso se enfocará en la caracterización y tratamiento de este tipo de agua. De manera similar, en la parte de tratamiento se enfocará en la etapa de coagulación y floculación.

2.1. Características de las aguas residuales

El agua residual, se define como las “aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas”¹, es decir que son los contaminantes en el agua lo que hace que esta sea un agua residual. Debido a esto, la caracterización de las aguas residuales se suele realizar por medio de la evaluación de la presencia de contaminantes y la cuantificación de los mismos.

Por lo tanto, es fundamental conocer los contaminantes más comunes que se suelen encontrar en las aguas residuales, para entender las características y el procedimiento para tratar las mismas.

En la tabla I se describen los contaminantes más comunes encontrados en las aguas residuales, la fuente de donde provienen y su importancia ambiental.

¹ Decreto Gubernativo 236-2006, artículo 4.

Tabla I. **Contaminantes importantes de las aguas residuales**

Contaminante	Fuente	Importancia ambiental
Sólidos suspendidos.	Uso doméstico, desechos industriales y agua infiltrada a la red.	Causa depósitos de lodo y condiciones anaerobias en ecosistemas acuáticos.
Compuestos orgánicos biodegradables.	Desechos domésticos e industriales.	Causa degradación biológica que incrementa la demanda de oxígeno.
Microorganismos patógenos.	Desechos domésticos.	Causan enfermedades transmisibles.
Nutrientes.	Desechos domésticos e industriales.	Pueden causar eutrofización.
Compuestos orgánicos refractarios.	Desechos industriales.	Pueden causar problemas de sabor y olor; pueden ser tóxicos.
Metales pesados	Desechos industriales, minería, entre otros.	Son tóxicos, pueden interferir con el tratamiento y reúso del efluente.
Sólidos inorgánicos disueltos.	Uso doméstico o industrial.	Pueden interferir con el reúso del efluente.

Fuente: elaboración propia.

2.1.1. **Aguas residuales de tipo ordinario y especial**

En el ámbito de tratamiento de aguas residuales, se suele realizar dos clasificaciones principales, dependiendo del tipo de contaminantes y el origen de los mismos, las aguas residuales de tipo ordinario y las aguas residuales de tipo

especial². Dicha clasificación contempla una serie de condiciones que se podrán encontrar en cada tipo de aguas residuales, como el tipo y concentración de contaminantes y, por lo tanto, el tipo de tratamiento que se debe realizar. Las aguas residuales del tipo ordinaria son aquellas que provienen de actividades cotidianas del ser humano, es decir que este tipo de aguas residuales son producidas en condominios, edificios de habitaciones, centros comerciales, oficinas, centros educativos, entre otros.

2.1.2. Compuestos orgánicos biodegradables y DBO

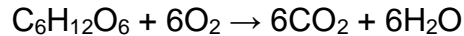
En las aguas residuales, los compuestos biodegradables, tal y como su nombre lo indica, son compuestos que pueden ser fácilmente degradados por procesos metabólicos, como los procesos metabólicos de una bacteria aeróbica o anaeróbica. Pueden encontrarse tanto en forma de sólidos disueltos como sólidos en suspensión; es decir que los sólidos suspendidos pueden constituir una carga orgánica biodegradable. Los compuestos biodegradables suelen estar constituidos de la siguiente manera:

- Proteínas: 40 a 60 %
- Carbohidratos: 25 a 50 %
- Lípidos: aproximadamente 10 %

Las proteínas, los carbohidratos y los lípidos están compuestos principalmente de carbono que puede ser convertido biológicamente a bióxido de carbono. Tal es el caso de la glucosa, que en presencia de 6 moléculas de

² Decreto Gubernativo 236-2006, artículo 4.

oxígeno es convertida biológicamente en 6 moléculas de dióxido de carbono y seis moléculas de agua, como se muestra en la siguiente ecuación:



Al oxígeno consumido en esta reacción se le conoce como demanda biológica de oxígeno carbonácea, debido a que en presencia de los compuesto biodegradables ricos en carbono, las bacterias consumen el oxígeno del agua para metabolizarlos, disminuyendo el oxígeno disuelto en el agua, el cual es fundamental para mantener condiciones ambientalmente adecuadas en los habitas acuáticos. Las proteínas contienen nitrógeno y de forma similar estas ejercen una demanda de oxígeno nitrogenada.³

Debido a lo anterior, el método más común para la cuantificación de materia orgánica biodegradable en el agua es la prueba de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), esto se basa en que, en condiciones controladas de laboratorio, las bacterias oxidarán los compuestos orgánicos en dióxido de carbono, reduciendo el oxígeno disuelto en el agua.

En las aguas residuales de tipo ordinario, la concentración del DBO suele ser menor a 500 mg/l, mientras que en las de tipo especial pueden alcanzar valores de hasta cientos de miles de miligramos por litro.

³ METCALF, H. *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización*. p. 250.

2.1.3. Sólidos suspendidos

Los sólidos en el agua se pueden encontrar tanto en forma disuelta como en forma insoluble o no disuelta; al mismo tiempo, los sólidos no disueltos pueden ser sedimentables o suspendidos. Los sólidos sedimentables pueden ser separados fácilmente del agua residual por medios físicos sencillos, como la decantación; por tal razón, en el ámbito de tratamiento de aguas residuales, los sólidos suspendidos son materia de estudio, pues presentan una mayor dificultad para ser separados del agua y, en muchas ocasiones, su método de tratamiento es el mismo que el de los sólidos disueltos.

Ya sea que estén disueltos o no, en la mayoría de los casos, los sólidos en el agua son de origen orgánico, por lo que representan una demanda biológica de oxígeno, entonces, al momento de separar los sólidos suspendidos en el agua, se está reduciendo a la misma vez la BOD en ella.⁴

2.2. Sólidos en suspensión y turbidez

Una forma sencilla de definir la turbidez en el agua es como la falta de claridad en el agua debido a sólidos en suspensión que evitan que esta pueda transmitir con facilidad la luz, provocando opalescencia. Es decir que la turbidez en el agua está directamente relacionada con la cantidad de sólidos suspendidos en el agua. La relación mencionada anteriormente es tan importante que la turbidez se ha convertido en una forma indirecta y rápida de conocer qué tantos sólidos en suspensión existen en el agua.⁵

⁴ ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. p. 362.

⁵ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del Agua*. p. 67, 69-71.

2.3. Sólidos en suspensión y el estado coloidal

Como se mencionó anteriormente, los sólidos en suspensión, es decir, los sólidos que no pueden ser separados únicamente por la fuerza de gravedad (sedimentación o flotación) en un tiempo aceptable, son de gran interés en las plantas de tratamiento, pues, a diferencia de los sólidos sedimentables, estos no son eliminados en un pretratamiento y están presentes en casi todo el proceso; la mayor parte de dichos sólidos, son coloides. En los coloides existen fuerzas de repulsión entre las partículas, lo cual no permite que dichas partículas puedan unirse para formar una partícula más grande para que esta pueda ser separada fácilmente.

La operación de coagulación desestabiliza los coloides, permitiendo la floculación o formación de floc y consiguiendo la sedimentación de los sólidos. Esto se logra por lo general con la adición de agentes químicos y aplicando energía de mezclado. Es importante no confundir los términos de coagulación y floculación, pues, aunque en muchas ocasiones ambas operaciones se llevan al mismo tiempo, hay una gran diferencia entre ambos procesos; en la sección 2.4. se estudiará a detalle ambos procesos.⁶

2.3.1. Propiedades de los coloides.

Para entender de una mejor manera los procesos de coagulación-floculación, es necesario conocer a profundidad el estado coloidal y las propiedades que lo caracterizan. Entre las propiedades más importantes de los coloides están:

⁶ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. p. 3,4.

- Propiedades cinéticas
- Propiedades ópticas
- Propiedades electrocinéticas
- Propiedades de superficie

2.3.1.1. Propiedades cinéticas de los coloides

Debido a que los coloides son partículas microscópicas, la cinética de estos está fuertemente marcada por la existencia del movimiento browniano, que se presenta de forma constante e irregular. Además, debido a los diferenciales de concentración, se presenta una dispersión que responde a la ley de Fick, y la misma diferencia de concentraciones y su movimiento para la estabilización de la misma provoca una presión osmótica entre la interfaz del agua y el sistema coloidal.

2.3.1.2. Propiedades ópticas de los coloides

Como se mencionó en la sección 2.2., los sólidos suspendidos del sistema coloidal se caracterizan por su relación con la turbidez en el agua, debido a que los sólidos del sistema coloidal dispersan la luz, lo cual se conoce como el efecto de Tyndall. Aunque pueden existir sistemas coloidales que presenten color, dicha dispersión no está relacionada con el color, pues existen disoluciones verdaderas (sistemas no coloidales) que colorean el agua pero no dispersan la luz, debido a que el color está relacionado con la absorción selectiva de ciertas longitudes de onda y no con la dispersión de la luz, como el caso de la turbidez.

2.3.1.3. Propiedades electrocinéticas de los coloides

Quizás la propiedad más importante de los sistemas coloidales para entender la coagulación es la propiedad electrocinética, pues esta es la que describe que, en general, las partículas de los sólidos en los sistemas coloidales presentan cargas eléctricas del mismo signo en su superficie, lo que provoca que dichas partículas se repelan entre sí, dando lugar a la estabilidad de los sistemas coloidales. Dichas cargas pueden ser provocadas por:

- Ionización de la superficie
- Imperfecciones en la superficie de la estructura reticular
- Adsorción preferencial de iones

Esta última razón, de las cargas en la superficie de los coloides, explica porque el pH en la solución de los sistemas coloidales afecta dichas cargas, prevaleciendo, a pH bajo, la carga superficial positiva y, a pH alto, la carga negativa.

2.3.1.4. Propiedad de alta área superficial de los coloides

Como es bien conocido, mientras más finamente dividido se encuentre un sólido mayor será su relación de área superficial por unidad de volumen. Ya que los sistemas coloidales están compuestos por sólidos de muy pequeño tamaño, estos suelen poseer una relación de área superficial extremadamente alta, lo que a su vez permite que sean muy buenos adsorbentes, esto explica porque los sólidos de los sistemas coloidales adsorben fácilmente iones alterando su carga.

2.3.2. Estabilidad de los coloides

Como en todo cuerpo, en los sólidos que componen los sistemas actúan una serie de fuerzas, pero las de mayor interés para estudiar los coloides son las fuerzas de repulsión y atracción. Entre las fuerzas de repulsión se encuentran principalmente las eléctricas e hidratación, mientras que en las de atracción las predominantes son las de la gravedad y las fuerzas de Van der Waals.

