

ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE DEL MUNICIPIO DE RIONEGRO

HUGO ALEXANDER LIZCANO
LAURA MARGARITA MÉNDEZ BOHÓRQUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

2006

ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE DEL MUNICIPIO DE RIONEGRO

HUGO ALEXANDER LIZCANO
LAURA MARGARITA MÉNDEZ BOHÓRQUEZ

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR: HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ
Ph. D Ingeniero Químico
Profesor: Escuela de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

2006

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

PRODUCTOS QUIMICOS PANAMERICANOS. Especialmente al Gerente de Ventas Ingeniero Alexis Granados por su apoyo y colaboración durante la realización de este proyecto.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE RIONEGRO. Por permitir la realización de este estudio.

INGENIERO HUMBERTO ESCALANTE. Por su dirección y dedicación.

LABORATORIO DE CONSULTAS INDUSTRIALES. Por su colaboración técnica en la investigación.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO TECNICO ECONÓMICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE RIONEGRO*

AUTORES: LAURA MARGARITA MÉNDEZ BOHÓRQUEZ; HUGO ALEXANDER LIZCANO BALLESTEROS.**

PALABRAS CLAVES: Coagulación, coagulantes, Sulfato de aluminio, (PTAP) planta de tratamiento de agua potable, dosis óptima.

DESCRIPCIÓN

El trabajo de grado que se presenta a continuación tuvo como objetivo principal estudiar en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Rionegro, la viabilidad para el cambio del coagulante Sulfato de Aluminio tipo A Sólido por coagulantes líquidos. Para esto fueron desarrolladas pruebas que involucraban todas y cada una de las variables que intervienen en los costos de tratamiento de una planta de potabilización y en la calidad del agua.

Además de los estudios anteriores se realizó un análisis de costos para determinar la factibilidad de la nueva alternativa desde el punto de vista económico.

La etapa experimental involucro como primera medida la determinación de dosis óptimas de los tres coagulantes que serian posteriormente validados. Para esto se estudiaron en el periodo comprendido entre Abril y Octubre de 2005 diferentes muestras de agua a las cuales se les realizaron las pruebas correspondientes a la determinación de variables operacionales para dicha planta. Después de determinadas las dosis óptimas se procedió a validar los tres sulfatos de Aluminio mediante la determinación de tiempo óptimo de mezcla rápida, gradiente y tiempo de floculación, velocidad de sedimentación e influencia del pH en la coagulación. Por último se desarrollo el análisis económico con base en los costos de: transporte y consumo de coagulante, equipos e instalaciones.

Los resultados obtenidos demostraron que el Sulfato Líquido resulto mas eficiente desde el punto de vista técnico que el sulfato Sólido con el que se trabaja actualmente en el proceso de coagulación floculación en la planta de este municipio.

Sin embargo los resultados obtenidos en el estudio económico no fueron tan favorables ya que para la implementación de Sulfato de Aluminio líquido se requiere una inversión muy alta que comprende instalaciones y equipos con los que no cuenta la planta en la actualidad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química
Director: Humberto Escalante

SUMMARY

TITLE: STUDY ECONOMIC TECHNICIAN OF THE PLANT OF TREATMENT OF DRINKING WATER OF THE MUNICIPALITY DE RIONEGRO.

AUTHOR: LAURA MARGARITA MÉNDEZ BOHÓRQUEZ; HUGO ALEXANDER LIZCANO BALLESTEROS.

KEY WORDS: coagulation, coagulant, aluminum sulfate, plant of treatment of drinking water, optimum dose.

DESCRIPTION

The grade work that is presented next had as main objective to study in the plant of treatment of drinking water of the municipality of Rionegro, the viability for the change of the clotting Aluminum sulfate type A Solid for liquid coagulants. For this they were developed tests that involved all and each one of the variables that intervene in the costs of treatment of a potabilización plant and in the quality of the water.

Besides the previous studies one carries out an analysis of costs to determine the feasibility of the new alternative from the economic point of view.

The experimental stage involves as first measure the determination of optimum dose of the three coagulants that you/they would be validated later on. For this they were studied in the understood period between April and October of 2005 different samples of water to which were carried out the tests corresponding to the determination of operational variables for this plant. After certain the optimum doses you proceeded to validate the three aluminum sulfates by means of the determination of good time of quick mixture, gradient and flocculating time, sedimentation speed and it influences of the pH in the clotting. Lastly you development the economic analysis with base in the costs of: transport and consumption of clotting, teams and facilities.

The obtained results demonstrated that the Liquid Sulfate is but efficient from the technical point of view that the Solid sulfate with which one works at the moment in the process of clotting flocculation in the plant of this municipality. However the results obtained in the economic study were not so favorable since for the implementation of liquid Aluminum sulfate a very high investment is required that understands facilities and teams with those that it doesn't count the plant at the present time.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 TÉCNICAS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	3
2.2 PROCESOS UNITARIOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA	3
2.2.1 Coagulación	4
2.2.1.1 Mecanismos De Coagulación	5
2.2.1.2 Tipos De Coagulantes	5
2.2.2 Floculación	6
2.2.3 Sedimentación	7
2.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	8
2.3.1 Selección del diseño de experimentos	8
3. ETAPAS METODOLÓGICAS	9
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
3.2 RECONOCIMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE RIONEGRO	10
3.2.1 Presedimentador	10
3.2.2 Canaleta parshall para mezcla rápida y aforo	11
3.2.3 Dos floculadores de Tabiques fijos	11
3.2.4 Sedimentadores	11
3.2.5. Filtros	11
3.2.6 Tanque De Almacenamiento	12
3.3 ETAPA EXPERIMENTAL	12
3.3.1 Variables de Operación	13
3.3.2 Determinación de la Dosis de cada Coagulante	14
3.3.3 Validación de los coagulantes	15
3.3.3.1 Tiempo óptimo de mezcla rápida	15

3.3.3.2 Tiempos y gradientes óptimos de floculación	15
3.3.3.3 Velocidad de sedimentación de las partículas	15
3.3.3.4 Influencia del pH en la coagulación	16
3.4 Análisis de resultados experimentales	16
3.5 Análisis económico	16
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	17
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES	17
4.1.1 Determinación de la dosis óptima de cada coagulante	17
4.1.1.1 Coagulante Sulfato Líquido Tipo: A	18
4.1.1.2 Coagulante Sulfato Líquido Tipo: B	21
4.1.1.3 Coagulante Sulfato Sólido Tipo: A	23
4.1.2 VALIDACIÓN DE LOS COAGULANTES	25
4.1.2.1 Tiempo de mezcla rápida	25
4.1.2.2 Tiempo y gradiente de floculación.	28
4.1.2.3 Velocidad de Sedimentación.	30
4.1.2.4 Influencia del pH en la Coagulación.	31
4.2 ANÁLISIS ECONÓMICO	32
4.2.1 Condiciones de operación de la planta	33
4.2.2 Costo directo de operación	34
4.2.3 Inversión fija para la implementación de sulfato de aluminio Líquido	34
5. CONCLUSIONES	35
6. BIBLIOGRAFIA	36

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 3.1 Variables de operación para las pruebas de jarras	13
Tabla 4.1 Distribución de los experimentos para determinar dosis de Sulfato Líquido A.	18
Tabla 4.2. Análisis de Varianza para dosis de coagulante líquido A.	19
Tabla 4.3 Distribución de los experimentos para determinar dosis de Sulfato Líquido B.	21
Tabla 4.4 Análisis de Varianza para dosis de coagulante líquido B.	22
Tabla 4.5 Distribución de los experimentos para determinar dosis de Sulfato Líquido A.	23
Tabla 4.6 Análisis de Varianza para dosis de coagulante Sólido A.	24
Tabla 4.7 Distribución de los experimentos para determinar Tiempo de mezcla rápida.	26
Tabla 4.8 Análisis de Varianza para determinación de tiempo de mezcla Rápida.	26
Tabla 4.9 Análisis de Varianza para determinación de gradiente de Floculación y mejor coagulante	28
Tabla 4.10 Intervalos de pH óptimos de coagulación para cada coagulante	31
Tabla 4.11 Costo de coagulantes P.Q.P	32
Tabla 4.12 Costos de transporte	33
Tabla 4.13 Instalaciones y Equipos	33
Tabla 4.14 Condiciones de operación para el Sulfato A Líquido	33
Tabla 4.15 Condiciones de operación para el Sulfato A Sólido	33

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1 Etapas en el proceso de potabilización de agua.	12
Figura 4.1 Gráfico de medias con el método LSD para determinar Dosis de coagulante.	20
Figura 4.2 Gráfico de medias con el método LSD para determinar Dosis de coagulante.	20
Figura 4.3 Diagrama de cajas para determinación de dosis de coagulante.	21
Figura 4.4 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.	22
Figura 4.5 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.	23
Figura 4.6 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.	25
Figura 4.7 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.	25
Figura 4.8 Gráfico de medias con el método LSD para determinar tiempo mezcla rápida.	26
Figura 4.9 Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo a la Turbidez.	27
Figura 4.10 Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo a Color.	27
Figura 4.11 Determinación del gradiente de floculación de acuerdo a Turbidez Residual.	29
Figura 4.12 Determinación del gradiente de floculación de acuerdo a Color Residual.	30
Figura 4.13 Velocidad de sedimentación para todos los coagulantes.	30
Figura 4.14 Intervalo óptimo de PH para cada coagulante.	31

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo 1 Fichas técnicas de los sulfatos de aluminio P.Q.P	37
Anexo 2 Normas de calidad del agua potable según el decreto 475 de 1998	38
Anexo 3 Procedimiento para determinar tiempo de mezcla rápida	41
Anexo 4 Procedimiento para determinar tiempo y gradiente de floculación	42
Anexo 5 Procedimiento para determinar velocidad de sedimentación	44
Anexo 6 Procedimiento para determinar la influencia del ph en la Coagulación	45
Anexo 7 Análisis de varianza para determinación de dosis óptima de sulfato de aluminio tipo a líquido.	46
Anexo 8 Análisis de varianza para determinación de dosis óptima de sulfato de aluminio tipo b líquido.	47
Anexo 9 Análisis de varianza para determinación de dosis óptima de sulfato de aluminio tipo a sólido.	48
Anexo 10 Determinación de tiempos óptimos de mezcla rápida para agua con turbidez 5.7 ntu y color 55 upc.	49
Anexo 11 Determinación de tiempos óptimos de mezcla rápida para agua con turbidez 8.7 ntu y color 69 upc.	50
Anexo 12 Determinación de tiempos y gradientes de floculación para agua con turbidez 5.7 ntu y color 55 upc.	51
Anexo 13 Determinación de tiempos y gradientes de floculación para agua con turbidez 8.7 ntu y color 69 upc.	52
Anexo 14 Gráfico de medias para determinación de gradiente de floculación	53
Anexo 15 Velocidad de sedimentación de partículas para agua con Turbidez de 5.7ntu y 55upc de color.	54

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los municipios que cuentan con redes de suministro de agua para consumo humano tienen el inconveniente para producir agua de buena calidad en grandes cantidades. Por esta razón, municipios y departamentos son responsables de diseñar métodos y etapas de potabilización que puedan ser fácilmente adaptadas a las condiciones de desarrollo de las regiones, de fácil operación y a un bajo costo de tratamiento ya que este servicio será pagado por el consumidor. Por esta razón, es importante que el costo total de operación de una planta de potabilización sea mínimo y que se disponga de recursos humanos y técnicos adecuados para garantizar a la comunidad su obtención y capacidad de pago. ⁽¹⁾

El factor anterior, sumado al crecimiento poblacional en el país indica que en un futuro cercano habrá necesidad de una ampliación en los sistemas de potabilización, así como la optimización de sus procesos de tratamiento y la implementación de nuevas tecnologías que no solo mejoren la calidad del agua suministrada sino que reduzca los costos de producción de la misma.

Los componentes básicos y primarios en un sistema de potabilización de agua convencional que determinan en gran parte las condiciones de operación de la planta son los procesos de mezcla rápida y coagulación floculación. De este depende en gran medida la mayor o menor eficiencia de los procesos siguientes a este y los costos totales de tratamiento. ⁽⁸⁾

La empresa colombiana Productos Químicos Panamericanos (P.Q.P) es uno de los fabricantes más importantes de productos químicos inorgánicos en Colombia además de ser el más grande productor de sulfatos de Aluminio en la región andina suramericana. Estos sulfatos metálicos de tipo inorgánico se emplean en diferentes actividades industriales como tratamiento de aguas para potabilización,

industrial y residual.

P.Q.P se ha interesado en demostrar la eficacia de sus coagulantes líquidos en procesos de purificación de agua y ha escogido a la planta de tratamiento de agua del municipio de Rionegro para probar la capacidad desestabilizante del sulfato de Aluminio líquido en el proceso de coagulación floculación comparada con la obtenida actualmente mediante el uso de sulfato sólido esperando una reducción de los costos de tratamiento.

De esta manera, en este trabajo se persiguieron dos objetivos los cuales fueron evaluar el comportamiento de tres sulfatos de aluminio en el proceso de potabilización del agua y determinar la viabilidad del cambio del sulfato de Aluminio sólido utilizado actualmente en la planta de Rionegro por un Sulfato líquido.

Los resultados obtenidos demuestran que para la planta del municipio de Rionegro, el sulfato de aluminio tipo A líquido ofrece una mayor eficiencia en la remoción de turbidez y color en el agua cruda tratada, además presenta ventajas sobre el sulfato de aluminio sólido en el proceso de potabilización como son: comportamiento eficaz en un rango más amplio de pH del agua cruda, mayor velocidad de sedimentación de los flocs producidos lo cual aumenta el tiempo de las carreras de filtración y reducción en las dosis de coagulante.

Para el proceso de potabilización de agua del municipio de Rionegro resulto viable técnicamente la implementación de Sulfato de Aluminio tipo A Líquido, frente a el coagulante actualmente utilizado; sin embargo la reducción en costos no fue significativa frente a la inversión que acarrearía el uso de este coagulante en la planta.

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se dan a conocer los fundamentos teóricos de operación en las plantas de tratamiento de agua potable de tipo convencional.

Además se describen los Principios básicos del diseño de experimentos empleado para el desarrollo del presente trabajo.

2.1 TÉCNICAS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Para tratar el agua es necesario de antemano conocer: El tipo de fuente, la calidad del agua de la misma, las características organolépticas, fisicoquímicas y microbiológicas esenciales, los estudios de tratabilidad para seleccionar los procesos de potabilización, el procedimiento de muestreo para el control de calidad, las características de producción que debe cumplir la fuente para el abastecimiento que se requiere, la protección que debe suministrarse a este recurso y otros aspectos adicionales.⁽¹⁾

Dentro de las diferentes técnicas usadas para el tratamiento de agua municipal, encontramos procesos simples por los cuales se toma el agua del pozo esterilizándole por cloración y bombeándola directamente al sistema de distribución. Para el manejo de aguas superficiales que contengan sólidos suspendidos en cantidad apreciable, los dispositivos de mezclado rápido son seguidos por un floculador de mezclado lento y por un estanque de sedimentación proporcionando la retención de agua para el asentamiento de la mayor parte de los sólidos Floculados⁽⁵⁾.

2.2 PROCESOS UNITARIOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

Los procesos que intervienen en el tratamiento de agua potable incluyen: la aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

En el desarrollo del presente trabajo se estudian detalladamente los procesos de

coagulación y floculación.