Lo que confiere la estabilidad a los sólidos de los sistemas coloidales es el hecho de que las fuerzas de repulsión son mayores que las de atracción, provocando que estos se comporten como una nube estable y difícil de separar en el agua. Esto mismo hace concluir que, para desestabilizar los sistemas coloidales y facilitar la separación de los sólidos del agua, se deben eliminar las fuerzas de repulsión o aumentar las de atracción, de tal forma que las de atracción sean mayores que la de repulsión. Como se verá más adelante, la coagulación se basa en desestabilizar los coloides por medio de la reducción de las fuerzas de repulsión entre los sólidos.⁷

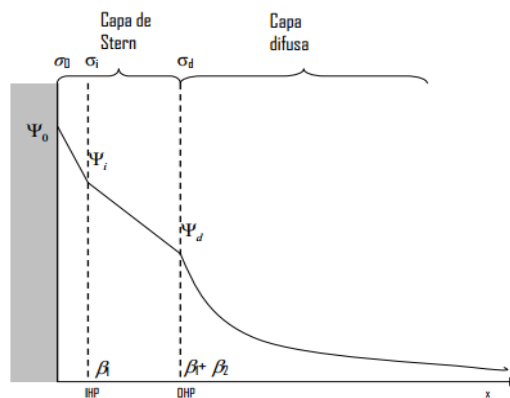
2.3.3. Modelo de la doble capa eléctrica

El modelo de la doble capa eléctrica fue desarrollado para explicar cómo interactúan entre sí las cargas eléctricas, tanto las de la superficie del sólido como las de la interfaz de la solución. Se han desarrollado varios modelos, entre ellos el modelo de Helmholtz, el modelo de Gouy y Chapman y el modelo de Debye y Hückel.

⁷ HIEMIENZ P. C. *Principles of colloid and surface chemistry*. p. 326-402.

La base de todos los modelos anteriormente mencionados es que en los sistemas coloidales existen dos regiones de cargas, la región de la superficie del sólido y la región de la solución, ambas separadas, lo cual provoca la existencia de un potencial eléctrico; potencial similar al existente en las reacciones electroquímicas entre un electrodo y un electrolito, o el potencial existente en un condensador. A su vez, se describe que las regiones están conformadas por otras capas más delgadas, cada una con una característica de carga eléctrica diferente, dichas capas son: la capa fija, la capa de solvente adherida y la capa difusa, tal como se observa en la figura 1:

Figura 1. **Modelo de la doble capa**



Fuente: AHAULLI, Silivia. *Propiedades electrocinéticas de suspensiones coloidales concentradas*. p. 15

2.3.4. Potencial Z

Como se observa en la figura 1, cada capa posee una carga, es decir, la capa fija posee la carga q_1 ; la capa del solvente adherido, la carga q_2 y la capa difusa, la carga q_3 . En el modelo de doble capa se ve a la capa fija y al solvente adherido como una placa con una carga total equivalente a su suma, es decir q_1

+ q_2 , y la capa difusa como otra placa con carga q_3 , ambas capas divididas por el plano de cizalla.

Debido a que existen dos placas con diferentes cargas separadas por un plano, se crea un potencial, a este potencial se le llama potencial Z, y es de principal interés, pues es la forma de medir la fuerza de repulsión existente entre los sólidos de un sistema coloidal. Si el potencial Z es positivo o negativo existirá una estabilidad en el coloide debido a que existe repulsión entre las partículas, sin embargo, si el potencial Z es igual a cero, no existirá repulsión, desestabilizándose el coloide. Cuando el potencial Z es igual a cero se le conoce como punto isoeléctrico y es el que se desea alcanzar durante la coagulación, o lo más cercano posible él.⁸

2.4. Coagulación

Como se mencionó en las secciones anteriores, para facilitar la separación de los sólidos en los sistemas coloidales se deben desestabilizar dichos sistemas. Para ello es necesario llevar el potencial Z lo más cercano posible a cero o, dicho en otras palabras, alcanzar el punto isoeléctrico. En la coagulación se realiza dicha desestabilización al agregar un químico denominado coagulante, el cual, por medio de la alteración de las cargas superficiales de los sólidos, disminuye las fuerzas de repulsión, permitiendo a su vez que las partículas puedan acercarse entre sí, formando un coagulo, dicho proceso dura apenas fracciones de segundo.

⁸FURUSAWA, K. UCHIYAMA, K. *Collaborative studies of zeta-potential measurements and electrophoretic measurements using reference sample, colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*. p. 140, 217-226.

2.4.1. Dosis óptima de coagulante

Como se mencionó en el párrafo anterior, lo que se busca durante la coagulación es acercar el potencial Z a cero. Este potencial puede ser negativo, como en el caso de las aguas de procedencia natural en donde el potencial es entre los -14 y -30 milivoltios. Durante la coagulación de dicha agua, el químico agregado (coagulante) proporcionará las cargas positivas necesarias para aumentar el valor del potencial Z, acercando al punto isoeléctrico. Sin embargo, si se agrega demasiado coagulante, el sistema se carga positivamente, provocando un potencial Z positivo, es decir, el sistema se aleja nuevamente del punto isoeléctrico, produciendo que las partículas vuelvan a dispersarse. Del fenómeno mencionado anteriormente nace la definición de la dosis óptima de coagulante, que básicamente es aquella en la cual se agrega suficiente coagulante para neutralizar las cargas; es decir, una dosis menor no sería suficiente como para neutralizar las cargas y una dosis mayor proporcionaría nuevamente carga eléctrica al sistema.⁹

2.5. Floculación

El proceso de clarificación es el proceso en el cual se busca la reducción de los sólidos suspendidos en el agua, es decir, la reducción de la turbidez. Dicho proceso está dividido a su vez en dos procesos, la coagulación y la floculación, que, debido a que pueden ser llevados a cabo en una misma etapa y con un solo químico, son confundidos frecuentemente; pero se debe estar muy consciente de que conceptualmente son procesos muy distintos.

⁹Sedepal. *Curso de tratamiento de agua, coagulación y floculación*. p. 17, 19, 28, 41.

Como se ha mencionado en la sección 2.4., la coagulación es el proceso por el cual se logra desestabilizar el sistema coloidal, para que las partículas sólidas puedan acercarse entre sí. Mientras tanto, la floculación es el proceso durante el cual las partículas sólidas del sistema coloidal ya desestabilizado se unen para formar un floc, lo cual hace mucho más sencillo su separación ya sea por decantación o flotación. Debido a lo anterior, durante la floculación son influyentes y determinantes las propiedades de transporte del sólido dentro del líquido, es decir viscosidad, densidad, entre otras, y las propiedades de adherencia de los sólidos, pues de esto depende la facilidad con que las partículas viajarán para unirse.

La floculación puede ser mecánica o química, y depende de la naturaleza y la concentración de los sólidos suspendidos a separar. Durante la floculación mecánica, las partículas son transportadas para unirse unas con otras por medio de la agitación. En este caso, las partículas sólidas poseen una alta adherencia entre sí y con solo colisionar unas con otras producen un floc estable. Por otro lado, cuando las partículas no poseen una buena adherencia entre sí, además de realizar la agitación para que las partículas colisionen, se debe agregar un químico que actúa como un aglomerante, permitiendo el crecimiento y la estabilización del floc, a dicho químico se le llama floculante.

Los floculantes por lo regular son polímeros, sin embargo, existen compuestos como las sales de hierro y aluminio que, además de actuar como coagulante desestabilizando las cargas de los coloides al disolverse en el agua al pH correcto, forman compuestos metálicos complejos que actúan como floculantes, aglomerando las partículas de los coloides.

La importancia del floc es más tangible en el proceso de separación por decantación, pues las partículas al unirse aumentan su peso, provocando que precipiten, separándose de esta forma del agua ya clarificada.

Mientras tanto, en la flotación no es tan obvia la importancia del floc, puesto que el sólido no precipita por el aumento de la masa del floc, sino, al contrario, este flota separándose del agua clarificada. Sin embargo, si no existiera un aumento de tamaño del floc, sería muy complicado realizar la separación final de las dos fases.¹⁰

2.6. Coagulantes metálicos

Los compuestos coagulantes más comunes y utilizados para la clarificación de aguas son los coagulantes metálicos, en especial las sales de aluminio, aunque existe mucha investigación e incursión en la utilización de las sales de hierro. Las sales de hierro y aluminio poseen la gran ventaja de actuar como coagulantes y floculantes al mismo tiempo, lo cual implica que hay una reducción considerable en la complejidad y costo del proceso de clarificación, pues este es uno de los casos en donde la coagulación y la floculación se llevan a cabo en la misma etapa y virtualmente en el mismo instante. La propiedad floculante que las sales de hierro y aluminio poseen, se debe a que, cuando estas se disuelven en el agua, forman especies complejas de aluminio y hierro hidratadas, que se comportan como un polímero, el cual aglomera a los sólidos; un ejemplo de estas especies son el $\text{Fe}(\text{O}_2\text{H})_6^{+3}$ y el $\text{Al}(\text{O}_2\text{H})_6^{+3}$

¹⁰ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. p. 3,4.

A pesar de poseer la cualidad de actuar como coagulantes y floculantes al mismo tiempo, en muchos casos la floculación se dificulta debido a la naturaleza o concentración de los sólidos suspendidos y se debe utilizar un floculante adicional. Además, debido a que el aluminio y el hierro son insolubles en algunos rangos de pH, si la clarificación no se lleva a cabo en el rango correcto de pH se pueden tener casos de baja clarificación por disolución del hierro y aluminio en el agua.

2.6.1. Sales de aluminio como coagulantes

Como se mencionó en la sección 2.6., las sales de aluminio, y principalmente el sulfato de aluminio, han sido los compuestos coagulantes más ampliamente utilizados para la clarificación de las aguas, sin embargo, su aplicación está más enfocada en la clarificación de aguas con poca carga contaminante, por lo regular, en aguas que serán potabilizadas para consumo humano. Esto se debe a que forma un floc pequeño y esponjoso, por lo que a altas cargas contaminantes, la separación final del floc se dificulta.

La fuente de aluminio para la producción de los coagulantes, por lo general, son minerales ricos en aluminio con la bauxita y las arcillas. Sin embargo, dichos minerales también poseen altos contenidos de hierro, por lo que deben someterse a un proceso de separación, lo cual encarece el proceso de fabricación. Este problema es más marcado en las arcillas que en la bauxita, por lo que la bauxita es más comúnmente utilizada para la fabricación.

La concentración de aluminio en los coagulantes es expresada como Al_2O_3 (óxido de aluminio o alúmina). Dicha alúmina puede ser combinada o libre; la alúmina combinada es aquella que está en forma insoluble y no interactúa durante la coagulación, mientras que la alúmina libre es aquella que está en

forma de sal, por lo que es soluble e interactúa durante la coagulación. Debido a lo anterior, la pureza de los compuestos de aluminio se expresa como la concentración de alúmina libre.

Independiente de la sal de aluminio que se utilice, el compuesto que hace la función de floculante es el $\text{Al}(\text{OH})_3$ (hidróxido de aluminio), por lo cual, además de la sal de aluminio, deberá existir un ente apartador de iones OH^- (hidroxilo), tal como se describe en la siguiente ecuación:

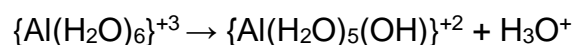


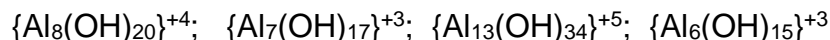
Los iones OH^- también pueden ser proporcionados por la alcalinidad del agua, ya sea alcalinidad por bicarbonato de calcio o carbonato de sodio. A continuación se describe la ecuación con el carbonato de calcio:



En los casos en donde la alcalinidad del agua es baja, se deberá agregar un álcali para proporcionar los iones hidroxilos necesarios. El más comúnmente utilizado es la cal, que se agrega como una lechada, la cual, además de proporcionar los iones hidroxilos, cuando la sal de aluminio utilizada es sulfato de aluminio, forma sulfato de calcio el cual precipita y muchas veces aumenta el peso del floc, favoreciendo la decantación.