2.2.1 Coagulación

Las aguas naturales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, las cuales pueden ser orgánicas o inorgánicas, estas partículas pueden tener un tamaño y densidad tal que puedan eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas de ellas tienen una carga eléctrica superficial que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y evitando su sedimentación. Estas partículas tienen un tamaño que suele estar entre 0.2 y 1 μ m, y se denominan coloides; Estas especies coloidales halladas en el agua cruda incluyen arcillas, sílice, hierro y otros metales pesados, color y sólidos orgánicos como los residuos de organismos muertos ⁽⁵⁾.

Los coloides en una suspensión están sometidos a factores estabilizantes y destabilizantes. Los factores desestabilizantes son aquellas fuerzas que provocan repulsión entre las partículas como lo son las fuerzas electrostáticas y la propia hidratación, y los factores estabilizantes son las fuerzas de atracción que dan lugar a la unión, entre estas figuran el movimiento Browniano y las fuerzas de menor grado como la fuerza de gravedad; de tal manera que lo que se busca es que los factores estabilizantes predominen sobre los desestabilizantes, para lograr juntar estas partículas y de esta forma crear una partícula de mayor tamaño que pueda ser removida por sedimentación y/o filtración. Esto solo se puede lograr con la ayuda de un agente químico bajo condiciones de mezcla adecuadas.

La coagulación, es un proceso para incrementar la tendencia de estas partículas a agregarse, mediante la adición de un agente químico llamado coagulante, el cual produce especies químicas capaces de desestabilizar las partículas coloidales suspendidas en el agua.

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones químicas y físicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. Debido a esto, éste proceso se efectúa en

unidades de mezcla rápida donde se busca la dispersión rápida y efectiva del coagulante en el agua.

El proceso de coagulación consta esencialmente de tres pasos fundamentales: formación del coagulante, desestabilización de la partícula e interacción del material orgánico natural (NOM) con el coagulante que ocurre durante e inmediatamente después de la dispersión en la mezcla rápida; las colisiones entre partículas que producen agregación o formación de flóculos ocurren principalmente en el proceso de floculación.

La coagulación es un proceso complejo que se ve afectado por los siguientes factores: Características del agua, Tipo de coagulante, Dosis de coagulante, pH de coagulación, Condiciones de mezcla, Temperatura ⁽³⁾.

2.2.1.1 Mecanismos De Coagulación ⁽⁸⁾

La desestabilización de las partículas suspendidas se puede lograr mediante cuatro mecanismos de coagulación: Compresión de la doble capa, Adsorción y neutralización de carga, Adsorción y formación de puente químico, Incorporación o de barrido

En el tratamiento de agua, la coagulación con sales de hierro y aluminio se da fundamentalmente por dos mecanismos: adsorción de especies insolubles hidrolizadas del coagulante sobre el coloide y subsecuente desestabilización (adsorción-neutralización), e inmersión del coloide en un precipitado de hidróxido (barrido) (Jonson et al, 1983).

2.2.1.2 Tipos De Coagulantes

En el proceso de coagulación se utilizan dos diferentes tipos de coagulantes, los cuales son: coagulantes metálicos y polielectrolíticos (llamados también ayudantes de coagulación). Los coagulantes metálicos se pueden dividir en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios.

Las sales de aluminio son la más conocidas y usadas en Colombia; entre estas se encuentran el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el policloruro de

Aluminio, de las cuales el sulfato de aluminio conocido como alumbre es el más usado en Colombia por su bajo costo y disponibilidad en el mercado. Este se encuentra en forma granular o líquida y hay dos tipos (tipo A y B).

2.2.2 Floculación

Después de que las partículas coloidales han sido desestabilizadas, estas tienen que trasladarse dentro del líquido para hacer contacto unas con otras y aglutinarse. A este proceso se le denomina FLOCULACIÓN. La rapidez con que esto ocurra va a depender del tamaño de las partículas en relación con el grado de turbulencia del líquido, la concentración de partículas y el grado de desestabilización (coagulación), que es lo que permite que las condiciones sean efectivas para producir adherencia. Este proceso se lleva a cabo con una agitación suave y continua del agua, con el propósito de que se vayan formando los flocs que luego serán removidos por sedimentación.

Los contactos entre partículas pueden por tres mecanismos diferentes o su combinación:

- Contactos por el movimiento térmico (Browniano) del líquido, que solo influye en las partículas menores a $1\mu\text{m}$, a este mecanismo se le conoce como *floculación pericinética* ⁽⁶⁾.
- Contactos por turbulencia del líquido efectivo solo con partículas mayores a $1\mu\text{m}$, este mecanismo se denomina *floculación ortocinética*
- contactos ocurridos durante la caída de los flocs sedimentables, entre partículas de diferente tamaño, densidad y velocidad de sedimentación, lo cual ocurre con flocs macroscópicos partículas primarias mayores de $50\mu\text{m}$, a lo cual se le conoce como *floculación de barrido*.

De las tres formas de contacto para la formación de los flocs, la más significativa es la ortocinética, o sea la que se produce debido al grado de turbulencia del agua; Esta turbulencia es inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas como las provocadas por paletas giratorias por ejemplo.

La turbulencia es el factor responsable de la mayor parte de la floculación, y debido

a esto se debe definir un nuevo factor que afecta la frecuencia de contactos ortocinéticos, este es el gradiente de velocidad laminar (du/dy) y se representa como G , este término se refiere a la diferencia en la velocidad en distintos puntos del seno del agua, debido a la agitación de la misma.

Von smoluchowski, quien en 1916 presentó la teoría de la floculación pericinética, demostró que el gradiente de velocidad es directamente proporcional a la frecuencia de los choques.

El concepto de gradiente de velocidad du/dy fue utilizado por Von smoluchowski como parámetro para caracterizar la turbulencia y su influencia en la intensidad de colisiones.

En la práctica actual el gradiente de velocidad (G), es el único parámetro de diseño para los floculadores reales.

2.2.3 Sedimentación

Después de que ha ocurrido la floculación en el agua, el siguiente paso es separar los sólidos del líquido, es decir los flocs formados y que están suspendidos en el agua.

La sedimentación es un proceso de separación sólido-líquido utilizado en el tratamiento de agua para bajar la concentración de sólidos en el agua, aprovechando su diferencia de densidad, con una velocidad de caída tal que estos pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable.

Como resultado los filtros pueden operarse mas fácilmente y a buen costo para producción de agua filtrada de buena calidad.

Existen muchos procesos de sedimentación y variantes de estos, y cada una tiene ventajas y desventajas. El proceso mas apropiado para una aplicación particular dependerá del agua a tratar así como de las circunstancias y exigencias locales.

2.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS ⁽⁴⁾

El diseño de experimentos consiste en planear un conjunto de pruebas experimentales, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones válidas y objetivas acerca de un sistema o proceso. Éste permite optimizar la información generada acerca de un proceso, en relación con los objetivos planeados. En otras palabras, el diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso.

Resulta especialmente útil para crear calidad desde la fase de diseño del proceso; pero también permite lograr mejoras sustanciales en procesos ya establecidos.

2.3.1 Selección del diseño de experimentos

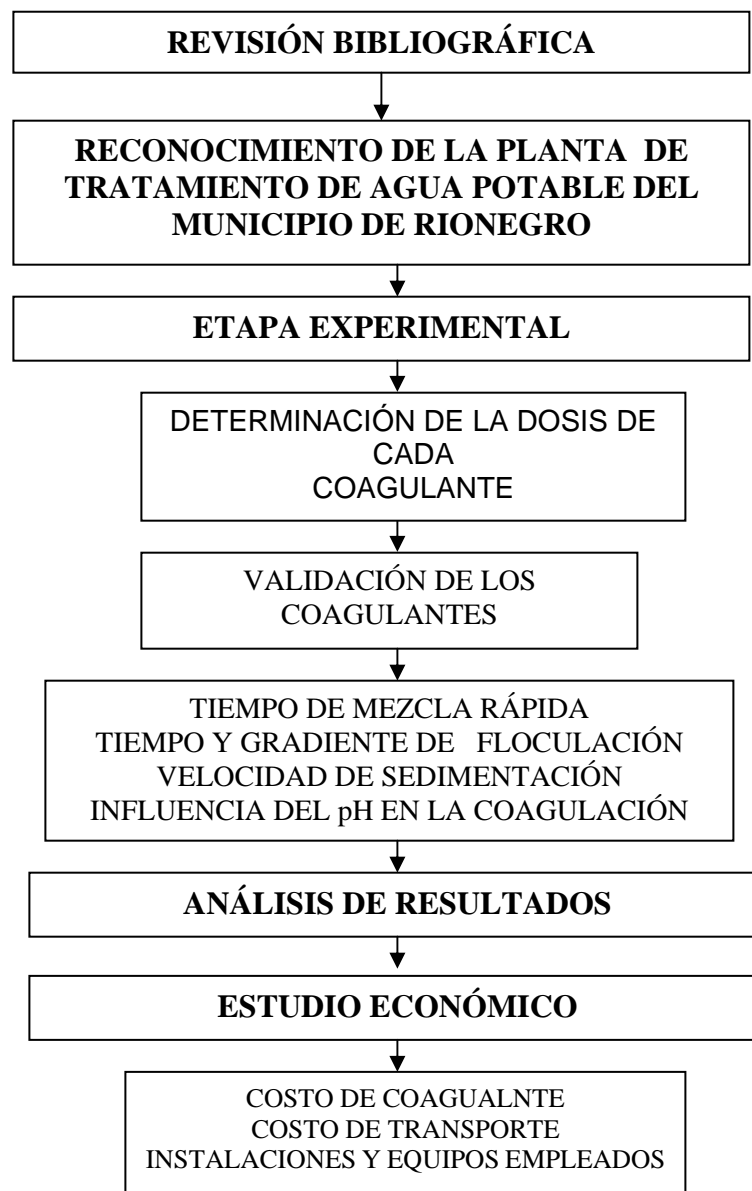
En el contexto de un problema de investigación o mejora surge la necesidad de realizar alguna comparación de tratamientos con el fin de elegir la mejor alternativa de las varias que existen, o por lo menos para tener una mejor comprensión del comportamiento de la variable de interés en cada uno de los distintos tratamientos. Para el desarrollo experimental del presente trabajo la comparación de tres tipos de coagulantes, se hizo con el fin de determinar cual de estos proporciona las mejores características de calidad al agua, sin dejar atrás los factores económicos que se ven involucrados.

Partiendo de este principio, se escogió un diseño de experimentos en bloques completos al azar ⁽⁴⁾ para cada una de las determinaciones que se involucraban en el desarrollo de las pruebas; la palabra completo en el diseño se debe a que en cada bloque se prueban todos los tratamientos, es decir que los bloques están completos.

3. ETAPAS METODOLÓGICAS

En este capítulo se describe detalladamente las fases metodológicas empleadas para el desarrollo del presente trabajo; el cual consta de un estudio técnico económico para la decisión del cambio de coagulante en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Rionegro.

Mediante el siguiente diagrama de bloques se esquematiza la metodología que se siguió en el presente trabajo.



3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa implicó el conocimiento de las pruebas y ensayos de las principales variables que influyen en los costos de tratamiento en una planta de potabilización y en la calidad del agua tratada, se consultaron además las leyes del ministerio de salud que establecen los criterios de calidad para el agua potable y vertimientos.⁽⁶⁾ Posteriormente fue planeada la secuencia de ensayos necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

3.2 RECONOCIMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE RIONEGRO

La planta de tratamiento de este municipio recibe 21 L/s de agua provenientes de la quebrada el Bramón.

Ésta planta es de tipo convencional y se compone de las siguientes unidades:

- Un presedimentador
- Canaleta parshall para mezcla rápida y aforo
- Dos floculadores de Tabiques fijos
- Dos sedimentadores
- Tres filtros de lecho filtrante de arena y antracita.
- Tres Tanques de almacenamiento con una capacidad de almacenamiento de 1050 m³.

3.2.1 Presedimentador

El sistema de presedimentación esta localizado entre el punto de captación del agua y la planta de tratamiento, su volumen útil de es de 1000 m³ y está provisto en sus fondos de un sistema de tolvas para el almacenamiento de lodos.

El proceso se inicia cuando el caudal de agua entra al tanque y mientras esta va pasando a baja velocidad, se va produciendo la sedimentación de las partículas y materiales pesados, los cuales se depositan en el fondo para luego ser sacados como lodos por los conductos de desagüe.

3.2.2 Canaleta parshall para mezcla rápida y aforo

El agua proveniente de la presedimentación se recibe en una cámara de llegada y esta pasa a la canaleta parshall, en la cual ocurre la dosificación y mezcla del coagulante (sulfato de Aluminio tipo A Sólido) debido a la turbulencia producida en el resalto hidráulico. Este proceso se conoce como MEZCLA RÁPIDA y tiene por finalidad poner en contacto íntimo y mezclar de forma homogénea y continua, el coagulante aplicado con la masa de agua en tratamiento, para que la coagulación y floculación sean lo mejor posible.

3.2.3 Dos floculadores de Tabiques fijos

El caudal de agua a ser tratada, luego de la aplicación y mezcla rápida de los coagulantes en la canaleta parshall, pasa por el canal de entrada del primer tanque de floculación donde el agua disminuye su velocidad de acuerdo a la distancia entre tabiques evitando de esta manera la ruptura del floc formado.

Posteriormente el agua llega al segundo tanque de floculación donde la distancia entre tabiques es mayor, reduciendo la velocidad del agua para garantizar una floculación efectiva.

3.2.4 Sedimentadores

Los dos sedimentadores de la planta de Rionegro son de tipo acelerados de flujo ascendente con paneles de placas inclinadas, y un sistema de evacuación de lodos. El agua floculada es distribuida por dos canales localizados a lo largo del sedimentador y el agua fluye ascendentemente mientras ocurre la sedimentación. El agua sedimentada es recogida por la parte superior en unos canales recolectores, los cuales llevan el caudal recogido a un canal transversal localizado al final de los de los sedimentadores, encargado de conducir el agua hasta el canal de repartición de los filtros.

3.2.5. Filtros

Los filtros están ubicados inmediatamente después de los sedimentadores.

Cada filtro esta dividido en dos celdas de iguales dimensiones, las cuales tienen

como lecho filtrante una capa de grava, una de arena, y en la parte superior una capa de antracita, estas tres capas están montadas sobre un fondo falso. Posteriormente el agua tratada pasa por una etapa de cloración donde son eliminados los organismos patógenos que no se eliminaron anteriormente.

3.2.6 Tanque De Almacenamiento

El tanque de almacenamiento de la planta de Rionegro tiene un volumen aproximado de 1300 m³; a este llega el agua totalmente tratada para su posterior distribución.

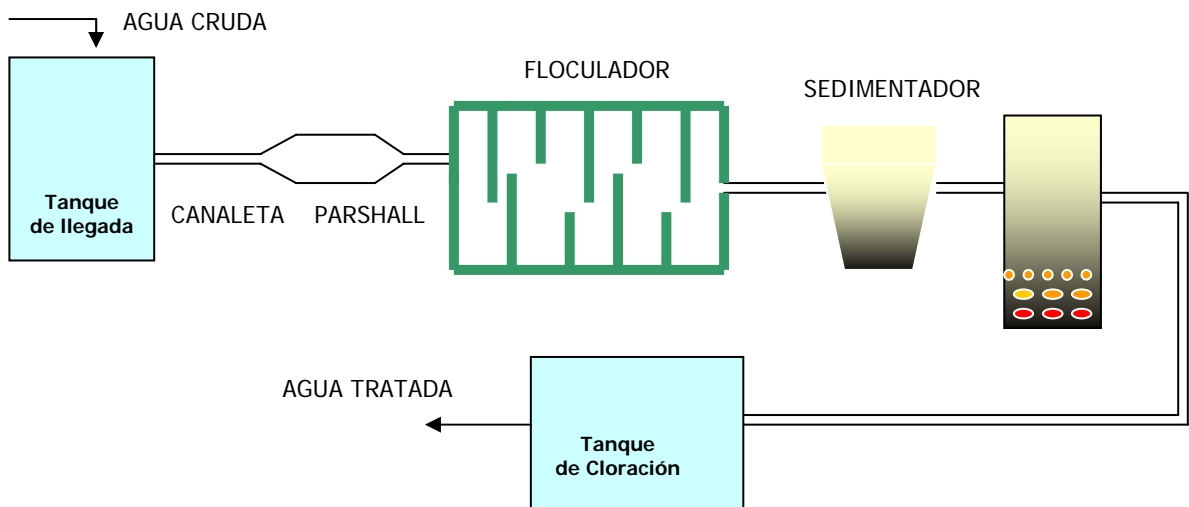


Figura 3.1 Etapas en el proceso de potabilización de agua.

3.3 ETAPA EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental de este trabajo consta de diversos ensayos que son realizados en un sistema de simulación del proceso de coagulación-floculación y de análisis fisicoquímicos.

Estos ensayos se realizaron simultáneamente para el sulfato de aluminio A Sólido, coagulante usado actualmente en la planta de Rionegro, Sulfato de Aluminio B Líquido y el Sulfato A Líquido, las fichas técnicas de los coagulantes en mención las podemos encontrar en el Anexo 1.

El mecanismo para simular el proceso de tratamiento de agua potable de la planta

del municipio de Rionegro; consistió en adecuar las etapas de coagulación floculación en vasos de precipitado o jarras y evaluar distintos parámetros durante y/o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento.

Para la realización de este trabajo y mediante este sistema de simulación del proceso de coagulación-floculación se determinaron las siguientes variables:

1. Dosis de cada coagulante
2. Tiempo óptimo de mezcla rápida.
3. Tiempo óptimo de floculación.
4. Gradiente óptimo de floculación.
5. Velocidad de sedimentación del floc
6. Influencia del pH en la coagulación

Los análisis fisicoquímicos juegan un papel importante en este estudio ya que estos son el criterio de decisión final para muchas de las pruebas realizadas; y los análisis que se hicieron fueron: Turbiedad Residual, Color Residual, pH.

Para cada una de las pruebas realizadas se adoptó un diseño de experimentos en bloques completos al azar (DBCA)⁽⁴⁾, utilizando la técnica estadística ANOVA con dos criterios de clasificación: tratamiento y bloque.

El ANOVA se realizó con la ayuda del *software* estadístico *statgraphics*.

3.3.1 Variables de Operación

Las variables de operación con las que se realizaron las pruebas en este estudio y sus valores fueron los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Variables de operación para las pruebas de jarras

Variable operacional	Valor fijado
Velocidad de agitación en mezcla rápida	> 100 rpm
Tiempo de mezcla rápida	1 min
Velocidad de agitación en la floculación	40 rpm
Tiempo de floculación	15 min
Tiempo de sedimentación	15 min
Concentración de coagulante	1%

A partir de los parámetros anteriores, los cuales fueron fijados con anterioridad, se iniciaron las pruebas.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se determinan: el color, la turbiedad, el pH, y la alcalinidad en el agua cruda.
2. Se llenan las jarras con el agua cruda y se añaden los coagulantes a cada una de ellas en dosis progresivas, utilizando jeringas hipodérmicas de 1, 2, 5, 10 y 25 ml dependiendo de la cantidad de coagulante a utilizar. Las dosis aplicadas se reportan en partes por millón (ppm) la adición de los coagulantes se debe hacer simultáneamente con el fin de que el tiempo de mezcla rápida sea el mismo para todas las muestras, y se debe realizar dentro del seno del líquido y no sobre la superficie. Para el momento de la adición del coagulante, las paletas de los agitadores deben estar girando a una velocidad de 100 rpm, para asegurar una buena incorporación de los coagulantes en todo el líquido.
3. Se dejan girar las paletas 60 segundos después de la aplicación de los coagulantes, para garantizar buena mezcla.
4. Después de este periodo se cambia la velocidad de las paletas a 40 rpm durante 15 a 30 min. Durante este tiempo en el cual ocurre la floculación, se determinan el tiempo inicial de formación del floc y el tamaño.
5. Se suspende la agitación y se deja sedimentar el agua durante 15 a 30 min.
6. Al final de este tiempo se extraen aproximadamente 50ml de muestra de cada una de las jarras asegurándose de eliminar los primeros 5 ml, y se determina: color residual, turbiedad residual y pH.

3.3.2 Determinación de la Dosis de cada Coagulante

El objetivo de este ensayo es determinar la dosis de cada coagulante que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta. El equipo de jarras empleado fue el PHIPPS & BIRD, y se utilizaron seis jarras cilíndricas de vidrio de 1000 ml de capacidad.

Las pruebas se realizaron para cinco valores diferentes de turbiedad con cada coagulante.

3.3.3 Validación de los coagulantes

Después de determinadas las dosis óptimas de cada uno de los coagulantes se procedió a su validación mediante la determinación de las variables de operación ⁽³⁾:

3.3.3.1 Tiempo óptimo de mezcla rápida ⁽¹⁾

Este ensayo se determinó, haciendo una prueba de jarras normal pero variando solamente el tiempo de mezcla rápida, y se puede hacer para los tres coagulantes a la vez, pero debido a que los agitadores no pueden girar a diferentes velocidades al mismo tiempo, este ensayo se debe repetir para los distintos tiempos que se escojan.

El procedimiento que se sigue para esta prueba se describe en el anexo 3.

3.3.3.2 Tiempos y gradientes óptimos de floculación

Esta dos determinaciones se pueden realizar en un solo ensayo cuyo objetivo es conocer la intensidad de agitación (gradiente, G)⁽²⁾ que debe dársele al agua durante el proceso de floculación, y durante cuanto tiempo se le debe aplicar para producir la mejor remoción posible de partículas durante el proceso de sedimentación.

La prueba se realizó para tres valores diferentes de turbiedad inicial del agua cruda. Ver anexo 4.

3.3.3.3 Velocidad de sedimentación de las partículas ⁽¹⁾

El objetivo de este ensayo es comparar el trabajo que los coagulantes empleados realizan y que tan rápido lo realizan, desde un punto de vista cualitativo. Este ensayo se hizo con los tres coagulantes a la vez, ya que solo se necesita una jarra por coagulante.

A cada una de las muestras y para cada intervalo de tiempo se le determinó la turbiedad residual N_t . Con estos datos se dibuja una curva de porcentaje de turbiedad removida vs tiempo de sedimentación, el porcentaje de remoción será:

$$R = \% \text{ Remoción} = \left(1 - \frac{N_t}{N_o} \right) * 100$$

Al graficar estos valores contra los tiempos de toma de muestra se puede observar la velocidad de sedimentación del floc formado con cada uno de los coagulantes. El procedimiento empleado para la realización de esta prueba aparece reportado en el anexo 5.

3.3.3.4 Influencia del pH en la coagulación

El pH tiene una gran influencia en la coagulación debido a que las reacciones del coagulante con el agua dependen de la cantidad de iones H^+ y $(OH)^-$. Por lo general existe un pH óptimo, valores por encima o por debajo producen malos resultados ⁽¹⁾ El objetivo de este ensayo es determinar el rango de pH en el cual se den los mejores resultados de coagulación para el tipo de agua con que se trabaja y para el tipo de coagulante utilizado.

.Al final de la prueba se determinan el color y la turbiedad en las muestras de cada jarra y con estos valores se hace una curva de turbiedad residual vs. pH, y otra de color residual vs. pH. El procedimiento se describe en el anexo 6.

3.4 Análisis de resultados experimentales: en esta etapa se compararon los resultados obtenidos a partir de los diseños en bloques completos al azar y de la prueba de jarras para cada ensayo; y se determinó la viabilidad del cambio de coagulante en la planta desde del punto de vista técnico, igualmente se obtuvieron los parámetros operacionales óptimos para cada coagulante.

3.5 Análisis económico: está fue la última etapa de este trabajo, aquí se estudio la viabilidad desde el punto de vista económico del cambio de coagulante Sulfato A Sólido utilizado actualmente en la planta por sulfatos líquidos , luego de haberse determinado el consumo anual de coagulante. Éste estudio se realizó con base en los costos anuales de: transporte, coagulante ⁽³⁾ y equipos empleados.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se consignan y discuten los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados, el análisis estadístico de cada uno de los experimentos desarrollados y finalmente se presenta un análisis de costos con el fin de estudiar la viabilidad económica en la implementación de coagulantes líquidos.

La etapa de experimentación se realizó en el periodo comprendido entre Abril y Octubre de 2005, durante este periodo se presentó variación en los valores de turbiedad y color en el agua cruda, lo cual permitió que se pudiera trabajar con valores de turbiedad desde 3.7 NTU hasta 20.7 NTU y de color desde 47 UPC hasta 430 UPC.

El pH del agua cruda durante este periodo osciló entre 7.06 y 7.6 unidades, lo cual se puede considerar como un valor aproximadamente constante, el valor de la alcalinidad presentó un valor casi constante de 53.4 mg CaCO₃/L.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1.1 Determinación de la dosis óptima de cada coagulante

Para este ensayo se estudiaron cinco muestras de agua con diferentes valores de turbiedad y color para que el estudio fuera representativo. Los valores de turbiedades con que se trabajaron fueron: 3.7, 8.7, 13.4, 17.6, y 20.7 NTU; y los valores de color fueron: 47, 69, 160, 350, y 430 UPC respectivamente. En todos los casos el color fue más alto que la turbiedad y no varió con ella en una proporción definida.

Como fue explicado en el capítulo 1, los experimentos se diseñaron para cada uno de los coagulantes teniendo en cuenta un diseño en bloques completos al azar.⁽²⁾

Las dosis con que se trabajaron fueron: 45, 50, 55, 60 y 65 ppm ya que a dosis menores a 45 ppm y mayores a 65 ppm no se observa cambios en las

características del agua tratada.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la elección de la dosis adecuada fueron la turbidez y color residual.

A continuación se presenta el diseño de experimentos con su respectivo análisis, para cada uno de los tres coagulantes suministrados por la empresa colombiana P.Q.P.

4.1.1.1 Coagulante Sulfato Líquido Tipo: A

En la tabla 4.1 aparece reportado el orden en que fueron realizados los experimentos así como los valores de turbiedades residuales que se obtuvieron después de adicionadas las respectivas dosis de coagulante.

Tabla 4.1 Distribución de los experimentos para determinar dosis de Sulfato Líquido A.

	Turbidez Inicial NTU	Dosis de Coagulante Sulfato Líquido A [ppm]					Totales por bloque
		45	50	55	60	65	
Experimento							
1	3.7	0.96	1.1	1.3	1.5	1.2	Y _{.1} = 6.06
2	8.7	1.1	1.2	1.4	1.4	1.4	Y _{.2} = 6.5
3	13.4	0.98	1.2	1.2	1.4	1.2	Y _{.3} = 5.98
4	17.6	1.0	1.1	1.4	1.5	1.4	Y _{.4} = 6.4
5	20.7	1.1	1.2	1.3	1.3	1.1	Y _{.5} = 6
		Turbidez residual					
Totales por tratamiento		Y _{1.} = 5.14	Y _{2.} = 5.8	Y _{3.} = 6.6	Y _{4.} = 7.1	Y _{5.} = 6.3	Total global = Y_{..} = 30.94

Utilizando el sistema computacional *Statgraphics* se determinó la dosis con que se lograba una mejor remoción de color y turbidez, empleando la técnica estadística ANOVA ⁽⁴⁾ con dos criterios de clasificación.

En el análisis se consideran tres fuentes de variabilidad: el factor de tratamientos, el factor de bloques y el error aleatorio, es decir se tienen tres posibles “culpables” de la variabilidad presente en los datos.

La hipótesis está dada por:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

En esta hipótesis la afirmación a probar es que la respuesta media poblacional lograda con cada tratamiento es la misma para los K tratamientos.

A continuación se muestra el ANOVA para este diseño de experimentos:

Tabla 4.2. Análisis de Varianza para dosis de coagulante líquido A.

Analysis of Variance for Turbidez Residual - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Dosis de Coagula	0.452576	4	0.113144	16.36	0.0000
B:Turbidez Inicial	0.047456	4	0.011864	1.72	0.1956
RESIDUAL	0.110624	16	0.006914		
TOTAL (CORRECTED)	0.610656	24			

De la tabla 4.2 se observa que para las dosis de coagulante se obtuvo un $p\text{-value} = 0.0000 < \alpha = 0.05$, por lo que se rechaza la hipótesis $H_0 =$ de que la turbidez residual media poblacional para las dosis de coagulante son iguales, y se acepta que al menos dos de las dosis son diferentes en cuanto a la turbidez residual que generan. Como se rechazó la hipótesis de igualdad de las cinco dosis de coagulante; mediante un diagrama de cajas simultáneo y un gráfico de medias utilizando el método de la diferencia mínima significativa se encontró la dosis con que se obtenía mayor remoción de turbidez y color.

Para el caso de color residual los resultados son muy similares; se encontró un $p\text{-value} = 0.0005$ por lo que se rechaza como en el caso anterior la hipótesis.

La tabla ANOVA para el análisis de color residual aparece en el ANEXO 3.

En las figuras 4.1 y 4.2 se aprecia que la dosis 1 de coagulante es decir 45 ppm es la que proporciona mayores porcentajes de remoción de turbidez y color; ya que con esta dosis se obtienen para los diferentes tipos de agua analizada las turbiedades y

colores residuales más bajos.

La dosis 2 equivalente a 50 ppm presenta turbiedades y colores residuales bajos, sin embargo no compite con la dosis de 45 ppm ya que los intervalos de confianza correspondiente a dichas dosis no se traslapan, lo que hace que sean estadísticamente diferentes.

Para el caso de las dosis 3, 4 y 5 correspondientes a 55, 60 y 65 ppm respectivamente, se observa que los intervalos se traslapan lo que las hace estadísticamente iguales.

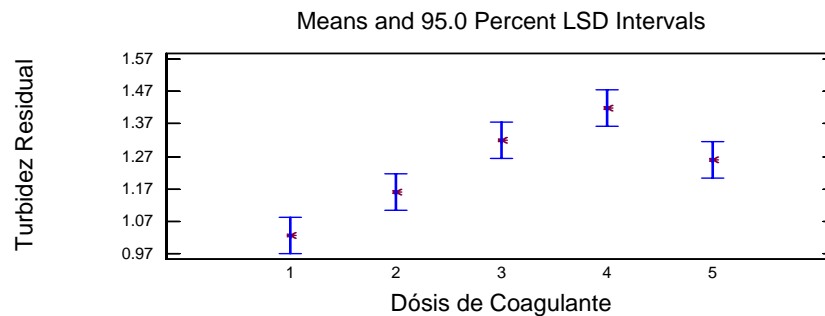


Figura 4.1 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.