Como se mencionó anteriormente, las sales de aluminio producen polímeros metálicos que favorecen la floculación, esto según las siguientes reacciones:





2.6.1.1. Sulfato de aluminio sólido

Es el coagulante más utilizado en el tratamiento de agua y tiene una fórmula química aproximada $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, peso molecular aproximadamente de 600 y pH de 3,5. El sulfato de aluminio 100 % soluble-libre de hierro comercial tiene un contenido mínimo de aluminio del 17 %, expresado como Al_2O_3 , un máximo de hierro de 0,75 % expresado como Fe_2O_3 y un contenido máximo de insolubles del 0,5 %.

Cabe mencionar que en el mercado, existen otras variedades de sulfato de aluminio con más contenido de hierro e insoluble y menor concentración de alúmina, que por lo regular son más económicas que el sulfato de aluminio 100 % soluble y libre de hierro, y no poseen inconvenientes para el tratamiento de agua. La aplicación del sulfato de aluminio debe realizarse en solución, pues esto favorece su dispersión, el sulfato de aluminio se debe inyectar en una zona de mezcla rápida o flujo turbulento.

2.6.1.2. Sulfato de aluminio en solución

Debido a que la aplicación del sulfato de aluminio debe realizarse en forma de solución, este también es fabricado y comercializado como una solución con una concentración de 8,3 % de aluminio expresado como Al_2O_3 , es decir aproximadamente 49 % como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$. Esto es muy conveniente para aquellas empresas que no cuentan con un equipo para la disolución del sulfato de aluminio sólido, sin embargo, encarece los costos de transporte del mismo, pues no solo se transporta sulfato de aluminio, sino que también una buena cantidad de agua.

2.6.2. Sales de hierro como coagulantes

Como se mencionó en la sección 2.6.1.2., el sulfato de aluminio ha sido el coagulante más utilizado para la clarificación de agua. Sin embargo en los últimos años los coagulante a base de hierro han ido desplazando al sulfato de aluminio en muchas aplicaciones. Esto se debe en gran medida a que el costo de las sales de hierro es menor que el de las sales de aluminio. El aumento del uso de las sales de hierro es más notorio en las aplicaciones en donde se desea clarificar aguas residuales, en especial las aguas residuales de tipo especial. Esto se debe a dos razones principales: la primera es que los compuestos de hierro han presentado mejores eficiencias cuando las cargas contaminantes son mayores, debido a que el floc formado suele ser más denso y grande que el floc formado por el sulfato de aluminio; la segunda es que, en algunos casos, las aguas clarificadas con compuestos de hierro suelen presentar leves concentraciones de hierro disuelto, lo cual implica complicaciones cuando dicha agua será utilizada como agua potable, mas no así cuando lo que se busca es depurar un agua residual.

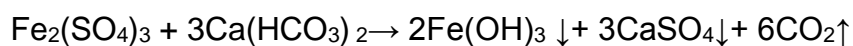
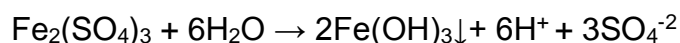
Los dos compuestos de hierro más utilizados como coagulantes son los siguientes:

- Cloruro férrico
- Sulfato férrico

Por lo general, la fabricación de estos compuestos es a partir de chatarra de hierro o mineral de hierro. La materia prima a utilizar depende grandemente de las calidades y abundancias de la chatarra o mineral de hierro en la región.

Aunque para ciertas aplicaciones son utilizados el sulfato ferroso y cloruro ferroso, su utilización es escasa debido a que la alta solubilidad del hidróxido ferroso provoca altas concentraciones de hierro en los efluentes tratados.

Como ya se ha mencionado, las sales de hierro, además de funcionar como coagulantes, poseen la cualidad de flocular el agua, por lo que debe existir un compuesto apartador de alcalinidad para que exista una correcta floculación. Las reacciones de los compuestos de hierro con la alcalinidad son muy similares a las del sulfato de aluminio, a continuación se presentan algunas de las reacciones del sulfato férrico:



2.6.2.1. Sulfato férrico

Es comúnmente fabricado y distribuido en forma de solución concentrada, aunque también se puede encontrar en el mercado en forma sólida, su fórmula química es $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Las soluciones de alimentación suelen tener una concentración de 10 o 5 % y se debe tener cuidado de no diluir las soluciones de sulfato de hierro a menos del 1 % para evitar la hidrólisis y la deposición de hidróxido férrico, el rango de pH de acción se encuentra entre 4 y 7. El sulfato férrico es corrosivo cuando está en solución, y el equipo de disolución y transporte deben ser fabricados de acero inoxidable tipo 316, caucho, plástico, cerámica o plomo.

2.6.2.2. Cloruro férrico

El uso del mismo es reducido debido a que es extremadamente corrosivo, de hecho, se caracteriza por ser uno de los agentes oxidantes más fuertes en la industria, por lo que todos los equipos que entren en contacto con el mismo deben ser altamente resistentes a la corrosión como caucho natural, PTFE (teflón), Viton, Saran, entre otros. Además, el rango de pH de acción es muy corto, lo cual provoca que su correcta aplicación sea difícil, disminuyendo aún más su uso como coagulante. Es comercializado en forma de solución con una concentración del 35 al 45 %, su fórmula química es FeCl_3 . No es aconsejable diluir la solución de cloruro férrico a partir de la concentración inicial a una solución de alimentación más débil, debido a una posible hidrólisis.¹¹

¹¹ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Acuiquímica*. p. 56.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

A continuación se describen las variables que se utilizarán durante la investigación.

Tabla II. Definición de las variables a utilizar

Núm.	Variables	Dimensional	Descripción
1	Sólidos en suspensión	Miligramos por litro (partes por millón)	Materia sólida que se encuentra en el agua y no es posible separarlos por la acción de la gravedad de una forma viable.
2	Turbidez	Unidades nefelométricas de turbidez	Propiedad del agua de dispersar la luz que la atraviesa, se considera que dicha propiedad está directamente relacionada con la cantidad de sólidos en suspensión en el agua.
4	Tipo de coagulante a utilizar	---	Se utilizarán diferentes tipos de coagulantes para verificar cuál es el más efectivo.
5	Dosis de coagulante	Miligramos por litro (partes por millón)	Es la cantidad agregada de coagulante al agua a tratar.
6	Dosis óptima de coagulante	Miligramos por litro (partes por millón)	Es la menor dosis de coagulante a la cual se lleva a cabo satisfactoriamente la coagulación.
7	Tiempo de agitación	Minutos	Tiempo de mezcla rápido del coagulante con el agua a tratar.
8	Velocidad de agitación	Revoluciones por minuto	Velocidad en revoluciones por minuto con la que se realizará la mezcla rápida.

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables a manipular**

Núm.	Variables	Rango de variación
1	Tipo de coagulante a utilizar	---
2	Dosis de coagulante a utilizar	20 - 400 mg/l

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Variables de respuesta**

Núm.	Variables	Rango de variación
1	Sólidos en suspensión	0 - 100 mg/l
2	Turbidez	0 - 500 NTU
3	Dosis menor de coagulante con buen resultado	20-400 mg/l

Fuente: elaboración propia.

3.2. **Delimitación del campo de estudio**

La investigación a realizarse tiene como alcance observar, por medio de métodos cuantitativos, el efecto que tiene la concentración del sulfato férrico en el sulfato de aluminio cuando este producto es utilizado como coagulante. Para

esto se deberá obtener la dosis óptima de coagulante para cada uno de los tipos (mezclas) de coagulante a utilizar. La muestra con la que se realizarán las pruebas será la misma durante toda la investigación.

Como parámetro de medición de la eficiencia del coagulante, se utilizará la turbidez y los sólidos suspendidos, debido a que lo que se desea es disminuir los dos parámetros. El estudio presentará implícitamente un impacto en los costos operativos de la clarificación del agua.

- Naturaleza de las fuentes de estudio

Las fuentes para realizar el estudio no son de carácter constante, por el contrario, varían en todo momento, por lo que, para representar correctamente a este conjunto de datos, estos se expresarán en términos de un rango de validez y no como un valor específico.

- Naturaleza de las variables de control

Las variables de control se expresarán en términos de rangos de validez, haciendo una relación polinómica para intervalos de los valores de las fuentes de estudio contra intervalos para la aplicación de las variables de control.

- Naturaleza de los resultados a obtener

Debido a que se desea obtener agua para ser reutilizada, los resultados que se obtengan deben cumplir con el reglamento 236-2006 sobre descargas de aguas residuales.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Jorge Emanuel Castillo Palencia
- Asesor: ingeniero químico Renato Ponciano
- Investigadores auxiliares para diversos análisis

3.4. Recursos materiales disponibles

- Beakers de 500, 250 y 100 ml.
- Recipiente de 15 galones para tomar muestras
- Varilla de agitación
- Tiras de pH
- Termómetro
- Jeringas de 5 y 10 ml
- Ácido sulfúrico 10 % e hidróxido de sodio al 10 %
- Equipo de jarras necesario para realizar pruebas a nivel laboratorio.
- Turbidímetro, para la medición de la turbidez en NTU
- Mufla para secado
- Papel filtro
- Material de estudio: libros de texto referentes al tema en la Biblioteca Central de la Universidad de San Carlos
- Equipo de computación: computadora de escritorio

3.5. Técnica cuantitativa

A continuación se describe la técnica cuantitativa utilizada durante la investigación.

3.5.1. Procedimiento utilizado para la determinación de la mezcla más eficiente de coagulante

- Se determinó la dosis óptima de coagulante para cada una de las mezclas de sulfato férrico/sulfato de aluminio, por medio de la prueba de jarras.
- Se compararon las dosis óptimas de coagulante para cada una de las mezclas. Con esto se determinará el efecto del sulfato férrico en la eficiencia del sulfato de aluminio, cuando este es utilizado como coagulante.

3.5.2. Procedimiento de la prueba de jarras para la determinación de la dosis óptima de coagulante

La prueba en jarras con coagulantes requiere un agitador de laboratorio de 4 plazas o aparato para la prueba de jarras, así como seis vasos de 2 litros. El procedimiento para llevar a cabo la prueba es:

- Caracterizar la muestra que será utilizada, midiendo el pH, color, turbiedad y sólidos en suspensión.
- Colocar un vaso de 2 litros debajo de cada una de las paletas de agitación.
- Colocar en cada vaso exactamente 2 litros, medidos con una probeta graduada, de una muestra fresca del agua en cuestión.
- Anotar en la hoja de datos la cantidad de coagulante que se debe añadir a cada vaso. Esta cantidad será la misma en cada vaso.
- Con cada pipeta, añadir el coagulante en las cantidades predeterminadas.
- Colocar las paletas de agitación dentro de los vasos, arrancar el agitador y operarlo durante 1 minuto, a una velocidad de 60 rpm.
- Reducir la velocidad al 30 rpm y permitir que la agitación continúe durante unos 15 min.
- Anotar cuánto tiempo transcurre antes de que se empiece a formar un floc.

- Observar qué tan bien resiste el floc, algo de agitación sin fragmentarse.
- Una vez que transcurre el periodo de agitación, detener el agitador y anotar cuánto tiempo transcurre para que el floc se sedimente en el fondo del vaso.
- Después de permitir que el floc se asiente durante 20 min, determinar el color y la turbiedad del sobrenadante y colocarlo en las hojas de recolección de datos.
- En las hojas de registro se deben anotar las dosis, tiempo y velocidad de mezclado, pH, características de crecimiento de los floc y análisis del sobrenadante.
- Después de permitir que el floc se asiente en el fondo durante 30 min, filtrar el sobrenadante con un papel filtro previamente tarado.
- Secar el papel en una mufla durante 12 hrs a 120 °C.
- Pesar el papel, determinar por resta la cantidad de sólidos en suspensión y anotarlo en la hoja de control.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Las muestras fueron recolectadas en depósitos de 15 galones, asegurándose que el depósito esté completamente limpio, para que residuos de tierra y otros contaminantes no afecten su contenido.

Las muestras se caracterizaron el mismo día en que fueron tomadas, de igual forma, las pruebas correspondientes se realizaron el mismo día, para evitar variación en la características del agua por actividad microbiológica. La turbidez inicial del agua residual fue de 951 NTU y el color inicial de 628 U Pt-Co.

Las muestras que se tomaron fueron muestras compuestas. Para conformar la muestra compuesta se tomó 1 galón de muestra cada 5 min y se mezcló dentro del depósito de 15 galones.

Respecto a las características de los coagulantes utilizados, se tomó como base la información suministrada por el fabricante de los mismos.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación se presenta la tabulación, ordenamiento y procesamiento de los datos obtenidos durante la investigación.

3.7.1. Características de los coagulantes utilizados

A continuación se muestran las características de los coagulantes a utilizar, incluyendo información de la concentración de las sales metálicas expresadas como óxidos del metal de la sal, el costo de la solución y su nombre comercial.

Tabla V. **Características del coagulante núm. 1 utilizado en las pruebas**

Núm. Coagulante	1
Nombre comercial	Sulfato de aluminio en solución
Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Al_2O_3 (%m/m)	11,41
Concentración de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Fe_2O_3 (%m/m)	0,00
Suma de concentración de óxidos metálicos	11,41
Costo en el mercado actual (Q/Kg de solución)	4,50

Fuente: hoja técnica del producto.

Tabla VI. **Características del coagulante núm. 2 utilizado en las pruebas**

Núm. coagulante	2
Nombre comercial	Sulfato férrico en solución
Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Al_2O_3 (%m/m)	0
Concentración de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Fe_2O_3 (%m/m)	22,5
Suma de concentración de óxidos metálicos	22,5
Costo en el mercado actual (Q/Kg de solución)	3,20

Fuente: hoja técnica del producto.

Tabla VII. **Características del coagulante núm. 3 utilizado en las pruebas**

Núm. coagulante	3
Nombre comercial	CationMix 5-3
Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Al_2O_3 (%m/m)	4,70
Concentración de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Fe_2O_3 (%m/m)	2,88
Suma de concentración de óxidos metálicos	7,58
R ($\text{Al}_2\text{O}_3/ \text{Fe}_2\text{O}_3$)	1,63
Costo en el mercado actual (Q/Kg de solución)	2,26

Fuente: hoja técnica del producto.

Tabla VIII. **Características del coagulante núm. 4 utilizado en las pruebas**

Núm. coagulante	4
Nombre comercial	CationMix 2-13
Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Al_2O_3 (%m/m)	2,26
Concentración de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Fe_2O_3 (%m/m)	13,05
Suma de concentración de óxidos metálicos	15,31
R ($\text{Al}_2\text{O}_3/ \text{Fe}_2\text{O}_3$)	0,17
Costo en el mercado actual (Q/Kg de solución)	2,75

Fuente: hoja técnica del producto.

Tabla IX. **Características del coagulante núm. 5 utilizado en las pruebas**

Núm. coagulante	5
Nombre comercial	CationMix 8-2
Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Al_2O_3 (%m/m)	8,08
Concentración de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, expresado como Fe_2O_3 (%m/m)	1,43
Suma de concentración de óxidos metálicos	17,59
R ($\text{Al}_2\text{O}_3/ \text{Fe}_2\text{O}_3$)	5,65
Costo en el mercado actual (Q/Kg de solución)	3,39

Fuente: hoja técnica del producto.

3.7.2. Datos obtenidos de las pruebas de jarras

En esta sección se encuentran los datos obtenidos de las pruebas de jarras, en las que se evaluaron ocho dosis diferentes para cada coagulante, observando la turbidez, el color del sobrenadante y el tiempo en obtener una separación estable.

En las tablas se encuentra la información antes mencionada además del dato de la dosis de sales metálicas expresadas como óxidos metálicos, dichos valores fueron obtenidos a partir del dato de la dosis de solución de coagulante utilizado y la concentración de las sales en los mismos. El cálculo se realizó de la siguiente forma.

3.7.2.1. Cálculo de dosis de solución utilizada

$$D_s = \frac{V_s * \rho_s}{V_m}$$

Donde:

D_s = dosis de solución utilizada

V_s = volumen de la solución madre

ρ_s = densidad de solución madre

V_m = volumen de la muestra

3.7.2.2. Cálculo de dosis de sulfato férrico

$$D_{Fe} = [Fe_2O_3] * D_s$$

Donde:

D_{Fe} = dosis de sulfato férrico expresada como Fe_2O_3

$[Fe_2O_3]$ = concentración de sulfato férrico expresada como Fe_2O_3

D_S = dosis de solución utilizada

3.7.2.3. Cálculo de dosis de sulfato de aluminio

$$D_{Al} = [Al_2O_3] * D_S$$

Donde:

D_{Al} = dosis de sulfato de aluminio expresada como Al_2O_3

$[Al_2O_3]$ = concentración de sulfato de aluminio expresada como Al_2O_3

D_S = dosis de solución utilizada

3.7.2.4. Cálculo de dosis de sales metálicas

$$D_{Fe+Al} = D_{Fe} + D_{Al}$$

Donde:

D_{Fe+Al} = dosis de sales metálicas expresadas como óxidos

D_{Fe} = dosis de sulfato férrico expresada como Fe_2O_3

D_{Al} = dosis de sulfato de aluminio expresada como Al_2O_3

Tabla X. **Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 1**

Núm. de coagulante				1		
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color Aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
225,00	225,00	0,00	1 971,95	17,30	203	50
170,00	170,00	0,00	1 489,92	12,90	185	67
120,00	120,00	0,00	1 051,71	9,40	179	92
85,00	85,00	0,00	744,96	6,10	163	124
60,00	60,00	0,00	525,85	5,44	158	146
30,00	30,00	0,00	262,93	11,20	185	157
15,00	15,00	0,00	131,46	13,50	191	178
10,00	10,00	0,00	87,64	15,70	202	178

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 2**

Núm. de coagulante				2		
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color Aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
225,00	0,00	225,00	1 000,00	87,50	550	63
170,00	0,00	170,00	755,56	86,90	550	70
120,00	0,00	120,00	533,33	46,20	380	91
60,00	0,00	60,00	266,67	13,10	130	93
30,00	0,00	30,00	133,33	5,90	190	194
20,00	0,00	20,00	88,89	2,57	130	194
10,00	0,00	10,00	44,44	6,99	110	194
5,00	0,00	5,00	22,22	12,30	90	194

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 3**

Núm. de coagulante				3		
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color Aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
75,00	46,08	28,24	980,39	24,6	240	23
60,00	36,86	22,59	784,31	14,6	210	30
40,00	24,58	15,06	522,88	10,84	180	40
20,00	12,29	7,53	261,44	11,7	190	80
10,00	6,14	3,76	130,72	7,19	130	259
5,00	3,07	1,88	65,36	12,6	196	333
3,00	1,84	1,13	39,22	15,3	219	363
2,00	1,23	0,75	26,14	27,8	228	363

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 4**

Núm. de coagulante				4		
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color Aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
150,00	22,14	127,86	947,09	12,1	251	49
115,00	16,98	98,02	726,10	11,2	240	52
75,00	11,07	63,93	473,55	10,79	170	53
50,00	7,38	42,62	315,70	10,37	200	55
40,00	5,90	34,10	252,56	4,79	160	87
30,00	4,43	25,57	189,42	3,16	70	183
15,00	2,21	12,79	94,71	18,2	320	330
10,00	1,48	8,52	63,14	21,7	327	330

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Características del agua clarificada y tiempo de clarificación, utilizando coagulante núm. 5**

Núm. de coagulante				5		
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color Aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
10,00	8,50	1,50	105,15	2,83	80	360
20,00	16,99	3,01	210,30	2,19	60	183
25,00	21,24	3,76	262,88	2,37	70	140
35,00	29,74	5,26	368,03	3,1	90	37
50,00	42,48	7,52	525,76	4,3	115	37
75,00	63,72	11,28	788,64	4,7	122	35
115,00	97,71	17,29	1 209,25	5,2	131	35
150,00	127,44	22,56	1 577,29	4,9	126	35

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Determinación de la dosis óptima de coagulante

Para cada coagulante se determinó cuál fue su dosis óptima, por medio de la observación de la dosis en la cual la turbidez del sobrenadante era la menor. Al momento de realizar una gráfica de la dosis frente a la turbidez del sobrenadante se observa un comportamiento parabólico, en el cual el vértice de la gráfica es la dosis óptima de coagulante.

3.7.4. Determinación del costo del tratamiento con la dosis óptima de coagulante

Con el fin de conocer cuál es el coagulante con el que el costo del tratamiento es el menor, se procedió a calcular dicho costo, tomando como base

del cálculo un metro cúbico de agua residual y la dosis óptima observada de cada coagulante. Dicho cálculo se realizó por medio de la siguiente ecuación:

$$C_t = D_s * C_s / 1000$$

Donde:

C_t = costo del tratamiento

D_s = dosis de la solución de coagulante

C_s = costo de la solución en el mercado actual

3.8. Análisis estadístico

Esta sección se centra en el análisis estadístico que se realizó, a los datos obtenidos durante la investigación.

3.8.1. Error absoluto en medida de concentraciones de soluciones madre

La concentración de las sales de hierro y aluminio son determinadas por el fabricante de dichas sales, utilizando el espectrofotómetro marca Hanna Instrument, modelo HI83211. En la tabla XV se muestra la incertidumbre en las mediciones de concentración del espectrofotómetro, según el manual de dicho equipo.

Tabla XV. **Error absoluto en concentración de soluciones madre**

Concentración de sal determinada	Error absoluto en concentración madre (%m/m)
Concentración de sulfato férrico, expresada como $[Fe_2O_3]$	$\pm 0,000007$
Concentración de sulfato de aluminio, expresada como $[Al_2O_3]$	$\pm 0,000009$

Fuente: *Manual espectrofotómetro Hanna Instrument HI83211.*

3.8.2. Incertidumbre de equipos de medición

En la tabla XVI, se muestra la incertidumbre de los instrumentos de medición utilizados durante la parte experimental.