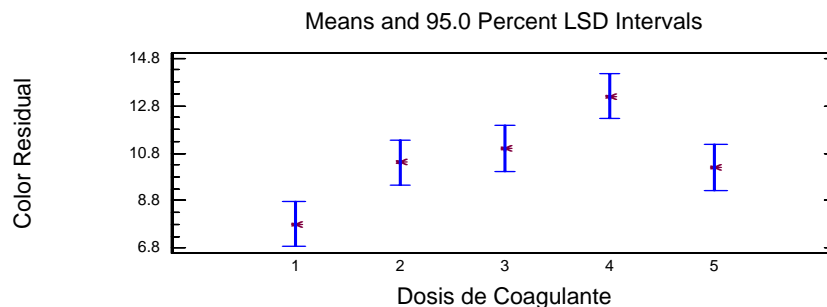


Figura 4.2 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.

En el diagrama que se aprecia en la figura 4.3 se observa claramente que la dosis 1 correspondiente a 45 ppm es diferente a las otras dosis en cuanto a sus medias; la caja correspondiente a la dosis 1 al no traslaparse y presentar la menor turbidez residual tiene el mejor comportamiento.

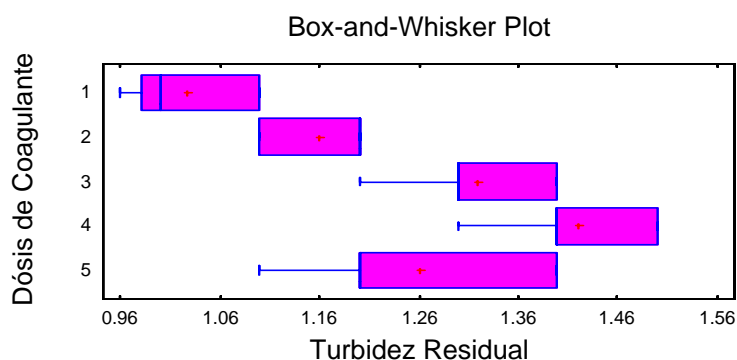


Figura 4.3 Diagrama de cajas para determinación de dosis de coagulante.

De esta manera podemos escoger la dosis de 45 ppm de Sulfato de Aluminio Tipo A líquido como la adecuada para los experimentos posteriores donde se determinara cual de los tres tipos de coagulantes es el mejor.

4.1.1.2 Coagulante Sulfato Líquido Tipo: B

El procedimiento de análisis que se siguió para determinar la dosis de sulfato B líquido fue el mismo que se empleo con el coagulante A líquido.

De esa manera los resultados para el coagulante B fueron:

Tabla 4.3 Distribución de los experimentos para determinar dosis de Sulfato Líquido B.

	Turbidez Inicial NTU	Dosis de Coagulante Sulfato Líquido A [ppm]					Totales por bloque
		45	50	55	60	65	
Experimento							
1	3.7	2.0	1.9	2.4	2.2	1.9	$Y_{.1} = 10.4$
2	8.7	2.1	1.5	2.2	2.2	2.5	$Y_{.2} = 10.5$
3	13.4	2.2	1.9	2.3	1.8	2.2	$Y_{.3} = 10.4$
4	17.6	2.1	1.6	2.4	2.2	2.1	$Y_{.4} = 10.4$
5	20.7	1.9	1.9	1.8	2.3	2.1	$Y_{.5} = 10$
		Turbidez residual					
Totales por tratamiento		$Y_{1.} = 10.3$	$Y_{2.} = 8.8$	$Y_{3.} = 11.1$	$Y_{4.} = 10.7$	$Y_{5.} = 10.8$	Total global = $Y_{..} = 51.7$

Tabla 4.4 Análisis de Varianza para dosis de coagulante líquido B.

Analysis of Variance for Turbidez Residual - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Dosis de Coagula	0.6584	4	0.1646	3.44	0.032
B:Turbidez Inicial	0.0304	4	0.0076	0.16	0.956
RESIDUAL	0.7656	16	0.04785		
TOTAL (CORRECTED)	1.4544	24			

Del análisis de varianza tanto para turbidez y color residual se rechaza la hipótesis de la igualdad, por lo tanto se acepta que la turbidez y color residual generado por cada una de las dosis es diferentes. El ANOVA para el color residual aparece reportado en el ANEXO 4.

Los diagramas de medias que se aprecian en las figuras 4.4 y 4.5 muestran claramente que la dosis 2 correspondiente a 50 ppm, logran la mayor remoción tanto en turbidez como en color.

La dosis 1 correspondiente a 45 ppm presenta buenas remociones, pero estadísticamente su media es diferente a la dosis de 50 ppm por lo que se rechaza. Para el caso de las dosis de 55, 60 y 65 ppm, se observa que sus intervalos de confianza se traslapan por lo que estadísticamente son iguales, pero sus remociones no son significativas comparadas con la dosis de 50ppm.

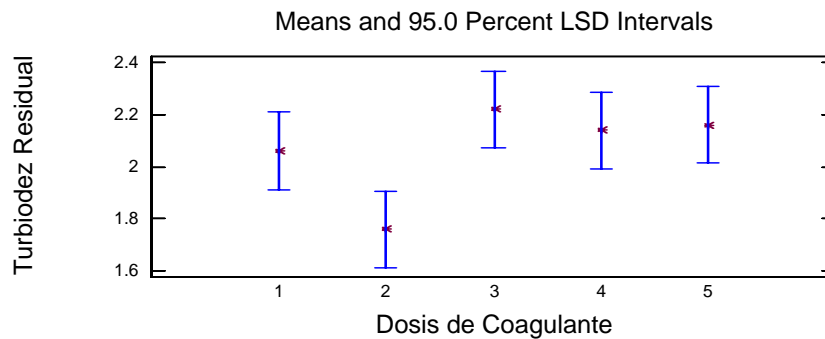


Figura 4.4 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.

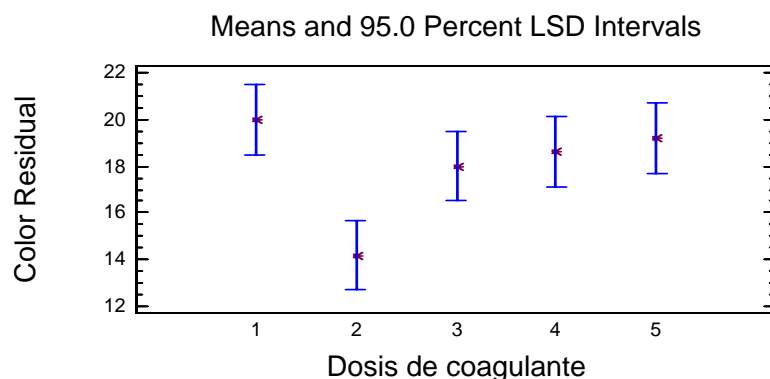


Figura 4.5 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.

De esta manera se escoge la dosis de 50 ppm, como la dosis en donde el agua tratada presenta mejores características en cuanto a turbidez y color.

4.1.1.3 Coagulante Sulfato Sólido Tipo: A

Tabla 4.5 Distribución de los experimentos para determinar dosis de Sulfato Líquido A.

		Dosis de Coagulante <i>Sulfato Líquido A</i> [ppm]					Totales por bloque
		45	50	55	60	65	
Experimento		Turbidez residual					
1	3.7	1.4	1.4	1.2	1.3	1.4	$Y_{-1} = 6.7$
2	8.7	1.2	1.5	1.0	1.2	1.6	$Y_{-2} = 6.5$
3	13.4	1.3	1.5	0.96	1.1	1.6	$Y_{-3} = 6.46$
4	17.6	1.4	1.6	1.1	1.2	1.5	$Y_{-4} = 6.8$
5	20.7	1.5	1.6	0.98	1.3	1.4	$Y_{-5} = 6.78$
Totales por tratamiento		$Y_{1.} = 6.8 \quad Y_{2.} = 7.6 \quad Y_{3.} = 5.24 \quad Y_{4.} = 6.1 \quad Y_{5.} = 7.5$					Total global = $Y_{..} = 33.24$

Tabla 4.6 Análisis de Varianza para dosis de coagulante Sólido A.

Analysis of Variance for Turbidez Residual - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Turbidez Inicial	0.020096	4	0.005024	0.48	0.7519
B:Dosis de coagula	0.787616	4	0.196904	18.71	0.0000
RESIDUAL	0.168384	16	0.010524		
TOTAL (CORRECTED)	0.976096	24			

De la tabla 4.6 se observa que para las dosis de coagulante se obtuvo un $p\text{-value} = 0.0000 < \alpha = 0.05$, por lo que se rechaza la hipótesis $H_0 =$ de que la turbidez residual media poblacional para las dosis de coagulante son iguales, y se acepta que al menos dos de las dosis son diferentes en cuanto a la turbidez residual que generan.

Para determinar cual de las dosis logra los porcentajes de remoción de color y turbidez más altos, se analizaron los intervalos de confianza para cada una de las dosis observándose que para el caso de la turbidez todos los rangos se traslapan. Si bien el ANOVA para las dosis del coagulante Sólido tipo A nos indicaba que el comportamiento de las dosis era diferente, en el gráfico de medias para el estudio específico de la turbidez residual se aprecia que las dosis 2 y 3 correspondientes a 50 y 55ppm no son estadísticamente diferentes, por lo que se podría escoger cualquiera de estas dosis.

Para el caso de color residual cuya ANOVA aparece reportada en el ANEXO 5; podemos apreciar que los valores más bajos se presentan con las dosis de 55 y 60ppm; como estos intervalos de confianza se traslapan podemos decir que no son estadísticamente iguales; por lo que cualquiera de estos se podría escoger.

De esta manera se observa que la dosis de 55ppm aparece en los dos gráficos de medias reportando valores bajos de turbidez y color residual, por lo que se escoge

para los posteriores estudios.

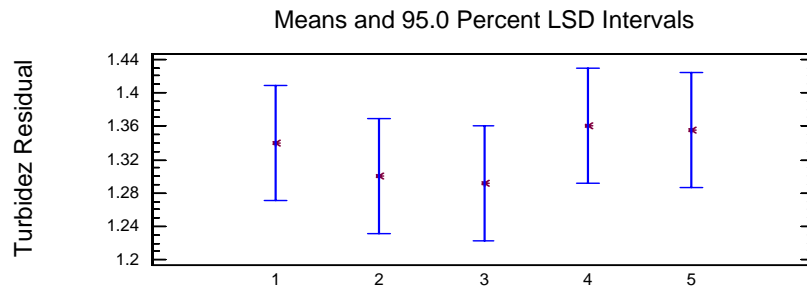


Figura 4.6 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.

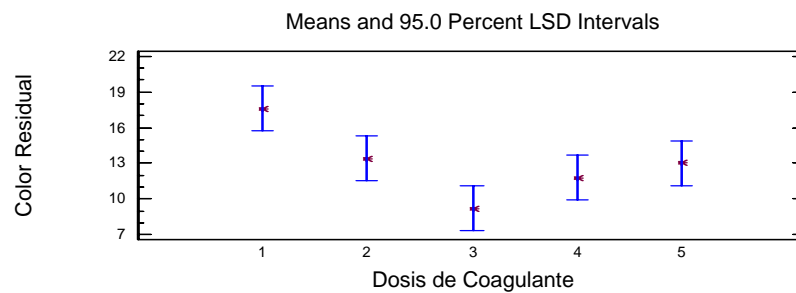


Figura 4.7 Gráfico de medias con el método LSD para determinar dosis de coagulante.

4.1.2 VALIDACIÓN DE LOS COAGULANTES

Después de determinadas las dosis para cada uno de los tres coagulantes, es decir 45ppm para Sulfato A Líquido, 50ppm para Sulfato B Líquido y 55ppm para Sulfato A Sólido, se analizó el comportamiento de cada coagulante frente a cuatro parámetros de operación.

4.1.2.1 Tiempo de mezcla rápida

En las tablas 4.7 y 4.8 se presentan los resultados y el análisis estadístico mediante un ANOVA, para la determinación del tiempo óptimo de mezcla rápida.

La turbidez del agua cruda a analizar correspondía a 19.7 NTU, y 410 UPC de Color; La velocidad de agitación para esta prueba fue 100 rpm.

Tabla 4.7 Distribución de los experimentos para determinar tiempo de mezcla rápida.

	Tiempo (s)	Coagulante		
		Sulfato A Líquido	Sulfato B Líquido	Sulfato A Sólido
Experimento				
1	30	1.1	2.0	1.4
2	60	0.95	1.8	1.1
3	90	1.2	2.5	1.3
		Turbidez residual		

Tabla 4.8 Análisis de Varianza para determinación de tiempo de mezcla rápida

Analysis of Variance for Turbidez Residual - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tiempo	0.221667	2	0.110833	3.80	0.1
B:Coagulante	1.76167	2	0.880833	30.20	0.0039
RESIDUAL	0.116667	4	0.0291667		

TOTAL (CORRECTED)	2.1	8			

Del análisis de varianza se puede decir que el comportamiento de los tres coagulantes fue diferente ya que existe $p\text{-value} = 0.0039 < \alpha = 0.05$.

El coagulante que presenta mayores porcentajes de remoción es el 1 correspondiente al Sulfato A Líquido, como se puede apreciar en el grafico de medias (figura 4.8).

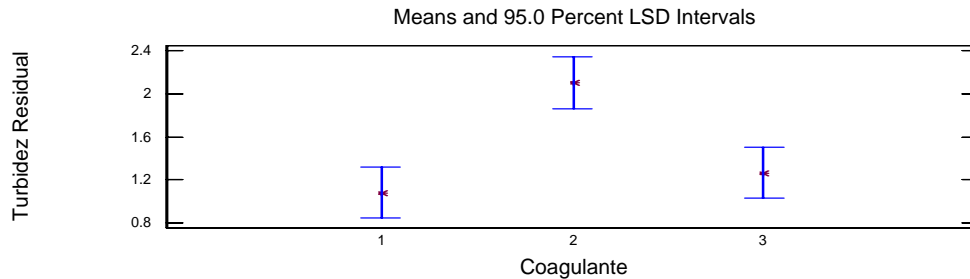


Figura 4.8 Gráfico de medias con el método LSD para determinar tiempo mezcla rápida.

En las figuras 4.9 y 4.10 se presentan gráficamente los comportamientos de cada

uno de los tres coagulantes. Los resultados de estas pruebas para las demás muestras de agua cruda se presentan en el anexo 6 y 7.