Tabla XVI. **Incertidumbre de equipos de medición**

Equipo de medición	Incertidumbre
Pipeta serológica de 1 ml	$\pm 0,005$ ml
Probeta de 500 ml	$\pm 0,005$ l
Turbidímetro Hanna Instrument HI98713	$\pm 0,005$ NTU
Fotómetro de color HI96727	$\pm 0,5$ U Pt-Co
Densímetro	$\pm ,005$ mg/l

Fuente: elaboración propia.

3.8.3. Error relativo en cálculo de dosis de solución utilizada

$$\frac{\delta D_s}{D_s} = \pm \left(\frac{\delta V_s}{V_s} + \frac{\delta \rho_s}{\rho_s} + \frac{\delta V_m}{V_m} \right)$$

Donde:

$\frac{\delta D_s}{D_s} =$ error relativo en el cálculo de dosis de solución madre

$\delta V_s =$ incertidumbre de la pipeta

$V_s =$ volumen de la solución madre

$\delta \rho_s =$ incertidumbre densímetro

$\rho_s =$ densidad de solución madre

$\delta V_m =$ incertidumbre de la probeta

$V_m =$ volumen de la muestra

3.8.4. Error relativo en cálculo de dosis de sulfato férrico

$$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}} = \pm \left(\frac{\delta [Fe_2O_3]}{[Fe_2O_3]} + \frac{\delta D_s}{D_s} \right)$$

Donde:

$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}} =$ error relativo en el cálculo de dosis de sulfato férrico

$\delta [Fe_2O_3] =$ error absoluto en determinación de concentración

$[Fe_2O_3] =$ concentración de sulfato férrico expresada como Fe_2O_3

$\frac{\delta D_s}{D_s} =$ error relativo en el cálculo de dosis de solución madre

3.8.5. Error relativo en cálculo de dosis de sulfato de aluminio

$$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}} = \pm \left(\frac{\delta [Al_2O_3]}{[Al_2O_3]} + \frac{\delta D_s}{D_s} \right)$$

Donde:

$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}} =$ error relativo en el cálculo de dosis de sulfato de aluminio

$\delta [Al_2O_3] =$ error absoluto en determinación de concentración

$[Al_2O_3] =$ concentración de sulfato de aluminio expresada como Al_2O_3

$\frac{\delta D_s}{D_s} =$ error relativo en el cálculo de dosis de solución madre

3.8.6. Error relativo en cálculo de dosis de sales metálicas

$$\frac{\delta D_{Fe+Al}}{D_{Fe+Al}} = \pm \left(\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}} + \frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}} \right)$$

Donde:

$\frac{\delta D_{Fe+Al}}{D_{Fe+Al}} =$ error relativo en cálculo de dosis de sales metálicas

$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}} =$ error relativo en el cálculo de dosis de sulfato férrico

$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}} =$ error relativo en el cálculo de dosis de sulfato de aluminio

3.8.7. Error relativo en determinación de la turbidez de la muestra tratada

$$\frac{\delta T_{mt}}{T_{mt}} = \pm \frac{\delta T}{T_{mt}}$$

Donde:

$\frac{\delta T_{mt}}{T_{mt}} =$ error relativo en la determinación de la turbidez

$\delta T =$ incertidumbre turbidímetro Hanna Instrument HI98713

$T_{mt} =$ turbidez de la muestra tratada

3.8.8. Error relativo en determinación del color de la muestra tratada

$$\frac{\delta C_{mt}}{C_{mt}} = \pm \frac{\delta C}{C_{mt}}$$

Donde:

$\frac{\delta C_{mt}}{C_{mt}} =$ error relativo en la determinación de la turbidez

$\delta C =$ incertidumbre Fotómetro de Color HI96727

$C_{mt} =$ color de la muestra tratada

Tabla XVII. Error relativo en mediciones realizadas para coagulante núm. 1

$\frac{\delta D_{Fe+Al}}{D_{Fe+Al}}$	$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}}$	$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}}$	$\frac{\delta D_s}{D_s}$	$\frac{\delta T_{mt}}{T_{mt}}$	$\frac{\delta C_{mt}}{C_{mt}}$
± 0,01962	± 0,01962	± 0	± 0,020	± 0,0003	± 0,002
± 0,02126	± 0,02126	± 0	± 0,021	± 0,0004	± 0,003
± 0,02405	± 0,02405	± 0	± 0,024	± 0,0005	± 0,003
± 0,02797	± 0,02797	± 0	± 0,028	± 0,0008	± 0,003
± 0,03356	± 0,03356	± 0	± 0,034	± 0,0009	± 0,003
± 0,05258	± 0,05258	± 0	± 0,053	± 0,0004	± 0,003
± 0,09062	± 0,09062	± 0	± 0,091	± 0,0004	± 0,003
± 0,12866	± 0,12866	± 0	± 0,129	± 0,0003	± 0,002

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Error relativo en mediciones realizadas para coagulante
número 2**

$\frac{\delta D_{Fe+Al}}{D_{Fe+Al}}$	$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}}$	$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}}$	$\frac{\delta D_s}{D_s}$	$\frac{\delta T_{mt}}{T_{mt}}$	$\frac{\delta C_{mt}}{C_{mt}}$
± 0,02455	± 0,000	± 0,02455	± 0,025	± 0,0001	± 0,001
± 0,02778	± 0,000	± 0,02778	± 0,028	± 0,0001	± 0,001
± 0,03330	± 0,000	± 0,03330	± 0,033	± 0,0001	± 0,001
± 0,05205	± 0,000	± 0,05205	± 0,052	± 0,0004	± 0,004
± 0,08955	± 0,000	± 0,08955	± 0,090	± 0,0008	± 0,003
± 0,12705	± 0,000	± 0,12705	± 0,127	± 0,0019	± 0,004
± 0,23957	± 0,000	± 0,23957	± 0,240	± 0,0007	± 0,005
± 0,46460	± 0,000	± 0,46460	± 0,465	± 0,0004	± 0,006

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Error relativo en mediciones realizadas para coagulante
número 3**

$\frac{\delta D_{Fe+Al}}{D_{Fe+Al}}$	$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}}$	$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}}$	$\frac{\delta D_s}{D_s}$	$\frac{\delta T_{mt}}{T_{mt}}$	$\frac{\delta C_{mt}}{C_{mt}}$
± 0,04949	± 0,02475	± 0,02475	± 0,025	± 0,0002	± 0,002
± 0,05459	± 0,02730	± 0,02730	± 0,027	± 0,0003	± 0,002
± 0,06735	± 0,03367	± 0,03367	± 0,034	± 0,0005	± 0,003
± 0,10560	± 0,05280	± 0,05280	± 0,053	± 0,0004	± 0,003
± 0,18211	± 0,09105	± 0,09106	± 0,091	± 0,0007	± 0,004
± 0,33513	± 0,16755	± 0,16758	± 0,168	± 0,0004	± 0,003
± 0,53910	± 0,26952	± 0,26958	± 0,270	± 0,0003	± 0,002
± 0,79430	± 0,39711	± 0,39719	± 0,397	± 0,0002	± 0,002

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Error relativo en mediciones realizadas para coagulante
núm. 4**

$\frac{\delta D_{Fe+Al}}{D_{Fe+Al}}$	$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}}$	$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}}$	$\frac{\delta D_s}{D_s}$	$\frac{\delta T_{mt}}{T_{mt}}$	$\frac{\delta C_{mt}}{C_{mt}}$
± 0,05021	± 0,02510	± 0,02510	± 0,025	± 0,0004	± 0,002
± 0,05664	± 0,02832	± 0,02832	± 0,028	± 0,0004	± 0,002
± 0,07133	± 0,03566	± 0,03566	± 0,036	± 0,0005	± 0,003
± 0,09245	± 0,04622	± 0,04622	± 0,046	± 0,0005	± 0,003
± 0,10828	± 0,05414	± 0,05414	± 0,054	± 0,0010	± 0,003
± 0,13468	± 0,06734	± 0,06734	± 0,067	± 0,0016	± 0,007
± 0,24027	± 0,12013	± 0,12014	± 0,120	± 0,0003	± 0,002
± 0,34586	± 0,17293	± 0,17293	± 0,173	± 0,0002	± 0,002

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Error relativo en mediciones realizadas para coagulante
núm. 5**

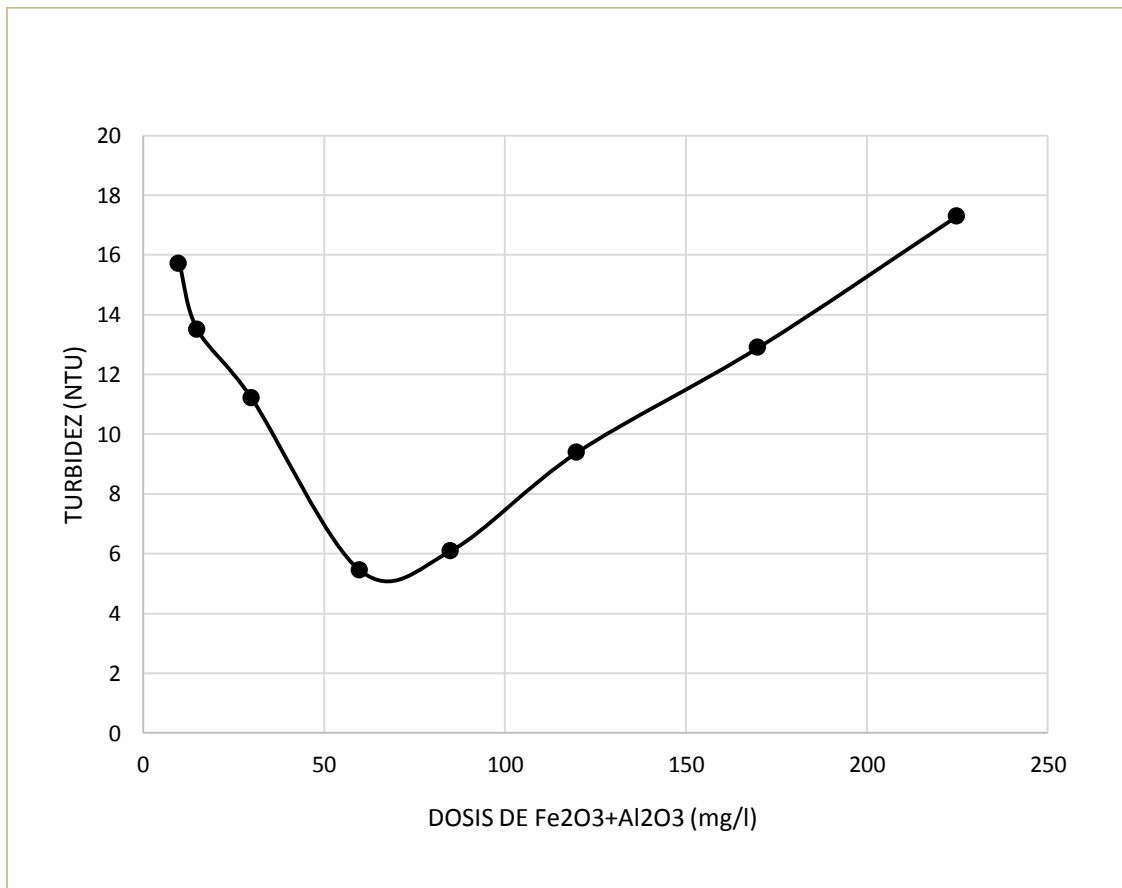
$\frac{\delta D_{Fe+Al}}{D_{Fe+Al}}$	$\frac{\delta D_{Al}}{D_{Al}}$	$\frac{\delta D_{Fe}}{D_{Fe}}$	$\frac{\delta D_s}{D_s}$	$\frac{\delta T_{mt}}{T_{mt}}$	$\frac{\delta C_{mt}}{C_{mt}}$
± 0,21934	± 0,10965	± 0,10969	± 0,110	± 0,0018	± 0,006
± 0,12422	± 0,06210	± 0,06212	± 0,062	± 0,0023	± 0,008
± 0,10519	± 0,05259	± 0,05260	± 0,053	± 0,0021	± 0,007
± 0,08345	± 0,04172	± 0,04173	± 0,042	± 0,0016	± 0,006
± 0,06714	± 0,03357	± 0,03357	± 0,034	± 0,0012	± 0,004
± 0,05446	± 0,02723	± 0,02723	± 0,027	± 0,0011	± 0,004
± 0,04563	± 0,02282	± 0,02282	± 0,023	± 0,0010	± 0,004
± 0,04177	± 0,02089	± 0,02089	± 0,021	± 0,0010	± 0,004

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la investigación.

Figura 2. **Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 1**



Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla X.

Tabla XXII. **Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 1**

Núm. de coagulante				1		
Dosis óptima						
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
60,00	60,00	0,00	525,85	5,44	158	146

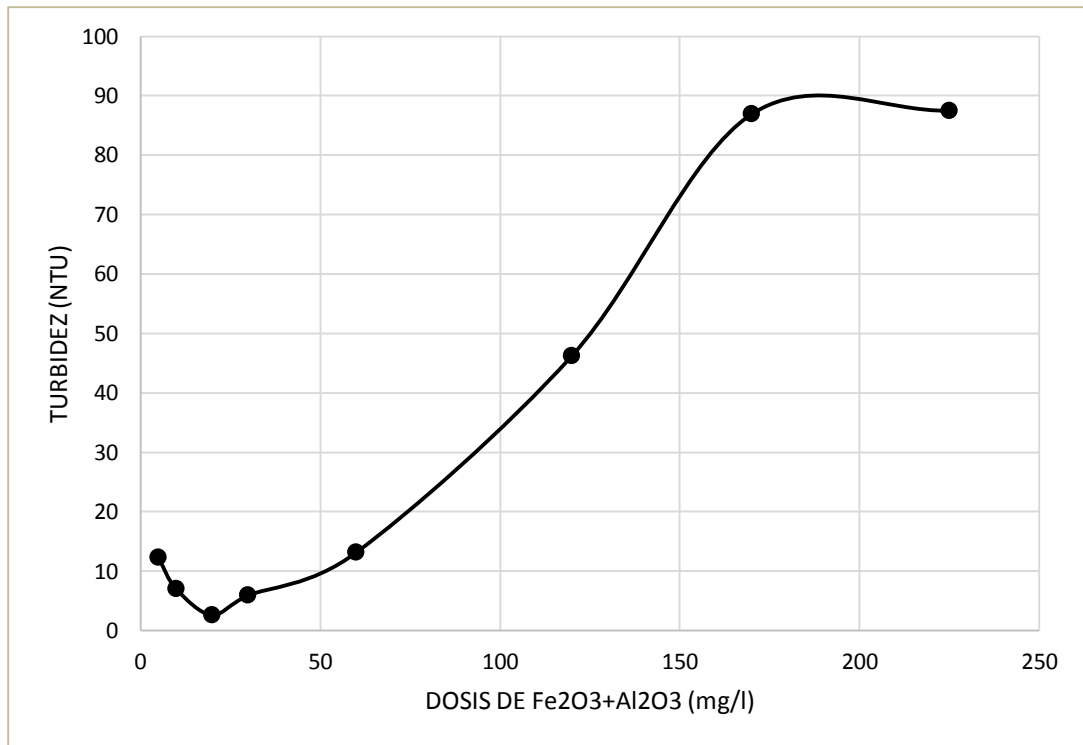
Fuente: elaboración propia a partir de la tabla X.

Tabla XXIII. **Costo de dosis óptima, coagulante núm. 1**

Núm. de coagulante			1
Costos de tratamiento			
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Precio coagulante (Q/Kg sol.)	Costo (Q / m ³ de agua tratada)
60,00	525,85	4,50	2,37

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla X.

Figura 3. **Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 2**



Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla XI.

Tabla XXIV. **Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 2**

Núm. de coagulante				2		
Dosis óptima						
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
20,00	0,00	20,00	88,89	2,57	130	194

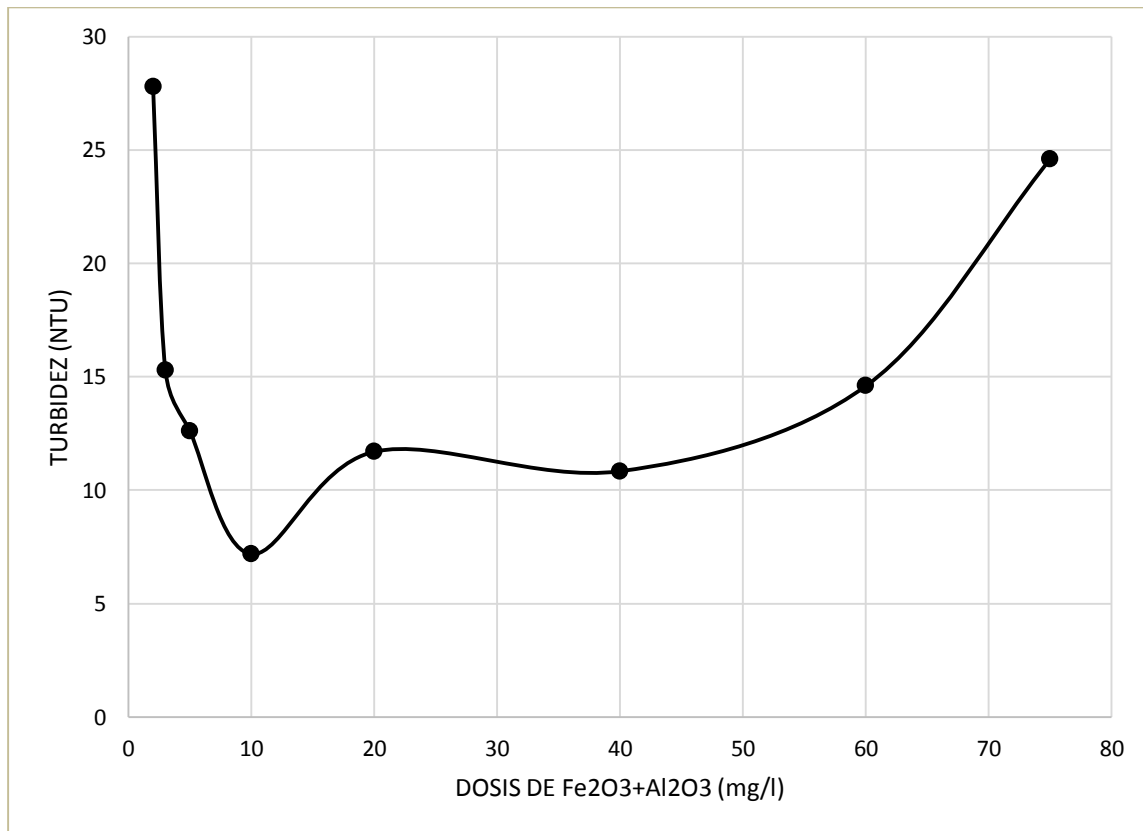
Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XI.

Tabla XXV. Costo de dosis óptima, coagulante núm. 2

Núm. de coagulante			2
Costos de tratamiento			
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Precio coagulante (Q/Kg sol.)	Costo (Q / m ³ de agua tratada)
20,00	88,89	3,20	0,28

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XI.

Figura 4. Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 3



Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla XII.

Tabla XXVI. **Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 3**

Núm. de coagulante				3		
Dosis óptima						
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
10,00	6,14	3,76	130,72	7,19	130	259

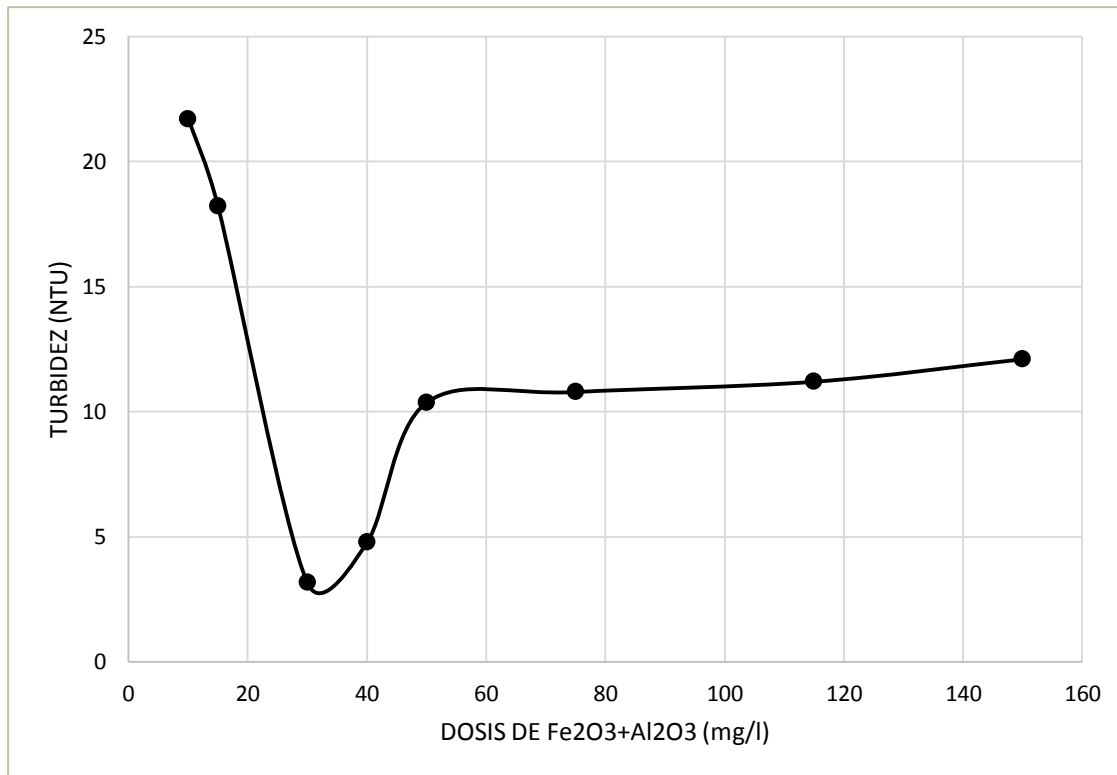
Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XII.

Tabla XXVII. **Costo de dosis óptima, coagulante núm. 3**

Núm. de coagulante			3
Costos de tratamiento			
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Precio coagulante (Q/Kg sol.)	Costo (Q / m ³ de agua tratada)
10,00	130,72	2,26	0,30

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XII.