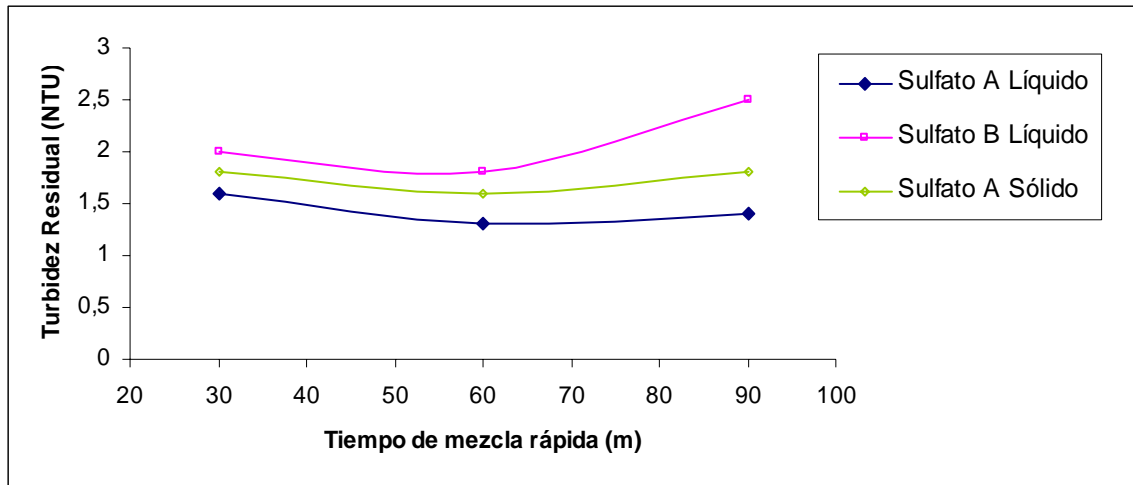


Figura 4.9 Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo a la turbidez.

El tiempo de mezcla rápida para todos los coagulantes, en todas las muestras de agua estudiadas, fue 60 segundos, tanto para turbiedad residual como para color residual. Las Turbiedades que se trabajaron fueron: 19.7, 5.7 y 8.7 NTU, en todos los casos el coagulante que presento menores turbiedades residuales correspondió al Sulfato A Líquido.

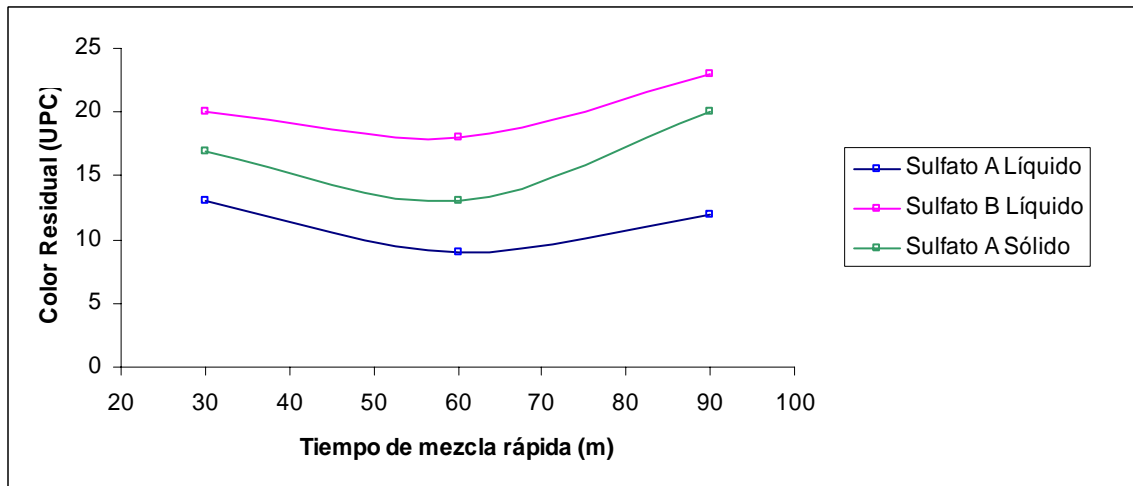


Figura 4.10 Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo a Color.

4.1.2.2 Tiempo y gradiente de floculación.

Para esta prueba la turbidez del agua cruda a analizar correspondió a 19.7 NTU, y 410 UPC de Color. Los análisis para las otras dos muestras de agua se presentan en los Anexos 8 y 9.

Los valores de gradientes correspondientes a cada velocidad de rotación se determinaron a partir de una curva de gradiente vs. Velocidad de rotación desarrollada por la compañía PHIPPS & BIRD.

Los valores de gradientes ensayados fueron los siguientes:

velocidad de agitación (rpm)	Gradiente (S ⁻¹)
20	14
25	18,5
30	23,5
40	33
55	50

Este ensayo igualmente fue analizado por medio de un ANOVA presentada en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Análisis de Varianza para determinación de gradiente de floculación y mejor coagulante.

Analysis of Variance for Turbidez residual - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

MAIN EFFECTS					
A:rpm	0.897333	4	0.224333	19.79	0.0003
B:Tipo de Coagulan	0.769333	2	0.384667	33.94	0.0001
RESIDUAL	0.0906667	8	0.0113333		

TOTAL (CORRECTED)	1.75733	14			

De la tabla anterior podemos observar que tanto la velocidad (rpm) como el tipo de floculante presentan p valores menores a 0.05, lo cual indica que sus respuestas en turbidez residual son estadísticamente diferentes, por lo que del gráfico de medias presentado en el anexo 10 se escoge la velocidad de 30rpm como la mejor; igualmente el coagulante escogido corresponde al Sulfato A Líquido.

El gradiente de velocidad correspondiente a 55 rpm deterioró los flocs formados, por lo tanto produce los valores de turbiedad residual más altos, mientras que el gradiente con el cual en todos los casos se produce el menor valor de turbiedad residual, es el correspondiente a una velocidad de entre 20 y 30 rpm, pero el valor de 20 rpm no se adoptó como el óptimo en ningún caso ya que con esta velocidad de rotación, los flocs formados se sedimentaron durante el periodo de floculación.

De igual forma se puede observar de las figuras 4.11 y 4.12 que el coagulante Sulfato A Líquido, proporciona al agua las mejores características de calidad ya que la reducción de turbidez y color es notoria frente a los otros dos coagulantes.

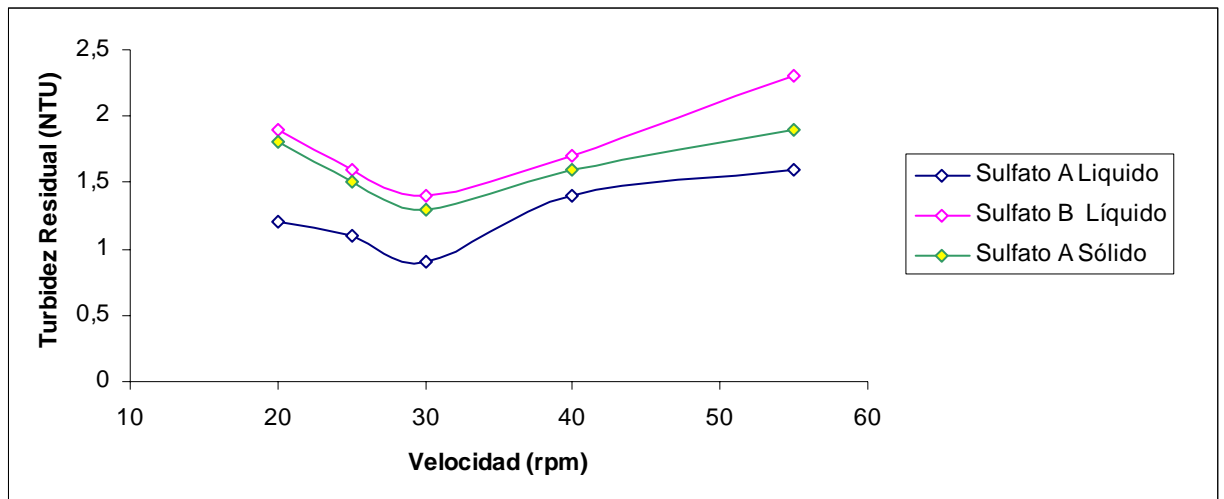


Figura 4.11 Determinación del gradiente de floculación de acuerdo a Turbidez Residual.

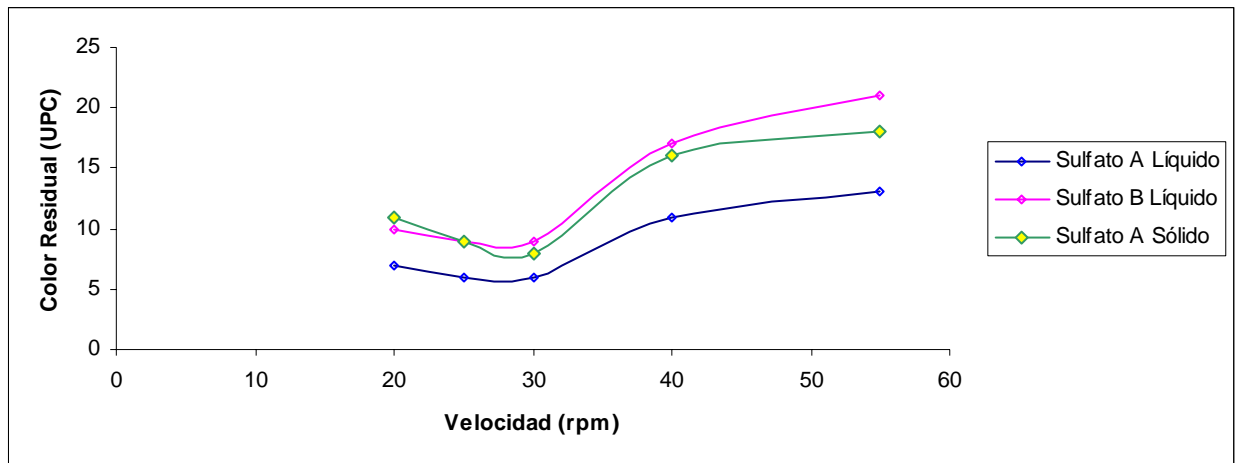


Figura 4.12 Determinación del gradiente de floculación de acuerdo a Color Residual.

4.1.2.3 Velocidad de Sedimentación.

Habiendo determinado la turbidez residual (Nt) como se estableció en el numeral 3.2.3.4, para cada una de las muestras y para cada intervalo de tiempo se dibujo la curva de porcentaje de turbidez removida vs tiempo de sedimentación.

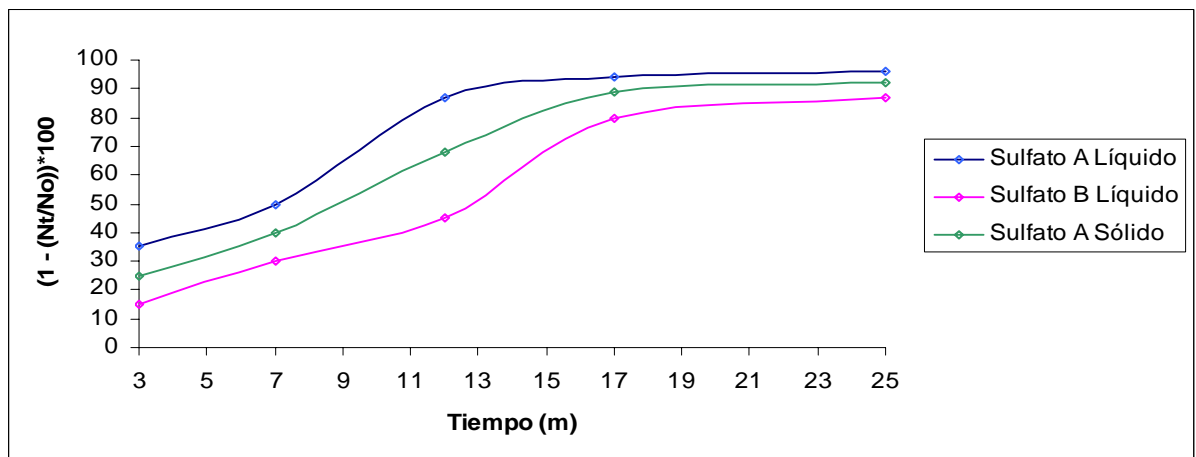


Figura 4.13 Velocidad de sedimentación para todos los coagulantes.

Como puede observarse en la figura 4.13 todos los coagulantes presentan comportamientos similares, El Sulfato A Líquido presentó la mayor velocidad de sedimentación, seguido del sulfato A Sólido.

El coagulante Sulfato B Líquido tiene una velocidad de sedimentación lenta, sin embargo después de un periodo de sedimentación de unos 25 minutos este alcanza

un porcentaje de remoción cercano al de los demás coagulantes. Los resultados para las otras muestras de agua analizadas aparecen en el Anexo 11.

4.1.2.4 Influencia del pH en la Coagulación.

En los resultados de esta prueba, se determinaron los intervalos de pH que se muestran en la tabla 4.10 en los cuales cada coagulante tiene la mejor remoción de turbiedad y color. (Ver figura 4.14).

Tabla 4.10 Intervalos de pH óptimos de coagulación para cada coagulante

coagulante	Intervalo óptimo de pH
Sulfato A Líquido	6.9 – 8.5
Sulfato B Líquido	7.8 – 8.9
Sulfato A Sólido	7.5 – 8.8

El Sulfato A Líquido fue el coagulante que trabajó en un intervalo más amplio de pH, lo cual significa que para cualquier tipo de agua cruda que llegue a la planta este trabajará en forma adecuada.

Debido a que el pH del agua cruda osciló a lo largo le periodo de experimentación entre 7.06 y 7.6 unidades, no hubo necesidad de ajustar el pH de esta ya que todos los coagulantes presentaron un intervalo óptimo de pH mayor al del agua cruda.

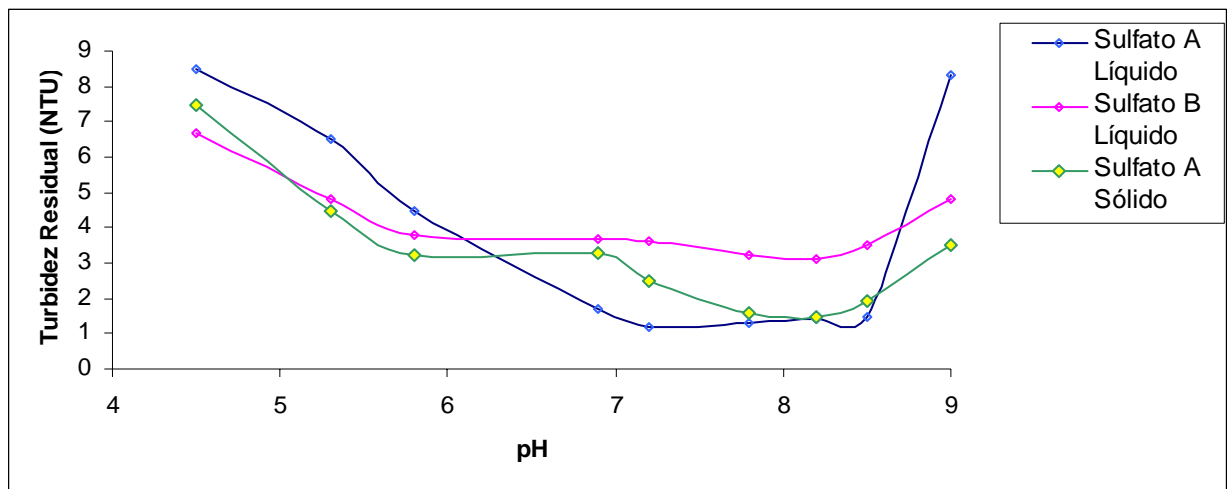


Figura 4.14 Intervalo óptimo de PH para cada coagulante.

4.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

A partir de los resultados experimentales se determinó la eficiencia de cada uno de los reactivos y se escogió al sulfato de aluminio A líquido como el coagulante que proporcionaba al agua las mejores características de calidad.

En este análisis se estudió la viabilidad económica para la implementación del sulfato de aluminio A líquido en la planta de tratamiento del municipio de Rionegro y se hizo una comparación entre los costos de operación de la planta haciendo uso del sulfato de aluminio A sólido actualmente utilizado en la planta y el Sulfato A líquido. Esta comparación nos determinó cual de los dos coagulantes fue el mejor, ya que la calidad del agua obtenida con los dos coagulantes cumplió con los parámetros de ley establecidos en el decreto 475 de 1998. ⁽⁷⁾

El sulfato de aluminio tipo A líquido debe almacenarse en tanques especialmente diseñados para su almacenamiento. Aquí presentamos el costo de un tanque de almacenamiento en fibra de vidrio con una capacidad de 13 m³. El tanque está provisto de tuberías que conducen por gravedad el coagulante al punto de aplicación en la mezcla rápida en el caso de aplicarse directamente o en solución. En caso de aplicar el coagulante en solución, el acueducto dispone de una bomba de 2 HP para succionar el agua desde el tanque de sedimentación hasta el tanque donde se mezcla el coagulante y el agua, desde donde se dosifica por gravedad

Tabla 4.11 Costo de coagulantes P.Q.P

coagulante	Costo unitario (\$/kg)	IVA	Costo total (\$/kg)
Sulfato aluminio A sólido	920	16%	1067.2
Sulfato aluminio A líquido	490	16%	568.4

Al costo de los reactivos debe cargársele el costo de transporte por Kg transportado. A continuación se presentan los costos de transporte.

Tabla 4.12 Costos de transporte

Coagulante	Costo por KG de coagulante
Sulfato de aluminio A sólido	\$85
Sulfato de aluminio A líquido	\$60

Para la implementación del sulfato de aluminio A líquido se requiere de los siguientes equipos y una estructura de concreto:

Tabla 4.13 Instalaciones y Equipos

Equipo	Capacidad	Costo
Tanque en fibra de vidrio	14m ³	\$13'000.000
Accesorios	Tuberías, codos	\$1'000.000
Muro de contención	Triturado, arena, cemento mano de obra	\$2'000.000

4.2.1 Condiciones de operación en la planta

A continuación se muestra las condiciones de operación para los dos coagulantes.

Tabla 4.14 Condiciones de operación para el Sulfato A Líquido

Caudal	21L/s
Cantidad consumida	1500Kg/mes
Dosis optima	45ppm
Contenido de insolubles	0.1% max

Tabla 4.15 Condiciones de operación para el Sulfato A Sólido

Caudal	21L/s
Cantidad consumida	1000 Kg/mes
Dosis optima	55ppm
Contenido de insolubles	0.5% máx.

4.2.2 Costo directo de operación

Éste costo esta compuesto por la suma de coagulante gastado en el mes y el costo de transporte. Fue calculado para los dos coagulantes para así establecer una comparación como criterio de selección final.

Costo mensual de operación con Sulfato Sólido	\$1'067.200
Costo de transporte con Sulfato Sólido	\$ 85.000
Costo total Sulfato Sólido	\$1'152.200
Costo mensual de operación con Sulfato Líquido	\$ 852.600
Costo de transporte con Sulfato Líquido	\$ 105.426
Costo total Sulfato Líquido	\$ 958.026
Costo anual de operación con Sulfato Sólido	\$13'826.400
Costo anual de operación con Sulfato Líquido	\$11'496.312

4.2.3 Inversión fija para la implementación de sulfato de aluminio Líquido

Tanque en fibra de vidrio	\$13'000.000
Accesorios	\$ 1'000.000
Muro de contención	\$ 2'000.000
Total de inversión	\$16'000.000

La reducción en costos equivalente a 2'330.088 al año, demuestra que el coagulante Sulfato de Aluminio Líquido ofrece buenas alternativas económicas; sin embargo para implementar el uso de este coagulante en la planta de tratamiento se requiere una inversión aproximada de \$ 16'000.000 por lo que la alternativa no resulta económicamente viable.

5. CONCLUSIONES

Para el proceso de potabilización de agua del municipio de Rionegro resulto viable técnicamente la implementación de Sulfato de Aluminio tipo A Líquido, frente a el coagulante actualmente utilizado; sin embargo la reducción en costos no fue significativa frente a la inversión que acarrearía el uso de este coagulante en la planta.

Los resultados descritos en este trabajo demuestran que para la planta del municipio de Rionegro, el sulfato de aluminio tipo A liquido presenta una buena eficiencia en remoción de turbidez y color en el agua cruda tratada, mostrando un comportamiento eficaz en un rango amplio de pH del agua cruda, buena formación de tamaño de floc, rápida velocidad de sedimentación de los flocs y disminución en la dosis de coagulante.

Los municipios colombianos en busca de nuevas técnicas y métodos como alternativas para la potabilización del agua; pueden encontrar en el uso de los coagulantes líquidos una opción apropiada para establecer dentro de sus plantas sistemas de tratamiento eficientes.

El coagulante Sulfato de Aluminio tipo B líquido no representó una aceptable opción de uso en la planta; los parámetros medidos de color y turbidez nos indicaron % de remoción inferiores frente a los coagulantes tipo A; esto representa una sobre carga en los filtros de partículas no sedimentadas ocasionando aumento en los costos de limpieza de los mismos.

6. BIBLIOGRAFIA

- (1) ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogota. Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental" ACODAL". Mc Graw Hill. 2000. tomo 1, Pág.: 11,15, 16, 52,54 72, 163-192
- (2) ARBOLEDA VALENCIA, Jorge; BAYONA MONCADA, Hernando. Determinación práctica de los gradientes de velocidad en el proceso de floculación del agua. Pág. 5-7.
- (3) BERÓN, Fabiola. Uso de Cloruro Férrico y Sulfato de Aluminio en el río Cauca como coagulante Primario. Santiago de Cali. Seminario internacional: Actualización y nuevas tendencias en potabilización de agua. ACODAL, 2004. Pág.: 5-10, 13.
- (4) GUTIERREZ PULIDO Humberto; DE LA VARA SALAZAR Román. Análisis y diseño de experimentos. 1 ed. México. Mc Graw Hill, 2004. Pág: 39 - 129
- (5) KEMMER, Frank N; McCallion, John. Manual Del agua, tratamiento y aplicaciones. 1 ed. México. Nalco Chemical Company. Mc Graw Hill, 1989. Pág: 8-2
- (6) MINISTERIO DE SALUD. Decreto numero 475 de 1998. Republica de Colombia. Capítulos I y II.
- (7) MINISTERIO DE SALUD. Decreto 1594 de 1998. Republica de Colombia. Capítulos I y IV
- (8) MONTEJO, E. nuevos conceptos en los procesos de coagulación-floculación de agua cruda. Puerto la cruz. Universidad de oriente, escuela de ingeniería y ciencias aplicadas. 1989. Pág.:66, 67, 69,70.

Anexo 1

FICHAS TÉCNICAS DE LOS SULFATOS DE ALUMINIO P.Q.P

SULFATOS DE ALUMINIO P.Q.P

Presentaciones: Sulfato de Aluminio Tipo B Sólido y Líquido
 Sulfato de Aluminio Tipo A Sólido y Líquido
 Sulfato de Aluminio Iron Free Sólido y Líquido
 Sulfato de Aluminio Líquido AP
 Sulfato de Aluminio Super B Especial

Fórmula química: $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$

Generalidades: **Productos Químicos Panamericanos S.A.** es el primer producto de Sulfatos de Aluminio a nivel nacional y el mayor productor a nivel del Grupo Andino; nuestro mercado está compuesto por los acueductos en las principales ciudades del país y por gran parte de los acueductos regionales y veredales de los principales departamentos. De igual forma se tiene una importante cuota de exportación a países vecinos en Suramérica, Centro América y el Caribe.

Usos principales: Se emplean fundamentalmente en el tratamiento de aguas potables, industriales y residuales como coagulante y floculante en el área de clarificación. En la industria papelera se emplea como fijador de la resina en el encolado ácido y como acondicionador de pH. Se emplea también en la elaboración de polvo químico seco para extintores.

Especificaciones técnicas:

Referencia	Contenido de Aluminio como % Al_2O_3	Contenido de Hierro % como % de Fe_2O_3	Contenido de Insolubles
Tipo B Sólido*	15.3% mín.	2.0% máx.	8% máx.
Tipo B Líquido*	7.3% mín.	1.2 % máx.	0.1% máx.
Tipo A Sólido*	17.0% mín.	0.75% máx.	0.5 % máx.
Tipo A Líquido*	8.0% mín.	0.4% máx.	0.10% máx.
Tipo Iron Free Sólido*	17% mín.	0.008% máx.	0.10% máx.
Tipo Iron Free Líquido*	8.3% mín.	0.004% máx.	0.03 % máx.
Super B Especial.	16.2% mín.	0.25% máx.	4.5% máx.

Los Sulfatos de Aluminio P.Q.P. se ajustan a las normas de AWWA B40 3, NTC 531 y se encuentran certificados con la Norma NTC-ISO 9001:2000
 *Otras referencias se fabrican bajo pedido

Empaque y almacenamiento: Los **Sulfatos de Aluminio P.Q.P.**, en sus presentaciones sólidas, son empacados en sacos de polipropileno con laminado de polietileno con contenido neto de 25 kg. El producto sólido, debe almacenarse en bodegas cubiertas, sin humedad y ventiladas. Los productos deben estar aislados del piso mediante estibas en arrumes hasta 4.0 metros.

Los **Sulfatos de Aluminio P.Q.P.** en sus presentaciones líquidas son entregados a granel mediante carro tanque, tambores plásticos de 55 galones y contenedores plásticos de 1 tonelada. Deben almacenarse en tanques especialmente diseñados para este producto; tanques de poliéster, fibra de vidrio, acero o concreto revestido.

Seguridad y manejo: El uso de los **Sulfatos de Aluminio P.Q.P.** envuelven algunos riesgos para la salud humana y el ambiente en general. Se recomienda el empleo de mascarillas, guantes y gafas de seguridad para la manipulación de nuestros productos.

Anexo 2

NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA POTABLE SEGÚN EL DECRETO 475 DE 1998

Normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable

Artículo 6º. Las normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable establecidas en el presente decreto rigen para todo el territorio nacional y deben cumplirse en cualquier punto de la red de distribución de un sistema de suministro de agua potable.

Normas de calidad organolépticas, físicas y químicas.

Artículo 7º. Los criterios organolépticos y físicos de la calidad del agua potable son los siguientes:

CARACTERÍSTICAS	EXPRESADAS EN	VALOR ADMISIBLE
Color Verdadero	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	< 15
OLOR Y SABOR		Aceptable
Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbidez (UNT)	< 5
Sólidos Totales	mg/L	< 500
Conductividad	microhms/cm	50 - 1000
Sustancias Flotantes		Ausentes

Artículo 8º. Los criterios químicos de la calidad del agua potable son los siguientes:

a) Criterios para elementos y compuestos químicos, diferentes a los plaguicidas y otras sustancias, que al sobrepasar los valores establecidos tienen reconocido efecto adverso en la salud humana:

CARACTERÍSTICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR ADMISIBLE mg/L
Aluminio	Al	0.2
Antimonio	Sb	0.005

Arsénico	As	0.01
Bario	Ba	0.5
Boro	B	0.3
Cadmio	Cd	0.003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0.05
Cianuro total	CN ⁻	0.1
Cloroformo	CHCl ₃	0.03
Cobre	Cu	1.0
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	0.01
Fenoles totales	Fenol	0.001
Mercurio	Hg	0.001
Molibdeno	Mo	0.07
Níquel	Ni	0.02
Nitritos	NO ²	0.1
Nitratos	NO ³	10
Plata	Ag	0.01
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Sustancias activas al azul de metileno	ABS	0.5

Grasas y aceites	-	Ausentes
Trihalometanos Totales	THMs	0.1

b) Criterios de calidad química para características con implicaciones de tipo económico o acción indirecta sobre la salud.

CARACTERISTICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR ADMISIBLE mg/L
Calcio	Ca	60
Acidez	CaCO ³	50
Hidróxidos	CaCO ³	<LD
Alcalinidad Total	CaCO ³	100
Cloruros	Cl ⁻	250
Dureza Total	CaCO ₃	160
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	250
Zinc	Zn	5
Fluoruros	F ⁻	1.2
Fosfatos	PO ₄ ⁻³	0.2

Artículo 10. El valor para el potencial de hidrógeno, pH, para el agua potable deberán estar comprendido entre 6.5 y 9.

Anexo 3

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR TIEMPO DE MEZCLA RÁPIDA

1. Se utilizan tres jarras (una para cada coagulante) y a cada una de ellas se le aplica la dosis óptima, mientras los agitadores giran a 100 rpm.
3. Se dejan girar las paletas a 100 rpm, durante el tiempo escogido por ejemplo 30 s, y luego se cambia la velocidad a 40 rpm, y se continúa la prueba normalmente.
4. Todo el ensayo se repite para un nuevo tiempo de mezcla rápida escogido por ejemplo 60 s.
5. Al final se hacen curvas de turbiedad residual vs. Tiempo de mezcla rápida y de color residual vs. Tiempos de mezcla rápida, para cada coagulante y de esta forma se determina el tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante y cual de ellos proporciona las mayores remociones.

Anexo 4

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR TIEMPO Y GRADIENTE DE FLOCULACIÓN

1. Se ponen los agitadores a 100 rpm, y se aplica a las seis jarras la dosis óptima del coagulante a ensayar, de la manera mas simultanea posible. La mezcla rápida se deja durante el tiempo óptimo encontrado en el ensayo anterior.
2. Transcurrido este tiempo, se reduce la velocidad de los agitadores a la velocidad de rotación de los agitadores que se quiere probar, por ejemplo 30rpm (que para las jarras y los agitadores utilizados corresponde a un gradiente de 23.5 s^{-1}). Este se toma como el tiempo $t=0$ y a partir de este se empieza a contar el tiempo de floculación.
3. En este punto se sigue la secuencia descrita en la tabla que aparece a continuación.⁽²⁾
4. En este ensayo el tiempo de sedimentación como se puede observar es de 10 minutos. A cada una de las muestras se les determina su turbiedad, y con estos valores se hace una curva de Turbiedad residual vs. Tiempo de floculación.
5. Después de este ensayo, se procede a realizarlo de nuevo, en la misma manera, pero ahora para una velocidad de rotación de las paletas diferente por ejemplo 40 rpm lo cual equivale a un gradiente de 33 s^{-1} . Los resultados se grafican de la misma manera pero si es posible sobre la misma gráfica, lo cual facilita la comparación de los resultados.

Secuencia para los ensayos de tiempo y gradiente de floculación

<i>Tiempo de floculación (minutos)</i>	<i>Acción a ejecutar</i>
0	Comienza la floculación al gradiente escogido
7	Se levanta el agitador de la celda No. 1
13	Se levanta el agitador de la celda No. 2
17	Se toma la muestra de la celda No. 1
20	Se levanta el agitador de la celda No. 3
23	Se toma la muestra de la celda No. 2
27	Se levanta el agitador de la celda No.4
30	Se toma la muestra de la celda No. 3
33	Se levanta el agitador de la celda No. 5
37	Se toma la muestra de la celda No4
40	Se levanta el agitador de la celda No. 6
43	Se toma la muestra de la celda No. 5
50	Se toma la muestra de la celda No. 6

Los pasos que se acaban de describir constituyen toda la prueba de gradientes completa, pero para un solo coagulante, de tal manera que este ensayo se realizó tres veces debido a que son tres los coagulantes que se compararon en este trabajo.

Anexo 5

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

<p>1. Se determina la turbiedad del agua cruda, la cual se designa como (<i>No.</i>)</p>
<p>2. Se aplica a cada jarra la dosis óptima de coagulante, mientras se hace girar el agitador a 100 rpm.</p>
<p>3. Después de hecha la mezcla rápida se cambia la velocidad de las paletas a 40 rpm durante 15 a 30 minutos.</p>
<p>4. Se detienen las paletas, se levantan y se empiezan a tomar muestras de cada jarra a intervalos de tiempo regulares, por ejemplo: <i>t=1 min, t=3 min, t=7min, t=12 min, t=17 min, t=25 min.</i></p>
<p>5. A cada una de las muestras y para cada intervalo de tiempo se le determina la turbiedad residual <i>Nt</i>. Con estos datos se dibuja una curva de porcentaje de turbiedad removida vs tiempo de sedimentación, el porcentaje de remoción será:</p>
$R = \% \text{ Remoción} = \left(1 - \frac{Nt}{No} \right) * 100$
<p>Al graficar estos valores contra los tiempos de toma de muestra se puede observar la velocidad de sedimentación del floc formado con cada uno de los coagulantes.</p>

Anexo 6

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL PH EN LA COAGULACIÓN

<p>1. Se efectúa una prueba de dosis óptima para cada coagulante</p>
<p>2. Se coloca la misma cantidad de agua en las jarras y se ajusta el pH en cada una de ellas usando ácido sulfúrico 0.1 N o hidróxido de sodio 0.1N, de tal forma que este varíe desde un valor entre 4-5 en la primera jarra hasta 8-9 en la última.</p>
<p>3. Después de que el pH esté ajustado, se añade a cada jarra la dosis óptima de coagulante, y de aquí en adelante se sigue el experimento con los mismos parámetros de coagulación y floculación utilizados en las prueba de dosis óptimas.</p>
<p>4 .Al final de la prueba se determinan el color y la turbiedad en las muestras de cada jarra y con estos valores se hace una curva de turbiedad residual vs. pH, y otra de color residual vs. pH.</p>

Anexo 7

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA DETERMINACIÓN DE DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO TIPO A LÍQUIDO.

	Color Inicial NTU	Dosis de Coagulante <i>Sulfato Líquido A</i> [ppm]					Totales por bloque
		45	50	55	60	65	
Experimento							
1	47	6	10	12	13	11	Y _{.1} = 52
2	69	7	11	13	13	10	Y _{.2} = 54
3	160	9	9	9	14	10	Y _{.3} = 51
4	350	7	10	12	13	11	Y _{.4} = 53
5	430	10	12	9	13	9	Y _{.5} = 53
		Color residual					
Totales por tratamiento		Y _{1.} = 39	Y _{2.} = 52	Y _{3.} = 55	Y _{4.} = 66	Y _{5.} = 51	Total global = Y_{..} = 263

Analysis of Variance for Color Residual - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Va

MAIN EFFECTS					
A:Dosis de Coagula	74.64	4	18.66	9.17	0.0
B:Color Inicial	1.04	4	0.26	0.13	0.9
RESIDUAL	32.56	16	2.035		

TOTAL (CORRECTED)	108.24	24			

Anexo 8

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA DETERMINACIÓN DE DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO TIPO B LÍQUIDO.

	Color Inicial NTU	Dosis de Coagulante Sulfato Líquido B [ppm]					Totales por bloque
		45	50	55	60	65	
Experimento							
1	47	18	13	19	17	18	Y _{.1} = 85
2	69	18	13	19	18	15	Y _{.2} = 83
3	160	19	13	13	19	18	Y _{.3} = 82
4	350	22	20	20	18	22	Y _{.4} = 102
5	430	23	12	19	21	23	Y _{.5} = 98
		Color residual					
Totales por tratamiento		Y _{1.} = 100	Y _{2.} = 71	Y _{3.} = 90	Y _{4.} = 93	Y _{5.} = 96	Total global = Y_{..} = 450

Analysis of Variance for Color Residual - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Va

MAIN EFFECTS					
A:Dosis de coagula	101.2	4	25.3	5.09	0.0
B:Color Inicial	69.2	4	17.3	3.48	0.0
RESIDUAL	79.6	16	4.975		

TOTAL (CORRECTED)	250.0	24			

Anexo 9

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA DETERMINACIÓN DE DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO TIPO A SÓLIDO.

	Color Inicial NTU	Dosis de Coagulante Sulfato A Sólido [ppm]					Totales por bloque
		45	50	55	60	65	
Experimento							
1	47	19	14	8	10	11	Y _{.1} = 62
2	69	20	13	9	11	12	Y _{.2} = 65
3	160	13	17	9	9	9	Y _{.3} = 57
4	350	17	13	10	11	15	Y _{.4} = 66
5	430	19	10	10	18	18	Y _{.5} = 75
		Color residual					
Totales por tratamiento		Y _{1.} = 88	Y _{2.} = 67	Y _{3.} = 46	Y _{4.} = 59	Y _{5.} = 65	Total global = Y_{..} = 325

Analysis of Variance for Color Residual - Type III Sums of Squares

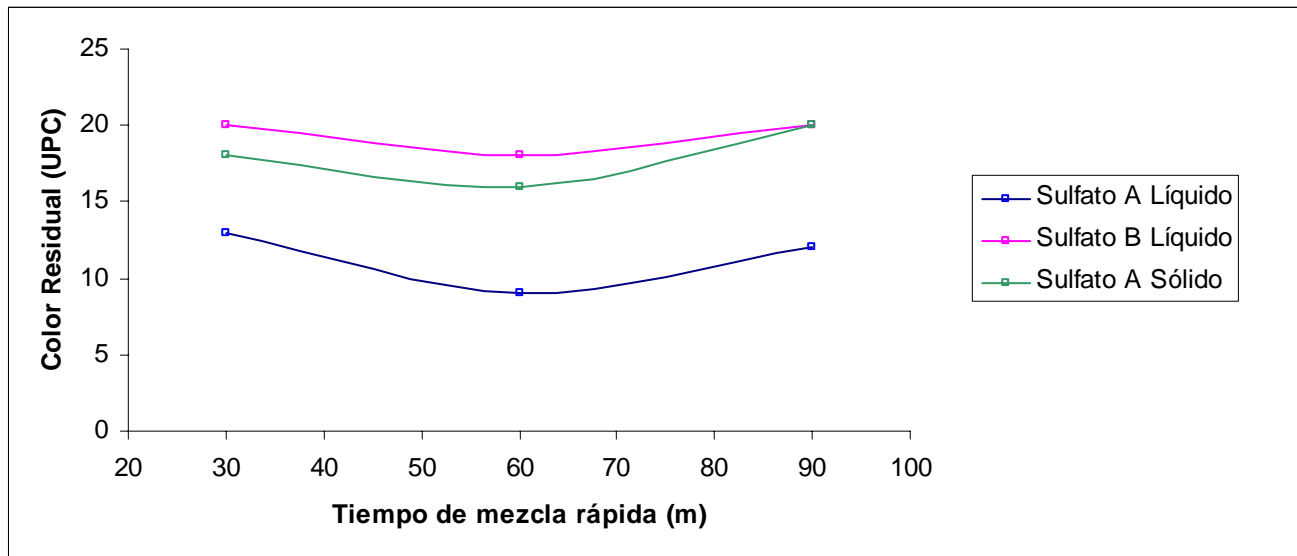
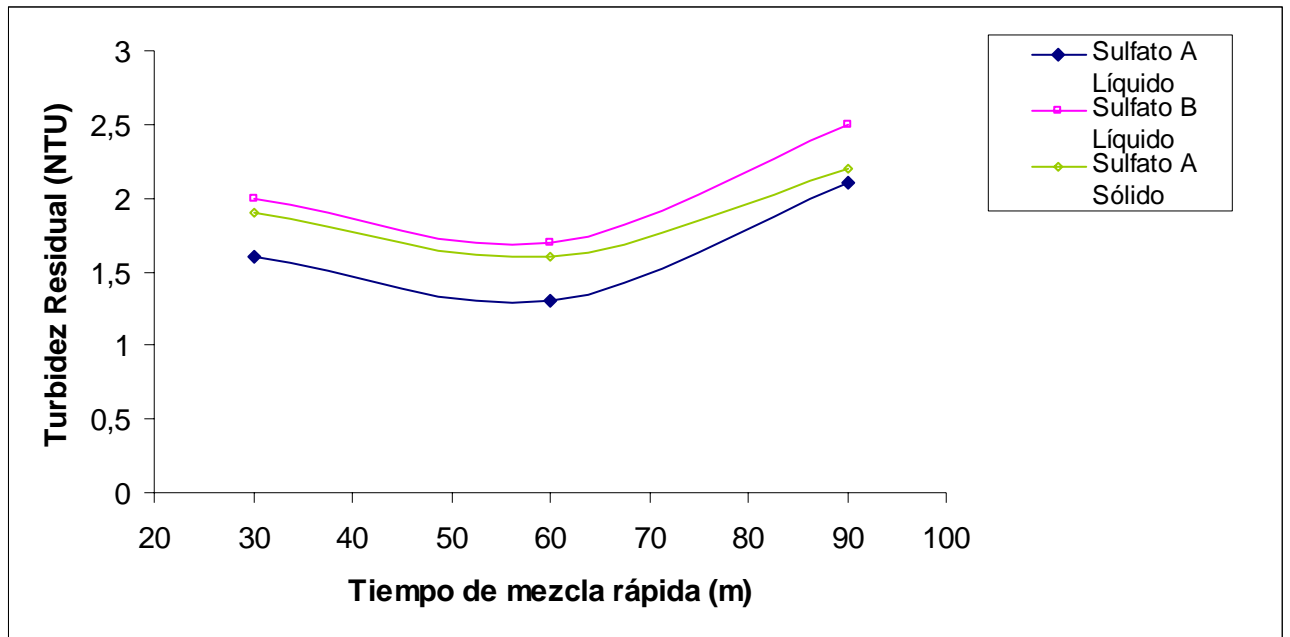
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-

MAIN EFFECTS					
A:Dosis de Coagula	186.0	4	46.5	5.94	(
B:Color Inicial	34.8	4	8.7	1.11	(
RESIDUAL	125.2	16	7.825		

TOTAL (CORRECTED)	346.0	24			

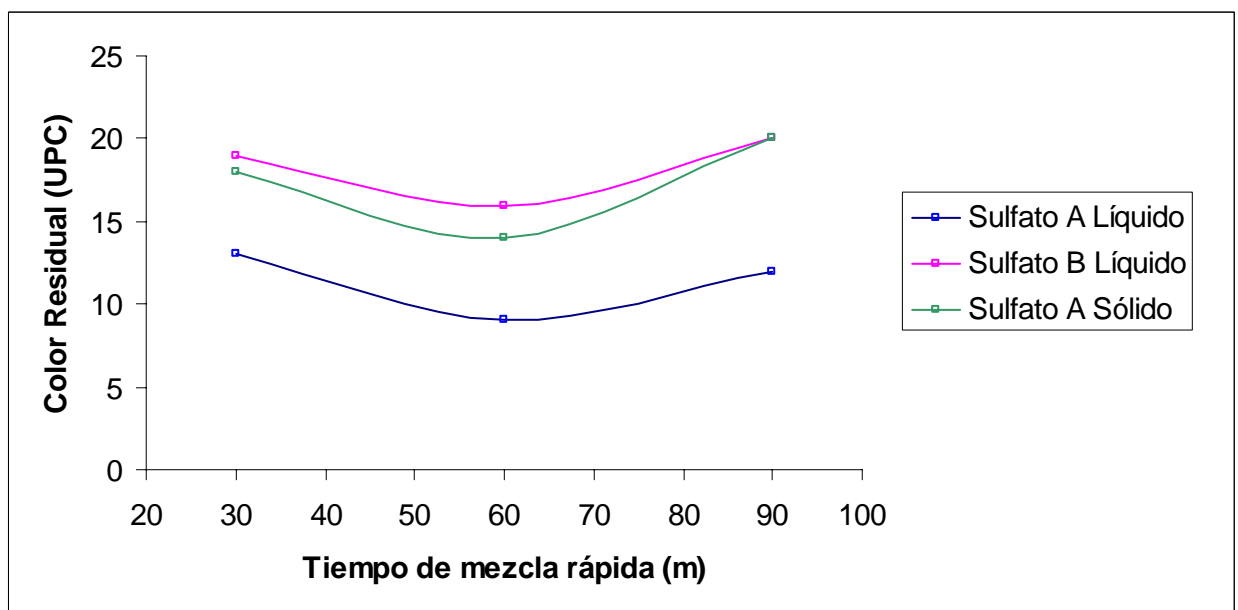
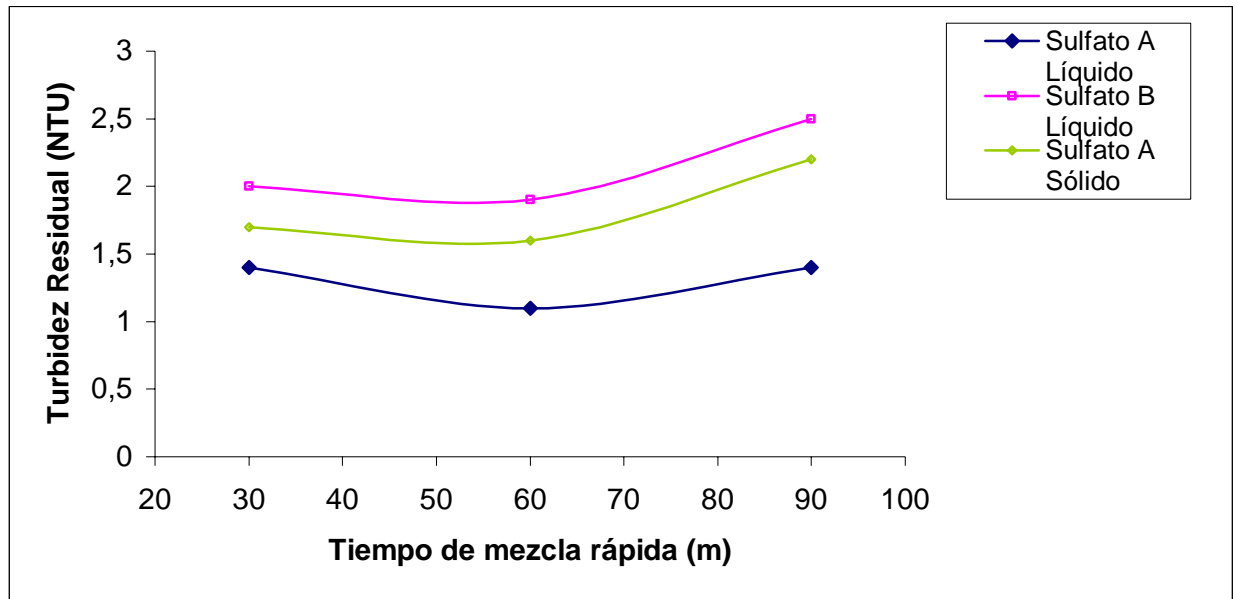
Anexo 10

DETERMINACIÓN DE TIEMPOS ÓPTIMOS DE MEZCLA RÁPIDA
PARA AGUA CON TURBIDEZ 5.7 NTU Y COLOR 55 UPC.



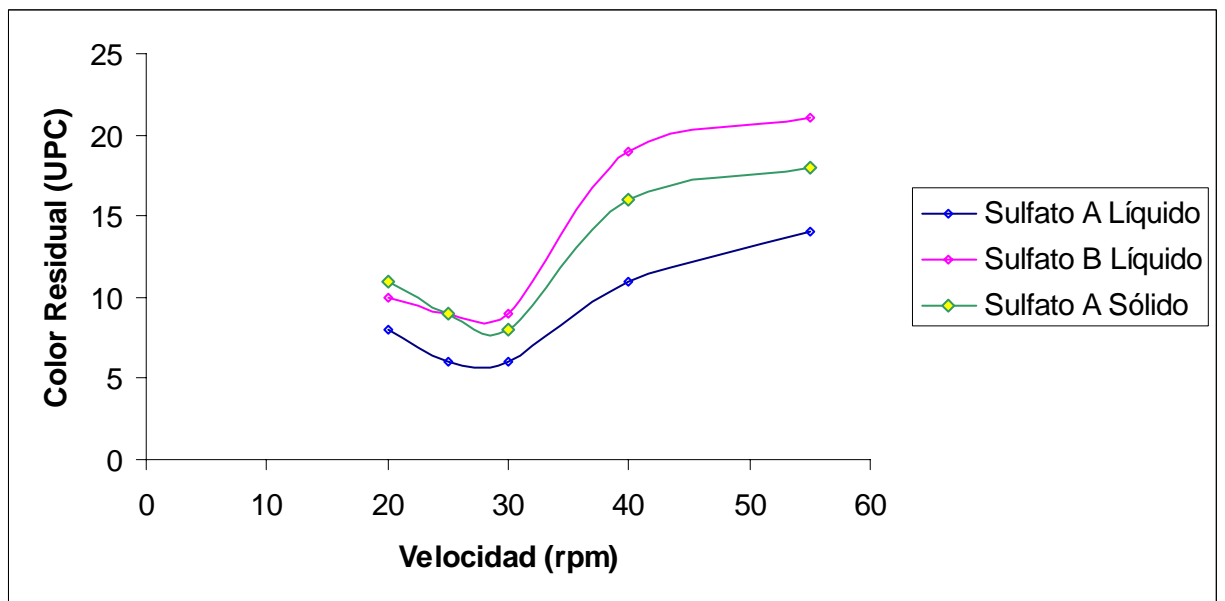
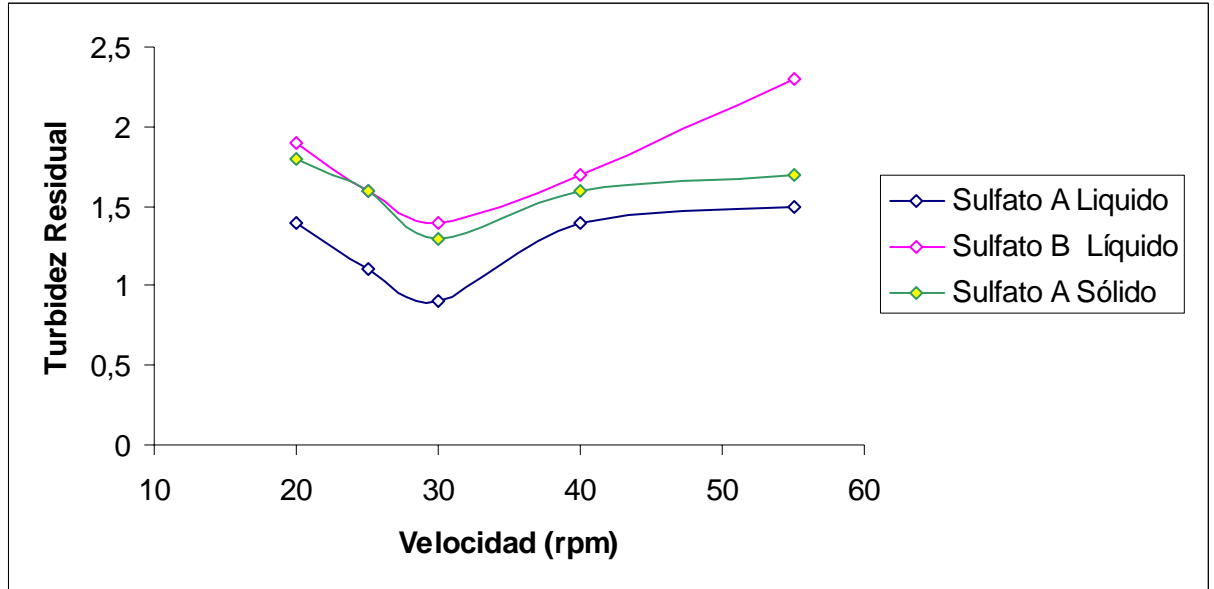
Anexo 11

DETERMINACIÓN DE TIEMPOS ÓPTIMOS DE MEZCLA RÁPIDA
PARA AGUA CON TURBIDEZ 8.7 NTU Y COLOR 69 UPC.



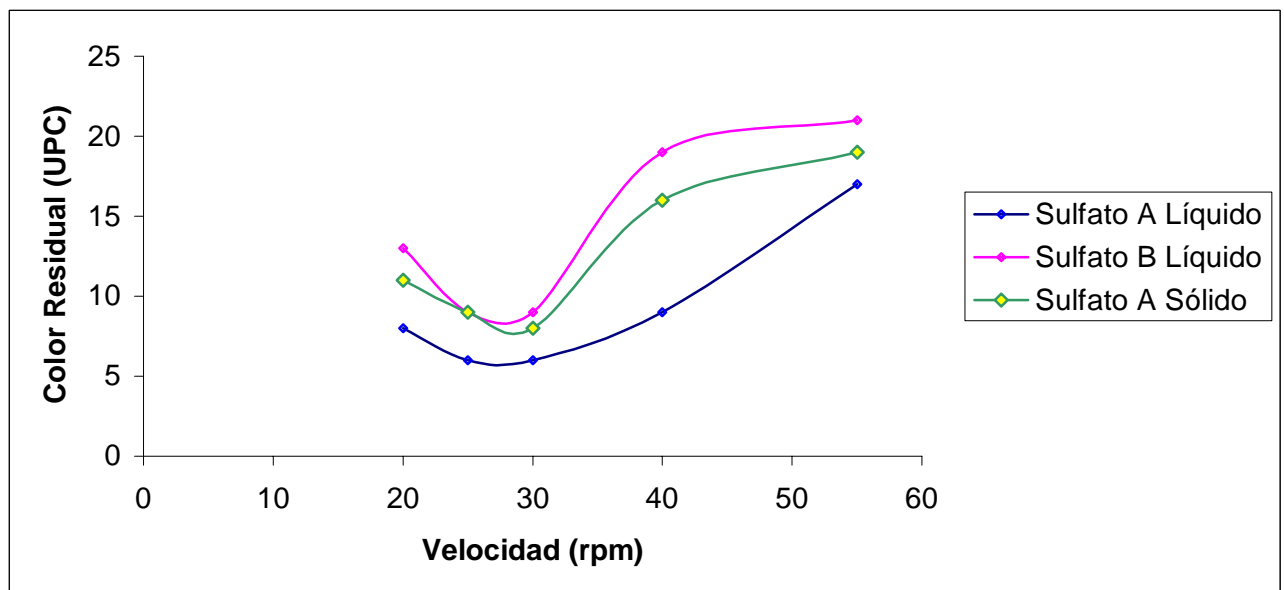
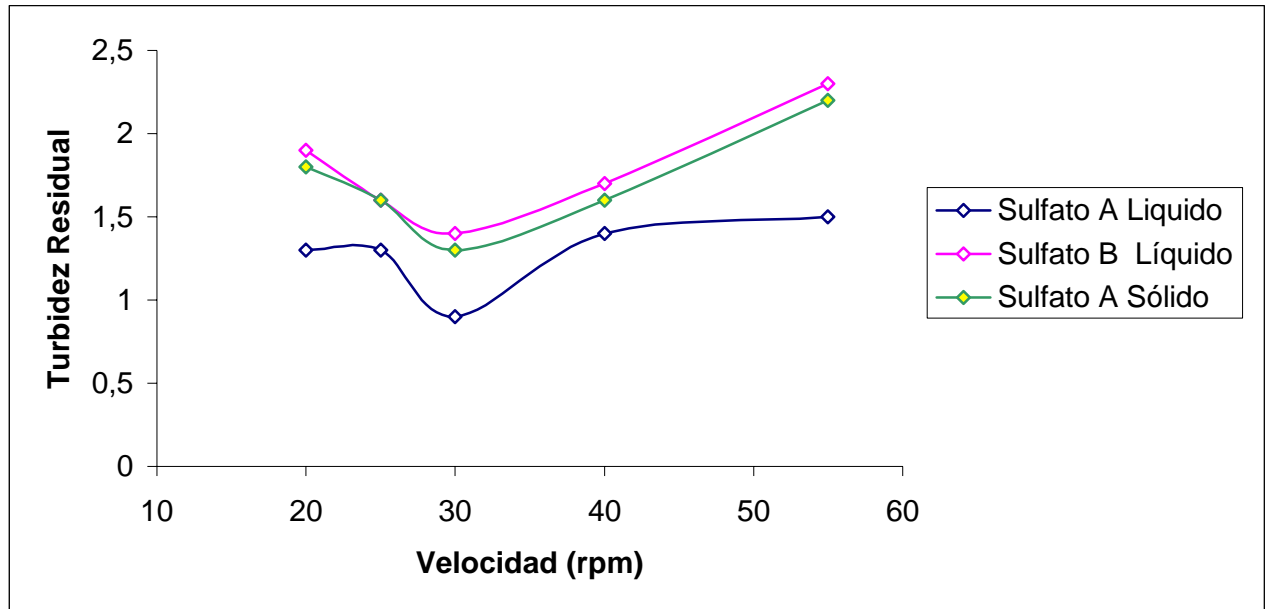
Anexo 12

DETERMINACIÓN DE TIEMPOS Y GRADIENTES DE FLOCULACIÓN PARA
AGUA CON TURBIDEZ 5.7 NTU Y COLOR 55 UPC.



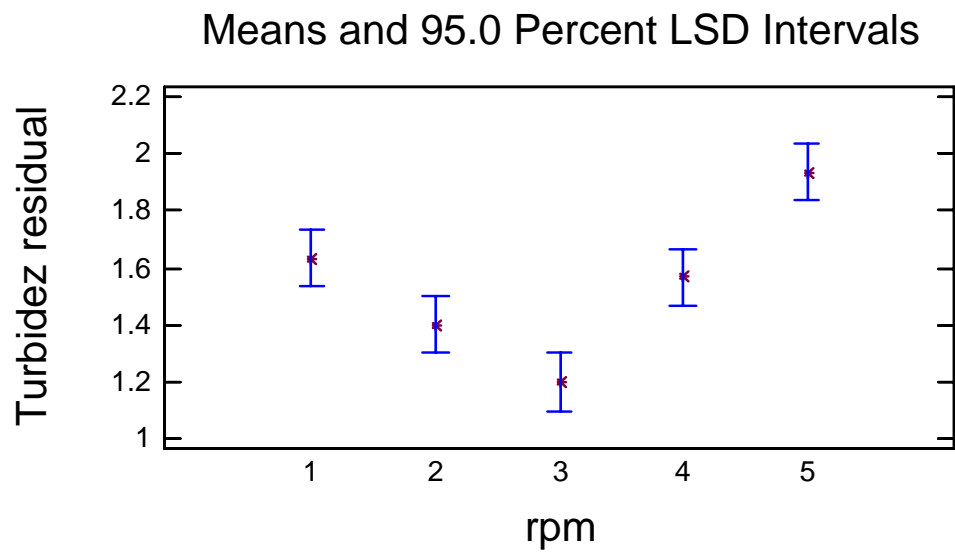
Anexo 13

DETERMINACIÓN DE TIEMPOS Y GRADIENTES DE FLOCULACIÓN PARA
AGUA CON TURBIDEZ 8.7 NTU Y COLOR 69 UPC.



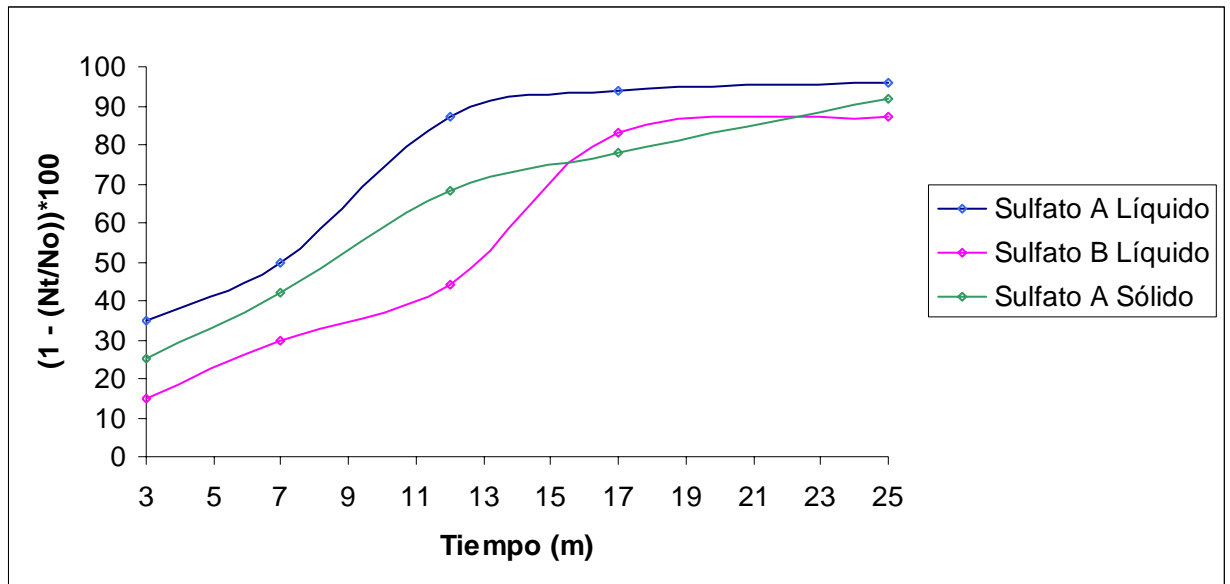
Anexo 14

GRÁFICO DE MEDIAS PARA DETERMINACIÓN DE GRADIENTE DE FLOCULACIÓN



Anexo 15

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS PARA AGUA CON
TURBIDEZ DE 5.7NTU Y 55UPC DE COLOR.



VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS PARA AGUA CON
TURBIDEZ DE 8.7NTU Y 69UPC DE COLOR.