Figura 5. Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 4



Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla XIII.

Tabla XXVIII. Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 4

Núm. de coagulante				4		
Dosis óptima						
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
30,00	4,43	25,57	189,42	3,16	70	183

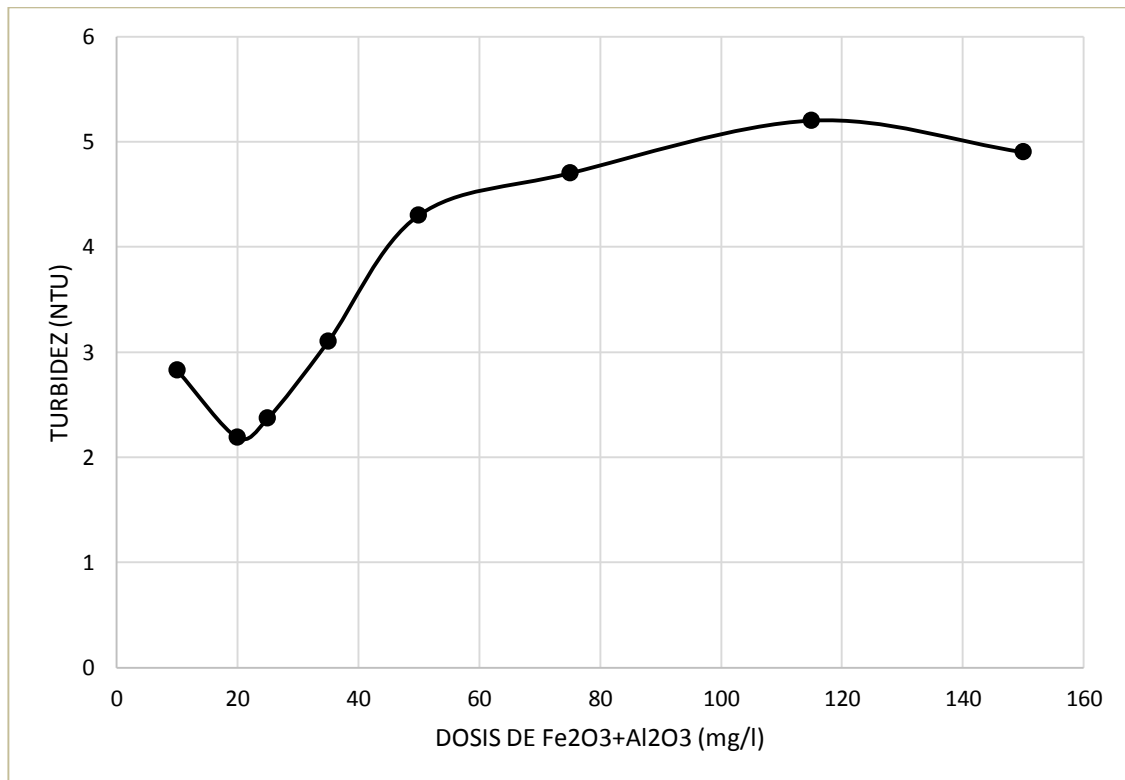
Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XIII.

Tabla XXIX. Costo de dosis óptima, coagulante núm. 4

Núm. de coagulante			4
Costos de tratamiento			
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Precio coagulante (Q/Kg sol.)	Costo (Q / m ³ de agua tratada)
30,00	189,42	2,74	0,52

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XIII.

Figura 6. Comportamiento de la turbidez del agua tratada frente a la dosis de coagulante, utilizando coagulante núm. 5



Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla XIV.

Tabla XXX. **Datos de la dosis óptima, utilizando coagulante núm. 5**

Núm. de coagulante				5		
Dosis óptima						
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, Fe ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Turbidez (NTU)	Color aparente (U Pt-Co)	Tiempo (min)
20,00	16,99	3,01	210,30	2,19	60	183

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XIV.

Tabla XXXI. **Costo de dosis óptima, coagulante núm. 5**

Núm. de coagulante			5
Costos de tratamiento			
Dosis, Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (mg/l)	Dosis, solución (mg/l)	Precio coagulante (Q/Kg sol.)	Costo (Q / m ³ de agua tratada)
20,00	210,30	3,39	0,71

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla XIV.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el artículo 21 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, se especifican los límites de los diferentes parámetros de calidad que debe cumplir el agua residual que ha sido tratada, para poder ser vertida a un cuerpo receptor. Se especifica que el valor máximo del color en el agua residual tratada no debe mayor de 500 U Pt-Co. En la sección de resultados, se observa que el color de las cinco muestras tratadas con los diferentes coagulantes está muy por debajo del límite establecido por el Acuerdo Gubernativo, el valor mayor es de 158 U Pt-Co. En cuanto a la turbidez, el Acuerdo Gubernativo no menciona ninguna restricción; por lo que las cinco muestras cumplen con las restricciones de color y turbidez establecidas por dicho acuerdo.

En cuanto a la turbidez, se puede tomar como referencia la Norma Coguanor 29001 (agua potable), en la cual se establece como límite máximo permisible para la turbidez un valor de 15 NTU. De igual forma, en la sección de resultados se observa que la turbidez de las cinco muestras tratadas es menor al límite establecido por la Norma Coguanor 29001, es decir, en cuanto a la turbidez, las muestras cumplen incluso con la norma de agua potable.

En las tablas XXII, XXIV, XXVI, XXVIII y XXX se observa que el coagulante que presentó la menor dosis óptima fue el núm. 3, siendo de 10 mg/l de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (ver tabla XVI). En la tabla núm. VII se presentan las características de este coagulante, se observa que es una mezcla de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, con una concentración de 4,7 % (expresado como Fe_2O_3), y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, con una concentración de 7,65 % (expresado como Al_2O_3).

El coagulante que presentó la segunda menor dosis óptima fue el núm. 2, con una dosis óptima de 20 mg/l de Fe_2O_3 (ver tabla XXIV). En la tabla VI, se aprecia que este coagulante es sulfato férrico, al contrario del caso anterior, no es una mezcla de sulfato férrico con sulfato de aluminio, la concentración del sulfato férrico en este coagulante es de 22,5 % (expresado como Fe_2O_3).

Al igual que el coagulante núm. 2, el coagulante núm. 5 presentó una dosis óptima de 20 mg/l (ver tabla XXX), con la marcada diferencia que este coagulante sí es una mezcla de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, dicha mezcla posee una concentración de sulfato férrico de 8,08 % (expresado como Fe_2O_3) y una concentración de sulfato de aluminio de 7,65 % (expresado como Al_2O_3).

El coagulante núm. 4 presentó una dosis óptima de 30 mg/l (ver tabla XXVIII), es decir, una dosis óptima mayor que los coagulantes núm. 3, núm. 2 y núm. 5. Al igual que el caso anterior, este coagulante es una mezcla de sulfato férrico y sulfato de aluminio; dicha mezcla posee una concentración de sulfato férrico de 13,05 % (expresado como Fe_2O_3) y una concentración de sulfato de aluminio de 2,26 % (expresado como Al_2O_3).

El coagulante núm. 1, es el que tiene la mayor dosis óptima, siendo esta 60 mg/l (ver tabla XXII). Este coagulante es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a una concentración de 11,41 % (expresado como Al_2O_3).

De los párrafos anteriores se realiza la siguiente observación: los coagulantes que son mezcla de sulfato férrico y sulfato de aluminio, presentaron una menor dosis óptima que el sulfato de aluminio, es decir, el sulfato férrico disminuye la dosis óptima necesaria para la clarificación de aguas residuales de tipo ordinario. Sin embargo, el efecto del sulfato de aluminio en el sulfato férrico

no es muy marcado, a excepción del coagulante núm. 3, el sulfato férrico requirió menor dosis óptima.

En las tablas XXII, XXIV, XXVI, XXVIII y XXX se observa que el coagulante que removió más turbidez del agua en su dosis óptima fue el núm. 5, presentado una turbidez final de 2,19 NTU. Mientras que la segunda menor turbidez final la presentó el agua tratada con el coagulante núm. 2, siendo esta de 2,57 NTU. La diferencia en ambos resultado de turbidez es pequeña, únicamente de 0,38 NTU.

El coagulante núm. 3 fue el que presentó la menor dosis óptima, pero con la menor eficacia en la remoción de turbidez, el agua tratada con dicho coagulante presentó una turbidez final de 7,19 NTU. La diferencia en la turbidez final del agua tratada con el coagulante núm. 3 y núm. 2 fue de 4,62 NTU, una diferencia muy grande.

En la tabla XXVIII se observa que el agua tratada con el coagulante núm. 4 presentó una turbidez final de 3,16 NTU; mientras que en la tabla XXII se observa que el agua tratada con el coagulante núm. 1 presentó una turbidez final de 5,44 NTU. En ambos casos la turbidez final es mayor que la de los coagulantes núm. 2 y núm.5.

A partir de estos datos se puede aseverar que el sulfato de aluminio no mejora significativamente la eficiencia en la remoción de la turbidez del sulfato férrico, al contrario, pareciera que en la mayoría de los casos disminuye dicha eficiencia. Si esto mismo se ve desde el punto de vista del sulfato de aluminio, el sulfato férrico, en concentraciones bajas de la mezcla, aumenta la eficiencia, pero cuando la concentración es muy grande sucede lo contrario. Es decir, las mezclas no presentan una mejora significativa en la eficiencia de remoción de la turbidez respecto al sulfato de aluminio y sulfato férrico sin mezclar.

En las tablas XXIII, XXV, XXVII, XXIX y XXXI se observa el coagulante con menor costo en el tratamiento del agua residual, expresado en quetzales por metro cúbico, es el coagulante núm. 2 con un costo de 0,28 Q/m³. El coagulante con la menor dosis óptima fue el núm. 3, pero el costo fue de 0,30 Q/m³, ligeramente mayor que el del coagulante núm. 2. El coagulante núm. 5 es el coagulante con mejor eficiencia en la remoción de la turbidez, pero su costo es de 0,71 Q/m³, 2,5 veces más caro que el núm. 2, pero la mejora en la turbidez es muy ligera (0,38 NTU) respecto a la del coagulante núm. 2, lo cual no justifica el aumento de 2,5 veces el costo.

Todo lo anterior nos conduce a aseverar lo siguiente: el mejor coagulante fue el núm. 2, es decir, sulfato férrico. Lo que rechaza la hipótesis de que una mezcla de sulfato férrico y sulfato de aluminio presenta mejores resultados en la clarificación de agua residuales; sin embargo, se demuestra que el sulfato férrico presenta mejores resultados que el sulfato de aluminio para dicho fin.

El único aspecto en el que las mezclas fueron más eficaces que el sulfato férrico, fue en la remoción del color en el agua, presentado hasta un color de 60 U Pt.-Co. (coagulante núm. 5), frente a un color final de 130 U Pt.-Co. del coagulante núm. 2. Sin embargo, cuando se reutiliza el agua residual, es común aplicar un colorante para diferenciarla del agua fresca, por lo que el color final en el agua pasa a un segundo plano.

CONCLUSIONES

1. Los tres coagulantes constituidos por una mezcla de sulfato férrico y sulfato de aluminio no solo presentaron una menor dosis óptima que el sulfato de aluminio libre de hierro, sino que también presentaron costos menores; por lo que se concluye que la hipótesis inicial es válida, pues las tres mezclas de coagulantes fueron más eficientes que el sulfato de aluminio libre de hierro.
2. El sulfato férrico sin mezclar con el sulfato de aluminio (coagulante núm. 2) fue el coagulante con el menor costo de tratamiento del agua ($0,28 \text{ Q/m}^3$), además de haber presentado la segunda mejor eficacia en la remoción de la turbidez (reduciendo hasta 2,57 NTU); por lo que se concluye que es el coagulante más apto para el tratamiento del agua estudiada.
3. La clarificación por medio de sulfato de aluminio y sus mezclas demostró ser altamente eficaz para la reducción de la turbidez en el agua residual proveniente de la PTAR, reduciendo la misma hasta 2,19 NTU, lo que permite que el agua tratada pueda ser reutilizada en ciertos servicios en el edificio habitacional.
4. Se determinó que el sulfato férrico mejoró significativamente la eficiencia del sulfato de aluminio como coagulante para la clarificación de aguas residuales de tipo ordinario, disminuyendo la dosis óptima de 60 mg/l (sulfato de aluminio) hasta 10 mg/l (mezcla núm. 2).

5. La mezcla de sulfato de aluminio y sulfato férrico núm. 3, con una relación 1,62:1, fue la más eficiente en la clarificación del agua residual, con una dosis óptima de 10 mg/l.
6. La mezcla de sulfato de aluminio y sulfato férrico núm. 5, con una relación 1,17:1, fue la que presentó una mejor eficacia en la remoción de la turbidez, disminuyéndola hasta 2,16 NTU.
7. El precio del sulfato férrico con respecto al sulfato de aluminio es significativamente menor, por lo que las mezclas de sulfato de aluminio y sulfato férrico presentaron un costo menor en el tratamiento del agua residual en cuestión, disminuyendo el costo del tratamiento de Q 2,37/m³ hasta Q 0,30/m³, es decir, disminuyendo casi 8 veces el costo del tratamiento.
8. El coagulante que presentó el menor costo del tratamiento del agua residual fue el sulfato férrico, con un costo de Q 0,28/m³, seguido por el coagulante núm. 3, con un costo de Q 0,30/m³.
9. El sulfato de aluminio sin mezclarse con sulfato férrico (coagulante núm. 1) fue el coagulante con el costo del tratamiento más elevado, siendo de Q 2,37/m³.
10. Según la sección 3.6 la muestra del agua residual proveniente de la PTAR sin la etapa de clarificación, presento una turbidez de 951 NTU y un color de 628 U Pt-Co, por lo que según la norma 29001 de Coguanor el agua no es apta para utilizarse en los servicios de un edificio.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar el sulfato férrico como coagulante en la clarificación del agua residual posterior a una PTAR, puesto que presenta un costo menor que el sulfato de aluminio y sus mezclas, además que presenta una eficacia alta en la disminución de la turbidez del agua, permitiendo reutilizarla.
2. Evaluar fuentes más económicas de mineral de aluminio, pues esto permitirá producir sulfato de aluminio con menores costos; lo que a su vez permitirá disminuir los costos en la clarificación del agua residual, utilizando dicha sal y sus mezclas como coagulantes.
3. En el momento de iniciar un proyecto de clarificación de agua por medio de coagulación, buscar y evaluar distintos tipos de coagulantes diferentes al sulfato de aluminio.
4. En el momento de evaluar coagulantes para un proyecto de clarificación de agua, tomar en cuenta el sulfato férrico y sus mezclas con otras sales, debido a su bajo costo respecto a otros coagulantes.
5. En una investigación futura, se podría comparar la reducción de otros parámetros, como DBO, metales pesados, fósforo, nitrógeno, entre otros.
6. Con la evaluación de otros parámetros, se podría determinar si el agua resultante de la clarificación podría considerarse para un reúso no únicamente en riego, sino también para servicios de sanitarios, u otros.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: McGraw-Hill y ACODAL, 2000. Tom. I.
2. Coguanor. *Norma 29001*. Guatemala: Coguanor, 2010. 75 p.
3. CORZO PACHECO, María Clemencia. *Floculación como tratamiento en las aguas residuales de la industria avícola, utilizando sulfato de aluminio en un sistema de simulación en laboratorio*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 450 p.
4. FURUSAWA, K.; UCHIYAMA, K., *Collaborative studies of zeta-potential measurements and electrophoretic measurements using reference sample, colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*. 2a ed. Alemania: Elseiver, 1998. 725 p.
5. GARAY, J.; PANIZZO, L.; LESMES, L.; RAMÍREZ, G.; SÁNCHEZ, J. *Manual de técnicas analíticas de parámetros físico-químicos y contaminantes marinos*. 3a. ed. Colombia: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, 1993. 113 p.

6. GÓMEZ CÁRDENAS, Mirna Concepción. *Optimización del tratamiento fisicoquímico de desechos industriales en una empresa manufacturera de jabones*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2000. 132 p.
7. GÓMEZ PUENTES, Néstor Alejandro. *Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2005. 95 p.
8. HIEMIENZ, P. C. *Principles of colloid and surface chemistry*. 4a ed. Alemania: Marcel Dekker, 1977. 376 p.
9. LÓPEZ NAVARRO, Juan Antonio. *Caracterización de las aguas residuales de una industria de fabricación de fragancias, y propuesta de tratamiento y disposición de las mismas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2002. 137 p.
10. LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. Cuba: Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, 2006. 73 p.
11. METCALF, H. *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. 3a. ed. México: McGraw Hill, 1996. Vol. 1
12. República de Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 236-2006*, 2006. 50 p.

13. RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, Gloria. *Comparación de la eficiencia de la coagulación de aguas naturales coloreadas de la región andina con sulfato de aluminio y cloruro férrico*. Trabajo de graduación de postgrado de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle de Colombia, Unidad de Post Grado de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1997. 152 p.
14. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del agua*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002. 576 p.
15. SÁNCHEZ LAVADO, Francisco. *Tratamientos combinados físico-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera*. Tesis de doctor en Ciencias, Sección Química. Universidad de Extramadura, Facultad de Ciencias, 2007. 253 p.
16. Sedepal. *Curso de tratamiento de agua, coagulación y floculación*. Perú: Sedepal, 2004. 43 p.

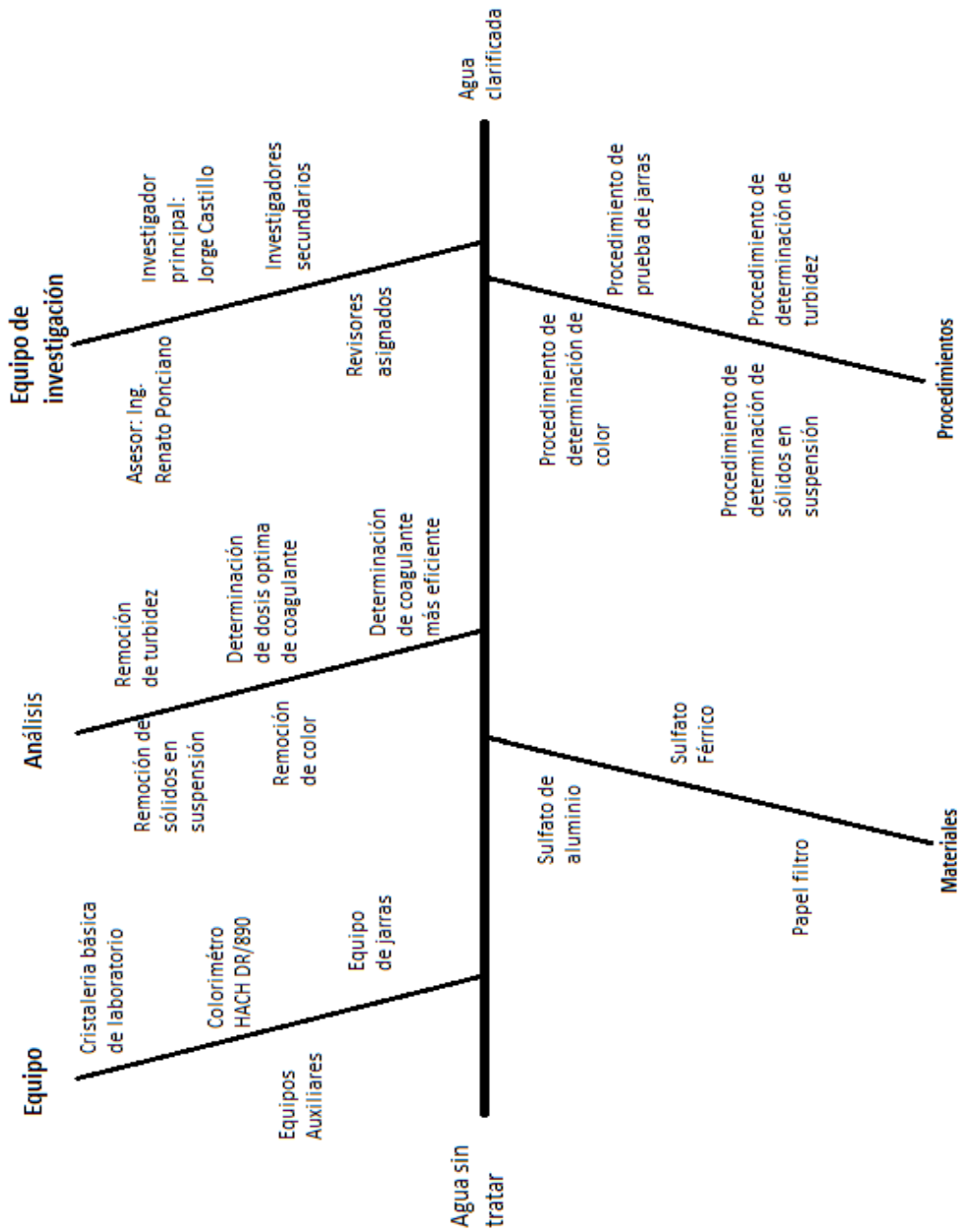
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos

ÁREA	CURSO	TEMAS
Química	Química III	Principios básicos, formas de expresar concentración.
	Química IV	Mezclas homogéneas, introducción al equilibrio químico, introducción a la cinética química, sistemas coloidales.
	Análisis cualitativo	Equilibrio homogéneo, equilibrio ácido-base, Equilibrio iónico de hidrólisis: hidrólisis ácida, solubilidad de sales y su relación con el pH.
	Análisis cuantitativo	Equilibrio homogéneo, equilibrio de iones metálicos, método estequiométrico, método gravimétrico, métodos volumétricos
Operaciones unitarias	Flujo de fluidos	Agitación y mezcla de fluidos, transporte de fluidos, medidores de flujo,
	Laboratorio de operaciones unitarias 1	Medidores de flujo, bomba centrífuga, tubería y accesorios
Fisicoquímica	Cinética química	Leyes de velocidad de reacción química, obtención y análisis de datos de velocidad de reacciones químicas
Complementaria	Estadística	Manejo estadístico de datos, desviación media, varianza, análisis de resultados.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia