

**ESTUDIO DE LA ETAPA DE CLARIFICACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA
DESMINERALIZADA EN LA PLANTA TERMOPAIPA**

ANA MARIA MORALES BAUTISTA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO DE LA ETAPA DE CLARIFICACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA
DESMINERALIZADA EN LA PLANTA TERMOPAIPA**

ANA MARIA MORALES BAUTISTA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:

Ingeniera Química

DIRECTORA:

MARTHA JULIANA BARAJAS MENESES

Ingeniera Química PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias principalmente a **DIOS** y a la **VIRGEN de CHIQUINQUIRÁ**, por darme la inteligencia, entendimiento, paciencia y la capacidad para realizar este proyecto.

A mi papá **CARLOS MORALES** por prestarme su colaboración en la realización de mis estudios y apoyarme en esta etapa. A mi mami **FLOR BAUTISTA** por estar siempre conmigo brindándome apoyo, cariño, comprensión y por ser mí amiga.

A mi profe **MARTHA JULIANA BARAJAS**, por su apoyo, confianza, enseñanza, paciencia y dirección; porque sin su ayuda no hubiera culminado este proyecto con éxito. Gracias profe por su interés, dedicación y empeño. A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** por ser la promotora del saber.

Al Dr. **OMAR NOVA**, quien me dio la oportunidad en la realización de la práctica en la empresa **GENSA S.A.E.S.P.** y poder adquirir una experiencia enriquecedora.

Al ing. **PABLO COMBARIZA**, a Don **PEDRO PIRAZAN**, a la ing. **ALEXANDRA DEQUIS** y a todo el equipo del laboratorio de aguas, por los aportes significativos, por la gran colaboración y por poner a mi disposición los recursos necesarios para llevar a cabo las pruebas tanto en el laboratorio como en la planta. A todos los trabajadores, compañeros y amigos de la **planta TERMOPAIPA**, ya que de una u otra forma me brindaron su colaboración para el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO.....	15
1.1. PLANTA TERMOELÉCTRICA DE PAIPA (TERMOPAIPA).....	15
1.2. TRATAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS	15
1.3. PROCESOS DE CLARIFICACION DEL AGUA	16
1.4. COAGULANTES Y AYUDANTES DE FLOCULACIÓN	18
1.5. FACTORES DE DISEÑO EN MEZCLADORES.....	18
1.6. PRUEBA DE JARRAS	20
1.7. CARACTERISTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA.....	21
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
3. JUSTIFICACIÓN	24
4. OBJETIVOS	25
4.1. OBJETIVO GENERAL	25
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	25
5. ALCANCE	26
6. METODOLOGÍA.....	27
6.1. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	27
6.1.1. Mediciones de turbiedad, conductividad, color y pH en el agua cruda	28
6.1.2. Determinación de las dosificaciones optimas de coagulante y ayudante de floculación.....	28
6.1.2.1. Determinación de las condiciones de mezclado en las pruebas de jarras	28
6.1.2.2. Determinación de dosificaciones en la prueba de jarras.....	29
6.1.3. Dosificación en el tren de clarificación de TERMOPAIPA de acuerdo a la prueba de jarras (Prueba en planta).	29
6.1.4. Comparación de la calidad del agua en la prueba de jarras con los resultados obtenidos en la unidad de clarificación de TERMOPAIPA	30
6.1.5. Preparación del Modelo lineal.....	30

6.2. MATERIALES O INSUMOS EMPLEADOS.....	31
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
7.1. DETERMINACIÓN DE LAS DOSIFICACIONES OPTIMAS DE COAGULANTE Y AYUDANTE DE FLOCULACIÓN	32
7.2. COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PRUEBA DE JARRAS CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA UNIDAD DE CLARIFICACIÓN DE TERMOPAIPA.....	33
7.2.1. Empleando solo coagulante Sulfato de Aluminio	33
7.2.2. Empleando Sulfato de Aluminio con ayudante de floculación.....	33
7.3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO LINEAL	38
8. CONCLUSIONES.....	40
9. RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
ANEXOS	44

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones específicas para el agua de la caldera.....	16
Tabla 2. Descripción del clarificador usado en el trabajo.....	29
Tabla 3. Gradientes de velocidad y tiempos de retención hallados en la planta.....	32
Tabla 4. Condiciones tenidas en cuenta en las pruebas de jarras.....	32
Tabla 5. Resultados de la evaluación en la planta cuando se adicionó Sulfato de Aluminio.....	35
Tabla 6. Resultados de la evaluación en la planta cuando se adicionó Sulfato de Aluminio en compañía del ayudante de floculación SUPERFLOC A – 110.....	37

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tren del tratamiento de clarificación de agua.....	17
Figura 2. Diagrama de flujo de Procedimientos Experimentales.....	27
Figura 3. Comparación de las pruebas de jarras y pruebas en el coagulador (tanque clarificador).....	34
Figura 4. Comparación de los parámetros de calidad de agua entre las dos pruebas llevadas a planta.....	38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Procedimiento para prueba de jarras.....	44
Anexo B. Desarrollo de la prueba en la planta.....	52
Anexo C. Flujos de las bombas dosificadoras de químicos medidos experimentalmente.....	55
Anexo D. Ecuación empleada.....	56
Anexo E. Muestras de agua cruda seleccionadas y la determinación de la dosis optima de Sulfato de Aluminio mediante la prueba de jarras.....	57
Anexo F. Cálculo de gradientes de velocidad.....	58
Anexo G. Gráfica para la determinación de gradientes de velocidad.....	60
Anexo H. Rangos de parámetros tenidos en cuenta por la empresa para Agua industrial y residual de Sulfato de Aluminio obtenido en la prueba.....	61
Anexo I. Desarrollo del modelo matemático para estimar la dosis de Sulfato de Aluminio.....	62
Anexo J. Guía para los analistas en el momento de ajustar la bomba dosificadora de Sulfato de Aluminio y polímero teniendo en cuenta las condiciones iniciales del agua cruda.....	65

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA ETAPA DE CLARIFICACIÓN EN LA PRODUCCION DE AGUA DESMINERALIZADA EN LA PLANTA TERMOPAIPA.*

AUTOR: ANA MARIA MORALES BAUTISTA**

PALABRAS CLAVE: AGUA, DOSIS, OPTIMA, CLARIFICACIÓN, COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN.

DESCRIPCIÓN:

En los procesos de tratamiento de aguas se debe garantizar una mejor producción y una mejor calidad de la misma. La clarificación es parte de esos procesos y juega un papel muy importante, permitiendo la remoción de turbiedad y color.

Este trabajo se desarrolló con el fin de mejorar la clarificación del agua en la planta de tratamiento de agua desmineralizada de la unidad III, de la central Termoeléctrica de Paipa, TERMOPAIPA, que es empleada en la alimentación de las calderas para la generación de vapor, y para refrigeración de equipos auxiliares. Se utilizaron coagulantes alternativos, convencionales, y polímeros floculantes para comparar su desempeño a través de la metodología de prueba de jarras, los resultados obtenidos en esta prueba, se trasladaron a la planta de tratamiento de agua. Las dosificaciones de Sulfato de Aluminio, se utilizaron para desarrollar un modelo matemático para encontrar las dosis óptimas según las condiciones de agua cruda determinada por pH, conductividad, color y turbiedad. Este modelo permitirá a TERMOPAIPA ahorrar tiempos en la ejecución de pruebas de jarras.

Además se encontraron dosis óptimas para el Sulfato de Aluminio cuando se usa en conjunto el polímero aniónico (SUPERFLOC A-110), un ayudante de floculación. La utilización de este polímero permitió disminuir las dosis de Sulfato de Aluminio y lograr un agua de mejor calidad.

*Práctica empresarial

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Martha Juliana Barajas Ing. Química.

ABSTRACT

TITLE: ESTUDY OF CLARIFICATION ON STAGE PRODUCTION DEMINERALIZED WATER IN PLANT OF TERMOPAIPA.*

AUTHOR: ANA MARIA MORALES BAUTISTA**

KEYWORDS: WATER, DOSE, OPTIMA, CLARIFICATION, COAGULATION, FLOCCULATION, SEDIMENTATION.

DESCRIPTION:

In the water treatment processes, it must be guaranteed a better production and quality of the water. The clarification is one of these processes and plays an important, role that permits the removal of turbidity and color.

The objective of this work was to improve the clarification in the water treatment of demineralized water unit III in TERMOPAIPA that is used in the boilers or refrigeration of other equipments. The performance of conventional and alternative coagulants and flocculant polymers were compared through the jar test methodology. Following the jar tests, the results obtained in this test, were applied to the full scale plant. The aluminum sulfate doses were used to develop a mathematical model to find the optimum doses for different qualities of water, determined by pH, conductivity, color and turbidity. This model will allow TERMOPAIPA to save time in the conduction of more jar tests.

Besides, the optimum dose of Aluminum Sulfate when it is used with anionic polymer (SUPERFLOC A-110), a flocculation aid were determined. The use of this polymer led to the decrease of the dose of Aluminum Sulfate and achieve better water quality

*Enterprise practice

**Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Directora: Martha Juliana Barajas Ing. Química.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento del agua utilizado en los procesos industriales es un requerimiento importante, ya que es realmente una inversión que beneficia al proceso disminuyendo costos de operación e incrementando la eficiencia. Estos tratamientos son principalmente implementados cuando calderas y sistemas de refrigeración hacen parte del proceso.

Tratamientos externos e internos para el agua que alimenta a las calderas son considerados para evitar problemas. El tratamiento interno incluye un tratamiento *in situ*, donde se agregan agentes anti-incrustantes, anti-espumantes y agentes para eliminar la dureza. Por otro lado, el tratamiento externo incluye la reducción y remoción de impurezas en las etapas previas a la generación del vapor. Algunos tratamientos externos incluyen el intercambio iónico, la aireación y la clarificación, entre otros.

La etapa de clarificación es primordial en el tratamiento de agua y consta de tres procesos: coagulación, floculación y sedimentación. La coagulación ocurre cuando coagulantes químicos son agregados al agua combinándose con el material alcalino del agua cruda. La floculación es la etapa de mezclado lento para permitir la reacción química, y finalmente la sedimentación donde el material suspendido se sedimenta en el fondo del tanque. Los costos de la clarificación son altamente influenciados por la cantidad de coagulantes y químicos que se agregan durante el proceso. De esta manera, ensayos deben ser ejecutados para encontrar las dosis óptimas de estos químicos requeridos por la planta.

Para realizar estos ensayos, las pruebas de jarras constituyen una herramienta valiosa para simular las condiciones de coagulación, floculación y sedimentación que ocurren en las plantas de tratamiento. De esta manera, la central termoeléctrica de Paipa, TEMOPAIPA se ha interesado en encontrar las dosis óptimas que sus procesos de clarificación requieren, con el objetivo de disminuir los costos asociados de las cantidades en exceso de estos químicos y lograr un agua de mejor calidad.

Este trabajo de grado tienen como finalidad encontrar las condiciones en las pruebas de jarras que permitan simular los procesos de clarificación que ocurre en la Planta de tratamiento de agua de TERMOPAIPA, establecer una metodología que permita a sus técnicos y operarios realizar pruebas de jarras cuando otros estudios sean requeridos y evaluar el desempeño de los coagulantes y ayudantes de floculación. Los resultados de dosificaciones óptimas permitirán preparar un modelo que permita predecir las dosis adecuadas del coagulante a emplear para las diferentes condiciones iniciales de agua y así evitar la realización constante de pruebas de jarras por parte de los operarios.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. PLANTA TERMOELÉCTRICA DE PAIPA (TERMOPAIPA)

La central termoeléctrica de Paipa, TEMOPAIPA, es una empresa generadora de energía eléctrica a base de vapor por medio de carbón bituminoso pulverizado. Está ubicada en el kilómetro 3 vía Paipa-Tunja, vereda “El Volcán”, Municipio de Paipa, departamento de Boyacá. Es considerada la central de generación térmica a carbón más grande del país y cuenta con una capacidad neta instalada de 171 MW, distribuida así: la unidad I con 31 MW, la unidad II con 70 MW y la unidad III con 70 MW. Además, la planta cuenta con su propia planta para el tratamiento de aguas para alimentación de las calderas. En el año 2005 por determinación del Gobierno Nacional se capitalizó la Central Termoeléctrica de Paipa y pasó a GENSA, la cual además de administrar este activo ha realizado grandes inversiones con el firme propósito de mantener en óptimas condiciones técnicas las unidades. [1]

1.2. TRATAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS

El agua industrial, específicamente el agua que alimenta las calderas debe cumplir ciertos requerimientos. Ver Tabla 1. La forma más común para cumplir con estas condiciones es a través de una planta de agua desmineralizada que comprende un sistema de clarificación, un sistema filtración y un sistema de desmineralización. El sistema de clarificación precede al sistema de filtración, que descarga agua limpia de impurezas suspendidas. Mientras que el sistema de desmineralización utiliza el sistema de intercambio iónico, que incluye el intercambio catiónico, una unidad de desgasificación, y el intercambio aniónico.

Tabla 1. Condiciones específicas para el agua de la caldera.

Análisis	Unidades	Rango de control
pH	Unidades	8,8 – 9,4
Conductividad específica	µs/cm	3,5 – 7,0
Sílice	µg/l SiO ₂	< 20
Cobre	µg/l Cu	< 10
Hierro soluble	µg/l Fe	< 20

Fuente: Planta TERMOPAIPA.

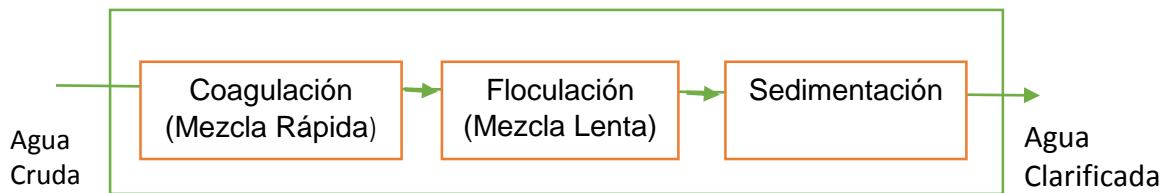
El intercambiador catiónico contiene resinas catiónicas fuertemente ácidas que adsorben todos los cationes presentes en el agua liberando una cantidad de protones. En la unidad desgasificadora, gases son eliminados antes de pasar a la unidad de intercambio aniónico donde se abstraen todas las impurezas aniónicas del agua liberando una cantidad de iones hidroxilo para obtener un agua limpia de impurezas iónicas. [5]

1.3. PROCESOS DE CLARIFICACION DEL AGUA

Los procesos de clarificación incluyen la coagulación, la floculación y el proceso de sedimentación. En el caso de la *coagulación*, coagulantes metálicos o polímeros cargados positivamente son agregados para disminuir la carga negativa superficial de las partículas presentes en el agua. Es, de hecho, la atracción de la carga negativa de las partículas con las cargas positivas de los coagulantes lo que permite la formación de partículas más grandes. Los coagulantes de más amplio uso corresponden al Sulfato de Aluminio, llamado también Alum y el Hidroxicloruro de Aluminio llamado comúnmente, PAC, que proveen el catión trivalente de Aluminio. Algunos tipos de coaguladores son el de tipo hidráulico y el de tipo mecánico. Este

último incluye el uso de agitadores tipo paleta y tipo turbina. La potencia de estos sistemas debe ser la suficiente para que ocurra una mezcla rápida y evitar reacciones reversas. En la figura 1 se muestran los procesos de clarificación.

Figura 1. Tren de tratamiento de Clarificación de Agua.



Fuente: Autor

Después de la mezcla rápida, la velocidad es disminuida para permitir que las partículas que ahora tienen menos cargas negativas debido a la coagulación, se atraigan para que las partículas aumenten su tamaño. Básicamente, un gran número de partículas pequeñas son transformadas en un número más pequeño de partículas más grandes. Este paso también es llamado *floculación ó mezcla lenta*. Existen diferentes tipos de floculadores como: floculadores de paleta, de bafles, y de tubería.

Después de la floculación, la remoción de los sólidos es lograda gracias a la *sedimentación*. El tiempo de sedimentación varía entre 2 y 4 horas. Estos tres pasos son importantes para una efectiva filtración puesto que una alta carga de sólidos serían aplicados en el sistema de filtración. [2]

1.4. COAGULANTES Y AYUDANTES DE FLOCULACIÓN

Coagulantes primarios típicos son: Alum y las sales férricas, ambos proporcionan una gran cantidad de iones cargados positivamente en el agua que empiezan a atraerse por las partículas de carga negativa en el agua. La reacción de alum y sales férricas en el agua son gobernadas por la intensidad del mezclado, pH, temperatura alcalinidad y la turbiedad. Alum trabaja mejor en un rango de pH entre 5.8 y 8.5, mientras que las sales férricas trabajan en rangos más amplios. En común, ambos consumen la alcalinidad reduciendo el pH.

Adicionalmente hay coagulantes no convencionales como el Hidroxicloruro de Aluminio, $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Es una sal inorgánica capaz de favorecer la formación de flóculos. El rango óptimo de pH está entre 5.0 y 9.0; es considerado un polímero inorgánico puesto que durante su hidrólisis forma polímeros como $[\text{Al}_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_8]^{+4}$; $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{22}]^{+2}$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{24}]$, $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{+7}$, $[\text{Al}_{14}(\text{OH})_{38}]^{+8}$, $[\text{Al}_{30}\text{Cl}_9(\text{OH})_{81}(\text{H}_2\text{O})_{38}]^{+5}$, y $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}(\text{H}_2\text{O})_{10}]\text{Cl}_4$.

Finalmente, los ayudantes de floculación se usan para mejorar el proceso de coagulación y reducir la dosificación de coagulantes primarios. Entre estos los más comunes son los polielectrolitos aniónicos, como la poliacrilamida aniónica. Esta es considerada muy tóxica y su dosificación debe ser menor de 1 mg/L, así que su uso requiere verificación de niveles de concentración seguros. La dosis óptima aumenta linealmente con la dosificación de Sulfato de Aluminio, pero no se modifica el margen de pH óptimo para la coagulación. [6]

1.5. FACTORES DE DISEÑO EN MEZCLADORES

La energía de los mezcladores es determinada por los gradientes de velocidad. El gradiente de velocidad es denotado por G y este es usado para medir la intensidad

del mezclado. A su vez, G junto con el tiempo de retención, T , son factores a tener en cuenta en el diseño de Plantas purificadoras de agua. Un alto G indica un mezclado violento y un bajo G indica un mezclado suave. Para una coagulación efectiva, un mezclado intenso es requerido para asegurar que el coagulante sea distribuido rápidamente a través del agua antes de que sales insolubles sean formadas.

El gradiente de velocidad es:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V \cdot \mu}} \quad (1)$$

Donde P es la potencia disipada, V es el volumen del tanque y μ que es la viscosidad del agua a cierta temperatura.

En el caso de la mezcla rápida, donde los coagulantes son agregados sobre vertederos, la potencia de disipación se puede escribir como:

$$P = \rho ghQ \quad (2)$$

Donde P es la potencia disipada, Q es el flujo volumétrico, ρ es la densidad del líquido en kg/m^3 , g es la aceleración debida a la gravedad y h es la distancia de caída sobre el vertedero.

Para el floculador donde ocurre una mezcla mecánica, la potencia del agitador mecánico puede ser deducida así:

$$P = K_T * n^3 * D^5 * \rho \quad (3)$$

Donde $K_T=5,75$ constante de agitación, n es la velocidad de rotación en revoluciones por segundo (rps) o (s^{-1}); D : diámetro del rodete (m) $\sim 3/8$ del diámetro del floculador y ρ : Densidad del agua a 20 °C (kg/m^3). [3]

1.6. PRUEBA DE JARRAS

La prueba de jarras es reconocida por la industria del agua como una herramienta valiosa para simular la coagulación, floculación y sedimentación de un proceso en una planta de tratamiento de agua. Esta prueba puede ser hecha por muchas razones como: evaluar los efectos de cambios en dosis de químicos, escoger coagulantes alternativos, y evaluar diferentes intensidades de mezclado y tiempo. Es importante que las condiciones usadas en la prueba de jarras simulen las condiciones de la planta. Para hacer esto se requiere el conocimiento de las características hidráulicas de la planta como: gradiente de velocidad, tiempos de retención en la coagulación, floculación, y velocidad de cargue de la sedimentación.

Los equipos donde se realizan estas pruebas consisten de jarras que contienen el agua, el impulsor, el mecanismo que enciende el impulsor y equipo de laboratorio para analizar el agua. Típicamente, los equipos incluyen 4 o 6 jarras con puertas para la muestra y mezcladores de paletas. Estas jarras pueden ser de 1L o 2 L; estas deben ser transparentes, deben incluir marcas para volumen, fácil de limpiar y tener durabilidad.

El mecanismo de agitación puede ser magnético o mecánico. En el caso del último, implica un motor con diferentes cambios. Este mecanismo esta sobre las jarras así que el eje giratorio se extiende hacia abajo en cada jarra. Este mecanismo debe controlar las revoluciones por minuto, rpm, entre 10 y 300 rpm. Mientras que la unidad de encendido magnético tiene la ventaja de proveer espacio abierto sobre las jarras para agregar los químicos y proveer un rango muy amplio de revoluciones por minuto. Cuando la temperatura del agua es diferente a la del laboratorio donde se harán los ensayos, un baño de agua para mantener la temperatura correcta debe ser usado.

Con el objetivo de simular los procesos de coagulación y floculación en la pruebas de jarras, valores de gradientes de velocidad, G , del proceso deben ser mantenidos

en esta prueba. De esta manera se podrá tener una similitud dinámica entre las jarras y la planta. [4]

1.7. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL AGUA

pH: El valor de pH es un índice de la fracción de H^+ presente en el agua. Es una medida de acidez que puede utilizarse para predecir la tendencia a la corrosión. En el agua neutra hay una concentración H^+ igual a OH^- , que equivale a un pH de 7. Las agua con pH inferior a 7 se dicen que son aguas acidas y las aguas con el pH superior a 7 se dicen que son aguas básicas. El pH puede variar entre (0 -14).

CONDUCTIVIDAD: Esta propiedad determina el contenido de sales disueltas o contenido de sólidos totales disueltos en el agua. Esta se expresa en microsiemens/cm ($\mu\text{s/cm}$). La conductividad depende de la presencia de iones, de su concentración, movilidad, valencia y temperatura ambiental.

COLOR: Este resulta de la presencia de diferentes sustancias como iones metálicos naturales, humus y materia orgánica disuelta. Se puede medir dos tipos de colores, color verdadero que es el color del agua sin turbiedad causado por materia suspendida a nivel coloidal y el color aparente que es color con sustancias disueltas y material en suspensión que interfiere en la calidad del agua y se determina en la muestra original sin filtrar. El método estándar utiliza patrones de platino cobalto y la unidad de color (UPC) es producida por 1 mg/L de platino en la forma del ion cloroplatino.

TURBIDEZ: Es una propiedad del agua, y se reporta como la transmitancia de la luz. El paso de la luz es retrasado por la presencia de materiales en suspensión, o

favorecido por la transparencia del agua. Los parámetros que influyen en la turbiedad del agua son: sedimentos procedentes de la erosión, descargas de efluentes, crecimiento de las algas y materia orgánica. La turbiedad se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

ALCALINIDAD. Las agua alcalinas presentan contenidos de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, pero también boratos, silicatos, nitratos y fosfatos contribuyen con esta. El dato de alcalinidad, se expresa en ppm o mg/l de carbonato de calcio. [7]

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

TERMOPAIPA cuenta con un lago de enfriamiento en el cual desembocan aguas del río Chicamocha que viene mezclado principalmente con agua del río Jordán y del río la Copa. Estas aguas contienen un alto contenido de sustancias orgánicas e inorgánicas además de minerales como hierro. Las condiciones del agua en los lagos es dinámica debido a efectos ambientales como la respiración de especies y descomposición orgánica, que conllevan a una pérdida de oxígeno. Además de las lluvias fuertes que provocan erosión llevando sedimentos a los lagos que aumentan el material sólido suspendido.

Estas condiciones cambiantes en el agua cruda que alimenta a TERMOPAIPA, afectan notablemente los procesos de tratamiento, y específicamente, los tratamientos de clarificación, causando modificaciones en las dosis óptimas de coagulantes y ayudantes de floculación que la planta requiere. Si estos cambios en las condiciones del agua son inadvertidos, las cantidades agregadas de los coagulantes y floculantes podrían ser diferentes a las cantidades óptimas causando que el agua producida sea de baja calidad. Si la dosificación está por debajo de la óptima, los flóculos formados serán inapropiados y no se sedimentarán, pasando a través de los filtros donde pueden romperse y aparecer al final como turbidez. Esta excesiva turbidez conlleva a una reducción de la eficiencia de la filtración. Por el contrario, una dosificación por encima de la óptima, además de incrementar los costos, conduce a que el exceso de los coagulantes se sedimenten, reflejando una mayor cantidad de lodos.

3. JUSTIFICACIÓN

Los problemas que se originan en la planta de tratamiento de agua causados por una mala dosificación serán evitados si se disponen de medios que permitan conocer las dosis óptimas requeridas por la planta. De esta manera, ensayos deben ser ejecutados para encontrar las dosis óptimas de estos químicos en la escala de producción.

Para realizar estos ensayos, las pruebas de jarras constituyen una herramienta valiosa para simular las condiciones de coagulación, floculación y sedimentación que ocurren en las plantas de tratamiento. Este trabajo de grado permitirá a TERMOPAIPA ahorrar tiempo y recursos en elaborar pruebas de jarras innecesarias puesto que se proveerá un modelo para predecir dosificaciones óptimas de coagulante. Finalmente, al utilizar las dosificaciones óptimas, la calidad del agua mejorará beneficiando los procesos de TERMOPAIPA.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la etapa de clarificación en la producción de agua desmineralizada en la planta TERMOPAIPA.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar ensayos de prueba de jarras a nivel de laboratorio para encontrar las dosificaciones optimas de coagulantes, y ayudantes de floculación para el agua cruda de la planta de tratamiento de agua de TERMOPAIPA.
- Verificar la similitud hidráulica entre las jarras y la planta con pruebas directas en la planta.
- Determinar un modelo matemático, el cual establezca la dosis de coagulante según las condiciones iniciales del agua cruda.

5. ALCANCE

Esta investigación permitirá determinar las dosificaciones óptimas de Sulfato de Aluminio, de Hidroxicloruro de Aluminio líquido, y un polímero aniónico con el fin de evaluar su capacidad de reemplazo con Sulfato de Aluminio y su eficacia frente al mejoramiento de la calidad del agua. Esta práctica incluye la verificación de las condiciones en la prueba de jarras que simulen las condiciones en el proceso de clarificación de agua de TERMOPAIPA. Una vez las condiciones en las prueba de jarras sean verificadas con las de la planta, se procederá a obtener dosificaciones óptimas para las distintas condiciones de agua con las que contará la empresa durante el tiempo que dure esta práctica.

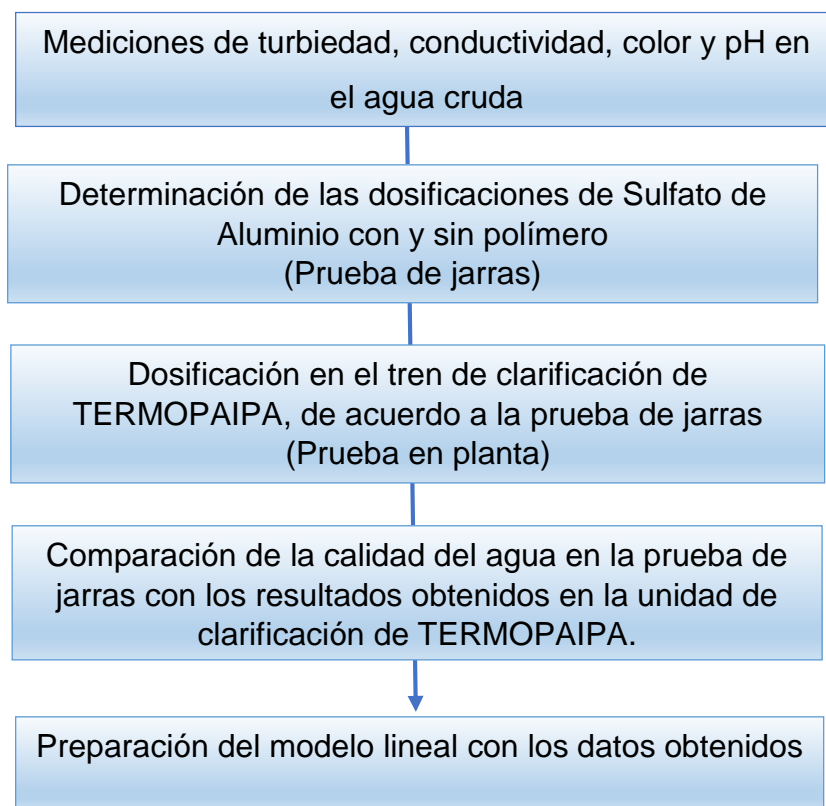
Al finalizar la práctica, los datos obtenidos serán usados para obtener un modelo lineal que permita a la empresa conocer y predecir estas dosificaciones, ahorrando tiempo en la realización de más pruebas de jarras.

6. METODOLOGÍA

6.1. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Los procedimientos usados en este trabajo se resumen en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo de Procedimientos Experimentales.



Fuente: Autor

6.1.1. Mediciones de turbiedad, conductividad, color y pH en el agua cruda

Para la medición de turbiedad se utilizó un *nefelómetro* WTW, serie TurB 430 IR, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra. Para la medición de conductividad se empleó el *conductímetro* WTW, serie cond 3210. Se tomó la muestra de agua cruda en un Erlenmeyer, se introdujo la sonda y se midió la conductividad en unidades microsiemens/cm ($\mu\text{s}/\text{cm}$). El color aparente fue medido por medio del *espectrofotómetro* HACH DR 5000, serie No. 1411423. Se tomó una celda y a esta se le añadió una muestra de agua desmineralizada como blanco, para ajustar el cero en el equipo. Luego de ajustar el cero se añadió la muestra de agua cruda a la misma celda y se leyó el color aparente en unidades (UPC). Finalmente para medir el pH *del agua* se empleó el medidor de pH WTW, serie pH 3110. Se tomó la muestra de agua cruda en un Erlenmeyer, se introdujo el electrodo y se registró el pH cuando la lectura de pH se estabilizó.

6.1.2. Determinación de las dosificaciones óptimas de coagulante y ayudante de floculación

6.1.2.1. Determinación de las condiciones de mezclado en las pruebas de jarras

Para la determinación de las condiciones de mezclado en las prueba de jarras, se calculó el gradiente de mezclado y el tiempo de residencia en la planta para la coagulación y floculación. Estos valores se utilizaron para calcular las revoluciones por minuto que simulan la intensidad de mezclado en la planta. Los tiempos de retención en la prueba de jarras fueron equivalentes a los de la planta.

6.1.2.2. Determinación de dosificaciones en la prueba de jarras

Para esto se usó un equipo de marca *PHIPPS & BIRD STIRRER*, con 6 jarras, agitadas mecánicamente. La mejor jarra fue seleccionada de acuerdo a la que presentó menor turbiedad y color. Los agitadores fueron tipo paleta. Para el procedimiento detallado que se llevó a cabo en la prueba de jarras, Ver Anexo A. Aquí se probó el Hidroxicloruro de Aluminio y el Sulfato de Aluminio tipo A como coagulantes y el polímero aniónico como ayudante de floculación en conjunto con el Sulfato de Aluminio. Según estas pruebas se hizo la comparación de los dos coagulantes y de la eficacia del polímero para saber cuál de estas pruebas eran llevadas a escala real.

6.1.3. Dosificación en el tren de clarificación de TERMOPAIPA de acuerdo a la prueba de jarras (Prueba en planta).

Tabla 2. Descripción del tanque clarificador usado en este trabajo.

Sección	Tiempo de retención	Volumen (m ³)	Revoluciones por minuto (rpm)
Tanque clarificador	4,2 horas	62,832	---
Mezcla rápida	1,1 minutos	0,276	Hidráulica
Mezcla lenta	13,3 minutos	3,324	23
Sedimentador	3,96 horas	59,232	---

Fuente: Autor

Para la dosificación de la unidad de clarificación se tomaba una muestra del agua de alimentación para ejecutar la prueba de jarras. Según la dosificación dada por la prueba de jarras, el tanque era dosificado a través de tanques auxiliares. La unidad de clarificación en TERMOPAIPA corresponde a una unidad de contacto de sólidos.

Esta unidad de clarificación normalmente maneja un flujo de 15 m³/h y fue fabricado por *Mitsubishi*. Estos tipos de clarificadores son ampliamente usados puesto que la coagulación, la floculación y la sedimentación ocurren en la misma unidad y debido a la recirculación de los sólidos durante la floculación, aumenta la eficiencia del proceso. En la tabla 2 se muestran los datos detallados del coagulador o tanque clarificador y sus respectivas secciones.

La prueba del coagulante empleado se hizo con Sulfato de Aluminio puesto que dio un mejor desempeño con respecto al Hidroxicloruro de Aluminio, durante dos semanas, donde se ensayaron dosis entre 55 y 37 ppm, que fueron las obtenidas en la prueba de jarras. La prueba de coagulante con polímero se hizo durante 4 días consecutivos. Para el procedimiento detallado de la prueba a escala real Ver Anexo B.

6.1.4. Comparación de la calidad del agua en la prueba de jarras con los resultados obtenidos en la unidad de clarificación de TERMOPAIPA

La calidad del agua al final de la unidad de clarificación y la prueba de jarras fue comparada para obtener correlaciones que indicaran hasta qué grado las condiciones en las pruebas jarras se comparaba con las condiciones en la planta.

6.1.5. Preparación del Modelo lineal

Para la elaboración de este modelo se hizo un seguimiento de las condiciones del agua cruda proveniente del lago de enfriamiento de la empresa, entre los meses de agosto y diciembre. En total se recogieron 93 muestras de las cuales fueron tenidas en cuenta 32 (Ver Anexo E), con las mayores variaciones. A cada una de estas muestras se le determinó la dosis óptima de coagulante. Este modelo se hizo para

determinar la dosis óptima de Sulfato de Aluminio a emplear según las condiciones iniciales del agua.

6.2. MATERIALES O INSUMOS EMPLEADOS

Sulfato de Aluminio tipo A, Quiminfloc 1325, con el nombre comercial de Hidroxicloruro de Aluminio, Quiminfloc 1200 (poliacrilamida anionica), con nombre comercial SUPERFLOC de la serie A-110. Todos los materiales fueron suministrados por QUIMINSA, Químicos Industriales asociados S.A.S.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. DETERMINACIÓN DE LAS DOSIFICACIONES OPTIMAS DE COAGULANTE Y AYUDANTE DE FLOCULACIÓN

Para determinar las dosificaciones de Sulfato de Aluminio con y sin polímero se calculó el gradiente de velocidad para la coagulación y la floculación en la planta. Los resultados del gradiente calculado son mostrados en la Tabla 3. Para el procedimiento detallado del cálculo, Ver Anexo F.

Tabla 3. Gradientes de velocidad y tiempos de retención hallados en la planta.

PROCESO	GRADIENTE (s ⁻¹)	TIEMPO DE RETENCIÓN (min)
Mezcla rápida	171,92	1,1
Mezcla lenta	37,51	13,3

Fuente: Autor

Las revoluciones por minuto equivalentes a los gradientes de mezcla fueron leídas en la gráfica Ver Anexo G y se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones tenidas en cuenta en la prueba de jarras.

PROCESO	REVOLUCIONES POR MINUTO (Rpm)	TIEMPO (minutos)
Mezcla rápida	100	1
Mezcla lenta	40	15
Sedimentación	-----	10

Fuente: Autor

7.2. COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PRUEBA DE JARRAS CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA UNIDAD DE CLARIFICACIÓN DE TERMOPAIPA.

7.2.1. Empleando solo coagulante Sulfato de Aluminio

En la Tabla 5 se presentan los resultados en la planta añadiendo Sulfato de Aluminio como coagulante. Se observó que el pH disminuye casi en 2 unidades tras la adición de este coagulante. Así mismo una sobredosificación de Sulfato de Aluminio conllevaría a una disminución excesiva de pH y se puede decir, entonces, que un pH inferior a 4 predice una sobredosificación. Adicionalmente para verificar si hubo o no sobredosificación, también se hizo un análisis diario durante la prueba de sulfato residual que no debe exceder de 50 mg/L SO_4 . Ver Anexo H tabla 2. Los resultados muestran que no hubo sobredosificación.

Por otro lado se observó que al añadir el Sulfato de Aluminio como coagulante, este aumentó la conductividad. Este comportamiento se observó en más proporción en el tanque clarificador que en las jarras. En cuanto al color y la turbiedad, hubo una buena remoción de estos parámetros, puesto que se observaron colores entre 8 y 15 (UPC), similares en las jarras y en la planta. Las turbiedades en el agua clarificada estuvieron entre 0,6 y 1,2 (NTU) también similares en las jarras y en la planta. Estos resultados fueron favorables de acuerdo a los requerimientos exigidos por la empresa para agua clarificada o coagulada. Ver Anexo H tabla 1.

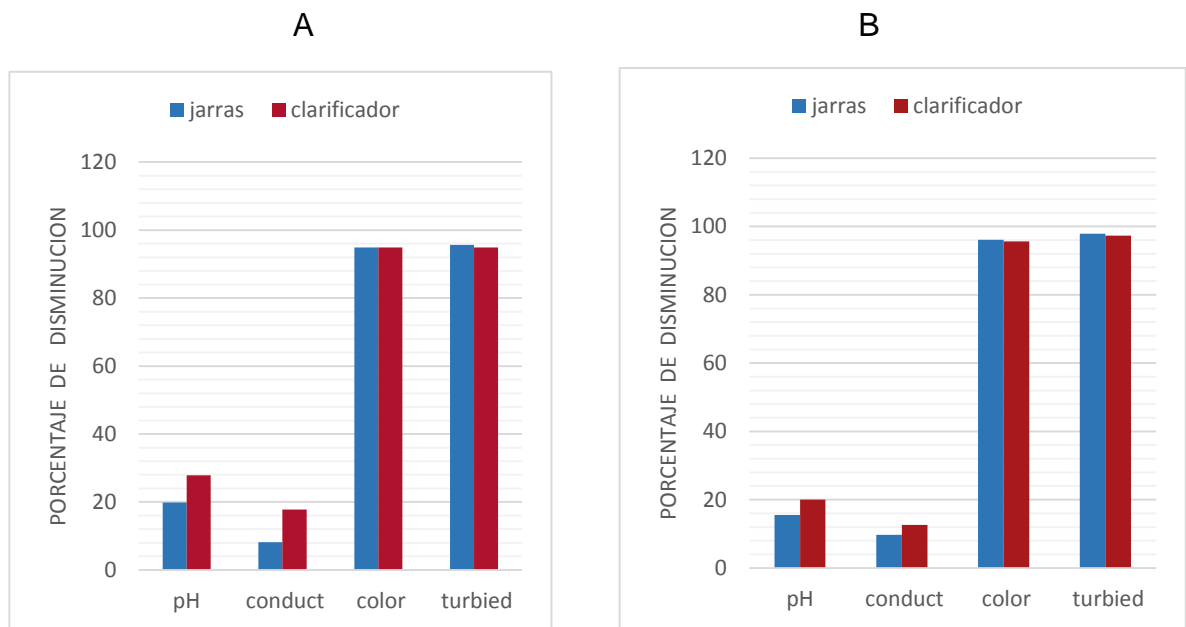
7.2.2. Empleando Sulfato de Aluminio con ayudante de floculación

En la Tabla 6 se evidencia que con la adición del polímero se reduce la dosis de sulfato empleado en 10 ppm. Esto conlleva a que se obtuvieron pH mayores de 5,1. La conductividad no se vio afectada por el ayudante de floculación pero si se vio un

menor aumento ya que se usó una dosis más baja de sulfato. Se observó una mayor remoción de turbiedad más que de color generando turbiedades menores de 0,5 (NTU) y colores menores que 10 (UPC). Los parámetros analizados en las muestras de agua clarificada presentaron similitud con los obtenidos en las jarras.

Según las gráficas mostradas en la figura 3 se puede ver que en la gráfica A y B se evidencian la similitud de los datos obtenidos en las jarras y los datos obtenidos en el tanque clarificador, mostrando el porcentaje de remoción de pH, color y turbiedad, así mismo el porcentaje de aumento de conductividad del agua clarificada.

Figura 3. Comparación de las pruebas de jarras y pruebas en el coagulador (tanque clarificador). A) Sulfato de Aluminio B) sulfato de aluminio con ayudante de floculación.



Fuente: Autor.

Tabla 5. Resultados de la evaluación en la planta cuando se adicionó Sulfato de Aluminio. Fuente: Autor.

RESULTADOS DE LA EVALUACION A ESCALA REAL CUANDO SE ADICIONANDO SULFATO DE ALUMINIO												Volumen tanque sulfato (L)			Sulfato preparado (kg)		
												920			12.5		
												920			11		
Fecha	Hora	Caudal (m ³ /h)	Dosis de sulfato según jarras ppm o (mg/L)	Flujo de la bomba (L/h)	Dial de la bomba (%)	pH (unidades)			Conductividad (µs/cm)			Color (UPC)			Turbiedad (NTU)		
						Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador
27/10/14	09:40	15	54	60	55	6,8	5,3	5,1	170,3	185	195,5	132	10	13	13	0,75	0,87
27/10/14	11:40	15	54	60	55	6,8	5,3	4,8	170,3	185	202	132	10	9	13	0,75	0,83
27/10/14	01:40	15	54	60	55	6,8	5,3	4,7	170,3	185	206	132	10	11	13	0,75	0,9
27/10/14	03:40	15	54	60	55	6,8	5,3	4,8	170,3	185	206	132	10	13	13	0,75	1,1
28/10/14	11:15	15	52	57	50	6,8	5,5	4,9	169,8	180,6	194,6	162	10	12	14,7	0,7	0,8
28/10/14	01:15	15	52	57	50	6,8	5,5	4,8	169,8	180,6	197,4	162	10	13	14,7	0,7	0,97
30/10/14	09:30	15	59	73	65	7	5,9	5,9	171,1	184	183	128	8	15	8,52	0,7	1,4
30/10/14	11:30	15	59	73	65	7	5,9	6	171,1	184	183	128	8	10	8,52	0,7	0,62
30/10/14	03:30	15	59	73	65	7	5,9	5,9	171,1	184	185,6	128	8	13	8,52	0,7	0,8
31/10/14	09:30	15	45	56	50	6,9	5,9	5,7	162,7	173,3	180	252	6	10	25,7	0,65	0,9
31/10/14	11:30	15	45	56	50	6,9	5,9	5,7	162,7	173,3	177	252	6	9	25,7	0,65	0,81
31/10/14	01:30	15	45	56	50	6,9	5,9	5,8	162,7	173,3	177,5	252	6	8	25,7	0,65	0,9
04/11/14	09:30	25	44	92	80	7,1	5,4	4,7	128,9	147	176,3	282	7	7	27,3	0,9	0,65
04/11/14	01:30	25	44	92	80	7,1	5,4	4,6	128,9	147	175	282	7	9	27,3	0,9	0,97
05/11/14	09:30	15	48	60	50	6,9	5,5	4,8	136,9	150	181,6	217	12	9	20,5	1	1,1
05/11/14	11:30	15	48	60	50	6,9	5,5	4,7	136,9	150	183	217	12	11	20,5	0,85	0,85
05/11/14	03:30	15	48	60	50	6,9	5,5	4,7	136,9	150	185	217	12	10	20,5	1	1

Continuación **Tabla 5.**

RESULTADOS DE LA EVALUACION A ESCALA REAL CUANDO SE ADICIONANDO SULFATO DE ALUMINIO												Volumen tanque sulfato (L)			Sulfato preparado (kg)		
												920			12.5		
												920			11		
Fecha	Hora	Caudal (m ³ /h)	Dosis de sulfato según jarras ppm o (mg/L)	Flujo de la bomba (L/h)	Dial de la bomba (%)	pH (unidades)			Conductividad (µs/cm)			Color (UPC)			Turbiedad (NTU)		
						Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador
07/11/14	11:00	15	55	68	60	6,8	5,3	4,7	137,6	148,6	169,1	117	11	12	8,87	0,8	0,8
07/11/14	01:00	15	55	68	60	6,8	5,3	4,8	137,6	148,6	157,4	117	11	9	8,87	0,8	1,1
10/11/14	07:10	15	40	50	45	6,8	5,2	4,7	130,8	142	167,6	289	10	7	30,3	1	0,65
10/11/14	09:10	15	40	50	45	6,8	5,2	4,8	130,8	142	169,4	289	10	8	30,3	1	1,2
10/11/14	10:10	15	40	50	45	6,8	5,2	4,7	130,8	142	164,7	289	10	9	30,3	1	0,77
10/11/14	01:10	15	40	50	45	6,8	5,2	4,7	130,8	142	165	289	10	12	30,3	1	0,83
11/11/14	07:30	15	37	41	35	6,8	5,7	5	127,1	138,8	152,7	271	12	9	33,1	0,63	1
11/11/14	09:30	15	37	41	35	6,8	5,7	4,9	127,1	138,8	155,7	271	12	8	33,1	0,63	0,71
11/11/14	01:30	15	37	41	35	6,8	5,7	4,7	127,1	138,8	168	271	12	10	33,1	0,63	1
12/11/14	07:30	15	41	45	40	6,7	5,3	4,7	135	149	163,4	244	10	12	27	0,8	1
12/11/14	09:00	15	41	45	40	6,7	5,3	4,7	135	149	162	244	10	9	27	0,8	0,81
12/11/14	03:00	15	41	45	40	6,7	5,3	4,7	135	149	160	244	10	10	27	0,8	0,8
13/11/14	07:45	15	46	51	45	6,9	5,5	4,6	133	146	176,4	227	12	12	23	0,67	0,83
13/11/14	09:00	15	46	51	45	6,9	5,5	4,6	133	146	179	227	12	9	23	0,67	1
13/11/14	11:00	15	46	51	45	6,9	5,5	4,6	133	146	174,6	227	12	9	23	0,67	0,7
13/11/14	01:00	15	46	51	45	6,9	5,5	4,7	133	146	168,4	227	12	11	23	0,67	0,78

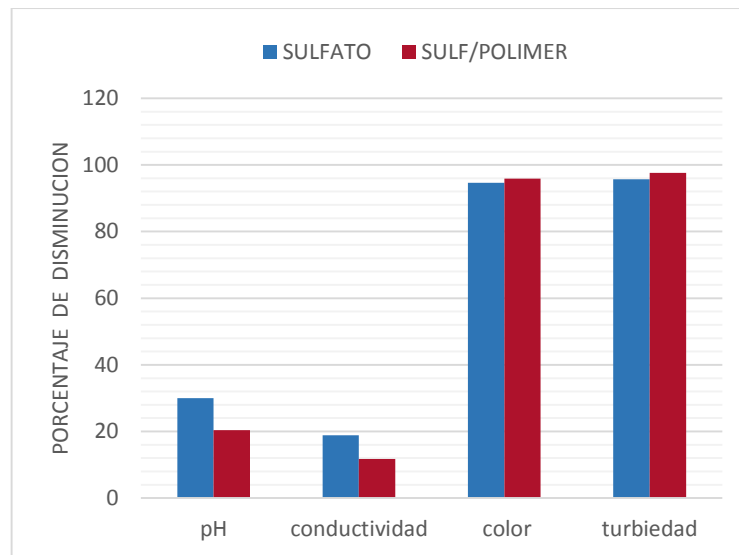
Tabla 6. Resultados de la evaluación en la planta cuando se adicionó sulfato de aluminio en compañía del ayudante de floculación SUPERFLOC A -110.Fuente: Autor

PRUEBA EN PLANTA CON SULFATO DE ALUMINIO Y AYUDANTE DE FLOCULACIÓN SUPERFLOC A-110																Volumen tanque polímero (L)			Polímero preparado (g)					
Fecha	Hora	Caudal del coagulador (m ³ /h)	Dosis de químicos (ppm o mg/L)			Flujo bomba de sulfato (l/h)	Dial de la bomba sulfato %	Flujo de la bomba de polímero (l/h)	Dial de la bomba polímero (%)	pH (unidades)			Conductividad (µs/cm)			Color (UPC)			Turbiedad (NTU)					
			Sulfato	Sulfato (reemplazo)	Polímero					Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador	Cruda	Jarras	Clarificador
26/12/14	09:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,8	5,1	118,5	127	137	238	8	15	20,3	0,45	1			
26/12/14	11:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,8	5,1	118,5	127	138	238	8	10	20,3	0,45	0,6			
26/12/14	01:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,8	5	118,5	127	137,3	238	8	8	20,3	0,45	0,54			
26/12/14	03:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,8	5,1	118,5	127	138	238	8	8	20,3	0,45	0,5			
27/12/14	08:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	6	5,1	119,5	129,3	136,2	266	8	15	22,7	0,38	1,2			
27/12/14	10:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	6	5,4	119,5	129,3	134,4	266	8	11	22,7	0,38	0,45			
27/12/14	12:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	6	5,6	119,5	129,3	131,2	266	8	10	22,7	0,38	0,4			
27/12/14	02:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	6	5,8	119,5	129,3	135	266	8	10	22,7	0,38	0,37			
27/12/14	04:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	6	5,9	119,5	129,3	134,5	266	8	8	22,7	0,38	0,38			
28/12/14	08:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,9	5,7	120,6	135,2	133,4	235	10	12	23,3	0,41	0,8			
28/12/14	10:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,9	5,9	120,6	135,2	134	235	10	10	23,3	0,41	0,38			
28/12/14	12:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,9	5,9	120,6	135,2	135	235	10	9	23,3	0,41	0,4			
28/12/14	02:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,9	6	120,6	135,2	134,2	235	10	9	23,3	0,41	0,33			
28/12/14	04:00	15	45	35	0,6	38,6	35	20,7	15	7	5,9	6	120,6	135,2	137,6	235	10	10	23,3	0,41	0,35			
29/12/14	08:00	15	50	40	0,7	44,2	40	24,2	15	7,1	6	5,7	120	133	136	260	10	15	25,3	0,44	1,1			
29/12/14	10:00	15	50	40	0,7	44,2	40	24,2	15	7,1	6	5,6	120	133	137	260	10	8	25,3	0,44	0,4			
29/12/14	12:00	15	50	40	0,7	44,2	40	24,2	15	7,1	6	5,9	120	133	136,4	260	10	9	25,3	0,44	0,4			
29/12/14	02:00	15	50	40	0,7	44,2	40	24,2	15	7,1	6	5,8	120	133	137	260	10	10	25,3	0,44	0,42			
29/12/14	04:00	15	50	40	0,7	44,2	40	24,2	15	7,1	6	5,7	120	133	137	260	10	10	25,3	0,44	0,38			

- La 1° muestra analizada del día solo contenía Sulfato de Aluminio ya las siguientes contenían polímero

En la figura 4 se muestra la comparación de las dos pruebas donde se aprecia una mejor calidad del agua cuando se hizo la prueba con ayudante de floculación que cuando se hizo empleando solo Sulfato de Aluminio.

Figura 4. Comparación de los parámetros de calidad de agua entre las dos pruebas llevadas a planta.



Fuente: Autor.

7.3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO LINEAL

Una de las razones para obtener un modelo es la adecuación del cálculo del supuesto comportamiento de un proceso para determinadas condiciones. Se estableció un modelo polinómico lineal de acuerdo a los datos experimentales de dosis de sulfato y la determinación de las condiciones iniciales del agua (pH, conductividad, color y turbiedad).

El modelo matemático se expresa de la forma:

$$Y = A * \text{pH} + B * \text{Conduct} + C * \text{Color} + D * \text{Turb}$$

El modelo que se obtuvo fue el siguiente:

$$\text{Dosis de sulfato} = 8,163392 * \text{pH} + 0,048611 * \text{Conduct} - 0,013961 * \text{Color} - 0,654338 * \text{Turb}$$

El desarrollo de este modelo se observa en (Ver Anexo I), donde se comparan las dosis obtenidas en jarras con las que arrojó el modelo teniendo en cuenta las variaciones del agua cruda. También se calculó el porcentaje de error.

8. CONCLUSIONES

- Cuando se evaluó el Sulfato de Aluminio se observó que este disminuye el pH, aumenta la conductividad y forma un floculo mediano y esponjoso en el agua clarificada.
- Cuando se ensayó el Hidroxicloruro de Aluminio se comprobó que no afecta el pH, ni la conductividad y se requería una menor dosis con respecto al sulfato. Pero por otro lado este formó flóculos pequeños por lo cual la sedimentación no fue tan buena.
- Empleando el sulfato de aluminio combinado con el polímero como ayudante de floculación se mostraron mejores resultados en comparación que cuando se probó solo coagulante, puesto que hubo una mayor remoción de color y turbiedad. Se comprobó que el uso de este polímero anionico minimizó la dosis de coagulante en este caso Sulfato de Aluminio en 10 ppm proporcionando un agua clarificada de mejor calidad.
- Se verificó que los resultados obtenidos en la prueba de jarras fueron similares a los obtenidos en el coagulador, lo que demuestra que las condiciones evaluadas en las jarras simulan las condiciones en la planta.
- Se pudo observar que en las muestras recolectadas de agua cruda provenientes del lago de enfriamiento que cuando el clima estaba soleado se presentaron pH, conductividades altos y turbiedades bajas en comparación con los datos obtenidos en clima lluvioso.
- Se determinó que el modelo implementado es una herramienta útil para los operadores de la planta, ahorrándoles tiempo en la realización constante de pruebas de jarras.

9. RECOMENDACIONES

- Hacer el debido mantenimiento al tanque clarificador de la planta, debido a que en la turbina central cerca a las palas verticales el flujo de agua que cae no es uniforme.
- Adquirir equipos más confiables como medidores de flujo (caudalímetros), para garantizar las dosificaciones exactas.
- Se recomienda tomar las condiciones iniciales del agua cruda todos los días a primera hora e implementarlas en el modelo matemático propuesto para saber la dosis óptima de coagulante a emplear y ajustar las bombas dosificadoras. Se presenta una ayuda en el Anexo J.
- Probar polímeros catiónicos y compararlos con los polímeros aniónicos para saber cuál de estos proveen mejores resultados.
- Se recomienda el almacenamiento y aprovechamiento de lodos puesto que estos tienen un gran aporte en la coagulación. Además cuando se lava el coagulador se desocupa totalmente la cámara de lodos y tarda en estabilizarse una buena coagulación. Una recirculación de lodos ayudaría a una más rápida coagulación.
- Tratar de que las concentraciones preparadas en el tanque no permanezcan mucho tiempo puesto que las concentraciones frescas proporcionan una mejor eficacia. Especialmente en la preparación del polímero.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRENECHE MARTINEZ, John Jairo . Optimización de los procesos de clarificación del agua mediante el uso de polielectrolitos sintéticos en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Bucaramanga, 2003, 224p. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga. Facultad de ciencias.

CENTRAL TERMOELECTRICA DE PAIPA, Técnicas para ensayo de jarras, PHABER, EQUIPOS Y REACTIVOS. Paipa, 2010.

[1] GENSA S.A.E.S.P, Documentación de la empresa, 2012.

GOMEZ NUÑEZ, Rony Alexander. Determinación de alteraciones fisicoquímicas del agua superficial en la cuenca alta del rio Chicamocha inferentes en la producción de agua desmineralizada en la compañía eléctrica del SOCHAGOTA. Bucaramanga, 2014, 55p. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga. Facultad de Ingernierias Fisicoquimicas.

[2] KAWAMURA, Susumu. Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities.2ed.Canada: John Wiley & Sons, 2000. 636p.

PEREZ MANCIPE, Daisy Johana. Evaluacion tecnica, economica y ambiental de coagulantes liquidos para la implementacion de una nueva dosificacion en la Planta FIORIDABLANCA del A.M.B.S.A.E.S.P. Bucaramanga, 2012, 77p. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga. Facultad de Ingernierias Fisicoquimicas.

[3],[4] RIPLEY GRAY, M. Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. 3ed. United States of America: American Water work Association, 2011. 243p.

[5] SHARMA, D.K.Environmental Chemistry. Meerut: Goel publishing House, 2006.168p.

[6] SINCERO, Arcadio., & SINCERO,Gregoria.Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater.United States of America:CRC PRESS, 2003. 160p.

SPELLMAN, Frank. Mathematics Manual for WATER AND WASTEWATER TREATMENT PLANT OPERATORS. New York: CRC PRESS, 2004. 684p.

[7] WALTER, J., & WEBER, J.R. Control de la calidad del agua. Barcelona: REVERTE S.A., 1979. 325p.

ANEXOS

ANEXO A

PROCEDIMIENTO PARA PRUEBAS DE JARRAS

PREPARACION DE SOLUCIONES

Preparación de la solución de Sulfato de Aluminio al 1%: Se pesó 1 gr de Sulfato de Aluminio granulado en una balanza *mettler toledo*, de la serie SNR1229020594. Se introdujo en un vaso de precipitado de 500 mL, que contenía 50 mL de agua desmineralizada, y luego se agitó constantemente hasta obtener una disolución completa. La solución fue llevada a un balón aforado de 100 mL y el volumen fue completado hasta la línea de aforo.

Preparación de Hidroxicloruro de Aluminio Líquido al 1%: Se tomó 1 mL de la muestra suministrada por QUIMINSA de este producto con ayuda de una pipeta graduada y se introdujo en un balón aforado de 100 mL. Luego se completó el volumen del balón con agua desmineralizada, para obtener la disolución.

Preparación del polímero aniónico (SUPERFLOC A-110) al 0,1%: Se pesó 0,05 gr de polímero extraídos de la muestra suministrada por QUIMINSA, con ayuda de la balanza *mettler toledo*, de la serie SNR1229020594. Se disolvió en 25 mL de agua destilada que contenía un vaso de precipitado de 500 mL y posterior a esto se agitó constante con un agitador magnético en una plancha hasta obtener una disolución completa por 15 minutos. La solución fue llevada a un balón aforado de 50 mL y el volumen fue completado hasta la línea de aforo.

Tabla 1. Preparación de soluciones empleadas en la prueba de jarras

Reactivo químico	Concentración de la solución madre	1 ml/L de agua equivalente a
Sulfato de Aluminio tipo A	1 %	10 mg/L
Hidroxiclорuro de Aluminio	1%	10 mg/L
Polímero (SUPERFLOC A - 110)	0.1%	1 mg/L

Fuente: Documentos LABORATORIO DE AGUAS- Planta TERMOPAIPA.

Tabla 2. Dosificaciones de Sulfato de Aluminio.

N° Jarra	Volumen agregado con la jeringa de la solución de trabajo	Cantidad agregada a la jarra	Concentración de la jarra de 1 litro 1 mg/L = 1ppm
1	1 ml	10 mg	10 ppm
2	2 mL	20 mg	20 ppm
3	3 mL	30 mg	30 ppm
4	4 mL	40 mg	40 ppm
5	5 mL	50 mg	50 ppm
6	6 mL	60 mg	60 ppm

Fuente: Documentos Laboratorio de Aguas- Planta TERMOPAIPA

DETERMINACION DE LA DOSIS OPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO TIPO A

El objetivo de este ensayo fue determinar la dosis óptima de este coagulante, ya que este es el usado actualmente en la planta; evaluando la velocidad de coagulación, tamaño del flóculo, velocidad de sedimentación, entre otros aspectos.

El procedimiento fue el siguiente:

- ❖ Se tomaron datos de pH, conductividad, color y turbiedad del agua cruda.

- ❖ Se depositaron las muestras de agua cruda en jarras de litro y se introdujeron los respectivos agitadores.
- ❖ Por medio de jeringas de 10 mL se colocaron diferentes cantidades de la solución de coagulante al 1% para obtener concentraciones de coagulante entre 20 ppm y 100 ppm. Las soluciones en la jarra fueron agitadas a 100 rpm durante un minuto.
- ❖ Transcurrido el tiempo de mezcla rápida se disminuyó la velocidad del agitador del equipo a 40 rpm y se dejó flocular el agua durante 15 minutos.
- ❖ Luego de terminado este tiempo de mezcla lenta, se detuvo la agitación, se retiraron las paletas y se dejó sedimentar la muestra por 10 minutos, tiempo determinado durante la observación de varios ensayos.
- ❖ Después de esto se tomó una muestra de 200 ml de cada jarra con ayuda de una manguera purgando cierto volumen antes de adquirir dicha muestra.
- ❖ Finalmente se realizó el respectivo análisis a cada muestra, determinando pH, conductividad, turbiedad y color residual. La jarra con menor turbiedad y color fue seleccionada como la mejor jarra.

DETERMINACION DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL POLIMERO COMO AYUDANTE DE FLOCULACION EN COMBINACION CON EL SULFATO DE ALUMINIO TIPO A

Los ayudantes de floculación son usados para mejorar el proceso de coagulación, cuando son combinados con las sales de aluminio y hierro.

Procedimiento para hallar la dosis óptima de polímero:

- ✓ Se realizaron pruebas de jarras, para establecer la dosis optima de sulfato de aluminio como coagulante como se indicó en el Anexo A, y se fijó esta dosis en todas las jarras, dando inicio a la coagulación.
- ✓ Después de finalizada la mezcla rápida ya mencionada, se añadieron dosis variables de la solución al 0,1% de polímero. Las concentraciones de polímeros en las jarras estuvieron en el rango entre 0,1 y 1 ppm. La mezcla fue agitada a 40 rpm durante 15 minutos.
- ✓ Luego de la floculación se detuvo la agitación, se retiraron los agitadores y se inició la sedimentación con el tiempo determinado.
- ✓ Finalmente se extrajeron muestras de cada jarra y se tomaron análisis mencionados anteriormente, estableciendo la jarra que tuviera menor turbiedad y color como la mejor jarra.

Procedimiento para hallar dosis óptima de coagulante cuando se usa polímero como ayudante de floculación (capacidad de reemplazo).

Ya teniendo la dosis optima de polímero, y de sulfato ya establecidas anteriormente, se hizo lo siguiente:

- Se llenaron las jarras de litro con agua cruda y a estas se les añadió diferentes volúmenes de sulfato de aluminio. La concentración de sulfato de aluminio en las jarras correspondía a dosificaciones por debajo de la óptima.
- Después de finalizada la mezcla rápida ya mencionada, se añadió la misma dosis de polímero solución 0,1% en cada una de las jarras excepto

la primera al iniciar la mezcla lenta mencionada, empleando jeringas de 1 ml y se inició la floculación.

- Luego de la floculación se detuvo la agitación y se retiraron los agitadores y se inició la sedimentación con el tiempo determinado.
- Finalmente se extrajeron muestras de cada jarra y se tomaron análisis mencionados anteriormente, estableciendo la jarra que tuviera menor turbiedad y color como la mejor jarra. Durante la prueba se observó cual jarra presentaba el mejor flóculo es decir el más consistente y el que mejor sedimentara.

Ya teniendo establecida la nueva dosis de sulfato de aluminio al ser combinado con el polímero se halló la nueva dosis de polímero correspondiente a esta nueva dosis de coagulante.

- ✓ Se fijó la misma dosis de sulfato de aluminio en todas las jarras excepto la primera y se inició la mezcla rápida.
- ✓ Después de finalizada la mezcla rápida ya mencionada, se añadieron dosis variables de polímero solución 0,1% entre 0,1 y 1 ppm respectivamente en cada una de las jarras.
- ✓ Luego de la floculación se detuvo la agitación, se retiraron los agitadores y se inició la sedimentación con el tiempo determinado.
- ✓ Finalmente se extrajeron muestras de cada jarra y se tomaron análisis mencionados anteriormente, estableciendo la jarra que tuviera menor turbiedad y color como la mejor jarra. Durante la prueba se observó cual jarra

presentaba el mejor flóculo es decir el más consistente y el que mejor sedimentara.

DETERMINACION DE DOSIS ÓPTIMA DE HIDROXICLORURO DE ALUMINIO LÍQUIDO COMO COAGULANTE

Se empezó mirando el funcionamiento del Hidroxicloruro solo como un coagulante inorgánico polimerizado, obteniendo su dosis óptima y comparando este coagulante con el sulfato de aluminio, lo mismo se hizo combinando Hidroxicloruro/polímero.

El procedimiento fue el siguiente:

- ❖ Se tomaron datos de pH, conductividad, color y turbiedad del agua cruda.
- ❖ Se depositaron las muestras de agua cruda en jarras de litro y se introdujeron los respectivos agitadores.
- ❖ Por medio de jeringas de 10 mL se colocaron diferentes cantidades de la solución de coagulante al 1% para obtener concentraciones de coagulante entre 20 ppm y 100 ppm. Las soluciones en la jarra fueron agitadas a 100 rpm durante un minuto.
- ❖ Transcurrido el tiempo de mezcla rápida se disminuyó la velocidad del agitador del equipo a 40 rpm y se dejó flocular el agua durante 15 minutos.
- ❖ Luego de terminado este tiempo de mezcla lenta, se detuvo la agitación, se retiraron las paletas y se dejó sedimentar la muestra por 10 minutos.

- ❖ Después de esto se tomó una muestra de 200 ml de cada jarra con ayuda de una manguera purgando cierto volumen antes de adquirir dicha muestra.
- ❖ Finalmente se realizó el respectivo análisis a cada muestra, determinando pH, conductividad, turbiedad y color residual. La jarra con menor turbiedad y color fue seleccionada como la mejor jarra.

SEGÚN LAS PRUEBAS DE JARRAS SE LLEGO A LO SIGUIENTE:

Tabla 3. Dosis de polímero a emplear según la dosis de coagulante

Dosis de Sulfato de Aluminio (ppm)	Dosis de polímero (ppm)
55	1
50	0,9
45	0,8
40	0,7
35	0,6

Fuente: Autor

Tabla 4. Pruebas de jarras para verificar la capacidad de reemplazo del polímero.

PARAMETRO	1	2	3	4	5	6
JARRAS						
Coagulante (ppm)	45	45	40	35	30	25
Floculante (ppm)		0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
Turbiedad residual (NTU)	1,1	0,89	0,70	0,40	0,50	0,56
Color aparente (UPC)	13	10	10	9	8	10
Mejor jarra				X		

Fuente: Autor.

Tabla 5. Comparación de los experimentos realizados en las jarras.

PARÁMETRO	SULFATO DE ALUMINIO	HIDROXICLORURO DE ALUMINIO	SULFATO + POLIMERO	HIDROXICLORURO + POLIMERO
Coagulante (ppm)	55	50	55	50
Floculante (ppm)	-----	-----	1	0,8
Tamaño del flóculo [1-4]	2	4	1	3
Velocidad de sedimentación [1-4]	2	4	1	3
pH (unidades)	6	6,7	6	6,8
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	198	191,8	198	192
Turbiedad (NTU)	0,6	0,65	0,34	0,5
color aparente(UPC)	9	8	7	9
mejor jarra			X	

Fuente: Autor.

ANEXO B

DESARROLLO DE LA PRUEBA EN LA PLANTA

Después de haber trabajado en el laboratorio de aguas de TERMOPAIPA durante agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre haciendo pruebas de jarras para establecer la dosis óptimas y para verificar cuál de los coagulantes tenían mayor eficiencia, se estableció que el que mejor funcionó fue el sulfato de aluminio en comparación con el Hidroxicloruro de Aluminio. Debido a eso se llevó a escala real las dosis de sulfato y las dosis de sulfato/polímero obtenidas.

Para empezar estas dos pruebas previamente se determinó experimentalmente el flujo de la bomba dosificadora de sulfato y de polímero a diferentes diales como se muestra en Ver Anexo C, esto para determinar la capacidad verdadera de los tanques de almacenamiento, cronometrando el tiempo de vaciado con cierto flujo, y luego así ajustar la bomba según la dosis a emplear.

Tabla. Volúmenes de tanques de almacenamiento de químicos y cantidad preparada.

Tanque de almacenamiento	Volumen del tanque (L)	Volumen verdadero del tanque (L)	Cantidad preparada (kg, gr)
Sulfato de Aluminio	1000	920	12,5
Polímero	250	230	100

Fuente: Autor

Por otro lado se mantuvo fija la misma preparación en el tanque que ya venían preparando de 12,5 kg de Sulfato de Aluminio para un volumen de 920 L.

PROCEDIMIENTO EN LA PRUEBA DEL SULFATO DE ALUMINIO

1. A primera hora de la mañana se captó una muestra de agua cruda proveniente del lago de enfriamiento y a esta se le tomaron las condiciones iniciales (pH, conductividad, color y turbiedad). Se hizo prueba de jarras para saber la dosis óptima de coagulante.
2. Ya sabiendo esta dosis se llevó a escala real, teniendo en cuenta el caudal en el coagulador de agua cruda y la preparación fija en el tanque de sulfato, se calculó el flujo de la bomba empleando la ecuación (Ver Anexo D) y se ajustó el dial de la bomba tal que esta dosificara lo obtenido en las jarras.
3. Se monitoreo cada dos horas el agua clarificada y se determinó el pH, conductividad, color y turbiedad residual.
4. Se comparó el agua clarificada del coagulador con el de las jarras. También se comparó la dosis obtenida en jarras con la que arrojaba el modelo.

PROCEDIMIENTO EN LA PRUEBA DEL SULFATO DE ALUMINIO EN COMBINACION CON EL POLIMERO.

- ❖ A primera hora de la mañana se captó una muestra de agua cruda proveniente del lago de enfriamiento, a esta se le tomaron las condiciones iniciales (pH, conductividad, color y turbiedad) y se hizo prueba de jarras para saber la dosis optima de coagulante.

- ❖ Ya sabiendo esta dosis optima y sabiendo la capacidad de reemplazo se minimizo esta dosis de sulfato y se combinó con la respectiva dosis de polímero.
- ❖ Teniendo en cuenta lo anterior se procedió a llevar estas dosis a la planta, calculando el flujo de la bomba de sulfato y de polímero para así ajustar el dial de la bomba tal que dosificara lo obtenido en las jarras.
- ❖ Se monitoreo cada dos horas el agua clarificada y se determinó el pH, conductividad, color y turbiedad residual
- ❖ Se comparó el agua clarificada del coagulador con el de las jarras. También se comparó la dosis obtenida de coagulante en jarras con la que arrojaba el modelo.

ANEXO C

FLUJOS DE LAS BOMBAS DOSIFICADORAS DE QUÍMICOS MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE

Tabla 1. Volúmenes de tanques de almacenamiento de químicos.

Insumos Químicos	Volumen del tanque (L)	Volumen verdadero (L)
Sulfato de Aluminio solido tipo A	1000	920
Polímero (SUPERFLOC A - 110)	250	230

Fuente: Autor

Tabla 2. Flujos de las bombas dosificadoras de químicos medidos experimentalmente.

Dial (%)	Flujo de la bomba (L/h)	
	Sulfato	Polímero
10	11,5	15
15	17	20
20	23	25
25	29	32
30	34	38
35	40	44
40	46	51
45	51	57
50	57	63
55	63	70
60	68,4	76
65	74	82
70	80	89
75	86	95
80	91	101
85	97	107
90	102	114
95	107	120
100	113	126

Fuente: Autor

ANEXO D

Tabla. Muestras de agua cruda tomadas y la determinación de dosis optima mediante pruebas de jarras.

Tiempo	N° de ensayos	Dosis Sulfato de Aluminio (ppm)	pH (unidades)	Conductividad (μs/cm)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
CLIMA SECO O SOLEADO	1	60	7,4	364	175	15,5
	2	65	7,3	360	141	9,26
	3	70	7,3	362	168	12,2
	4	70	7,5	343	138	7,89
	5	80	7,5	353	139	7,73
	6	65	7,5	329	152	9,18
	7	65	7,6	313	123	9,45
	8	65	7,2	271	147	10,9
	9	65	7,1	241	164	12,6
	10	65	7,1	216	116	9,25
	11	65	7,1	200	148	10,7
	12	70	7,1	187,2	117	8,81
	13	55	7,1	188,4	128	11,6
	14	55	7,1	184	133	9,73
	15	55	7,1	184,5	115	10,3
	16	55	7,1	175,8	148	10
	17	55	7,1	202	204	15
	18	55	7,1	194	157	11,8
CLIMA LLUVIOSO	19	55	7,2	182,1	168	12,8
	20	55	7	209	205	16,6
	21	55	7,2	170,5	163	12,8
	22	55	7	185,4	108	7,12
	23	55	7	174,5	156	18,6
	24	55	6,9	187	156	12,2
	25	50	6,7	136,3	117	9,67
	26	35	6,8	130,8	289	30,3
	27	45	6,9	133	227	23
	28	55	7,3	139,3	202	20,3
	29	50	7,3	137,5	216	18,6
	30	50	7,3	134,3	207	17,3
	31	45	7,2	134,7	246	21,7
	32	50	7,1	134,7	256	22,7

Fuente: Autor.

ANEXO E

ECUACIÓN EMPLEADA

- ❖ Ecuación para calcular el flujo de la bomba teniendo en cuenta la dosis de coagulante obtenida en las jarras.

$$Q_1 * C_1 = Q_2 * C_2$$

Q₁: Caudal de agua cruda en el coagulador L/h

C₁: Dosis de coagulante obtenida en prueba de jarras kg/L

Q₂: Flujo de la bomba dosificadora L/h

C₂: Solución preparada en el tanque kg/L

ANEXO F

CÁLCULO DE GRADIENTES DE VELOCIDAD

Tabla. Datos empleados para cálculos de gradientes de velocidad.

Símbolo	Parámetro	Unidades	Valor
ρ	Densidad del agua a 20 °C	kg/m ³	998,29
G	Aceleración de la gravedad	m/s ²	9,8
h	Altura de caída	M	0,20
T	Tiempo de retención	s	66
μ	Viscosidad dinámica del agua a 20°C	kg. $\frac{m}{s}$	0,001003
P	Potencia del agitador	kg. $\frac{m^2}{s^3}$	3,067
K _T :	Constante de agitación	unidades	5,75
V	Volumen de la mezcla lenta	m ³	3,32
n	Velocidad de rotación en revoluciones por segundo	rps o (s ⁻¹)	0,38
D	Diámetro del rodete ~ 3/8 del diámetro de la sección de donde se realiza la floculación	m	0,431

Fuente: Autor

Cálculos de gradientes teniendo en cuenta las ecuaciones (1), (2), (3) expuestas en el marco teórico.

✓ Mezcla rápida

$$G = \sqrt{\frac{\rho gh}{T \cdot \mu}}$$

$$G = \sqrt{\frac{\left(\frac{998,29\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (9,8 \text{ m/s}^2) * (0,20\text{m})}{(66 \text{ s}) * (0,001003\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}})}} = 171,92 \text{ s}^{-1}$$

✓ Mezcla lenta

$$G = \sqrt{\frac{P}{V \cdot \mu}}$$

Cálculo de la potencia del agitador:

$$P = K_T * n^3 * D^5 * \rho$$

$$P = (5,75) * (0,38 \text{ s}^{-1})^3 * (0,431 \text{ m})^5 * (998,29 \text{ kg/m}^3)$$

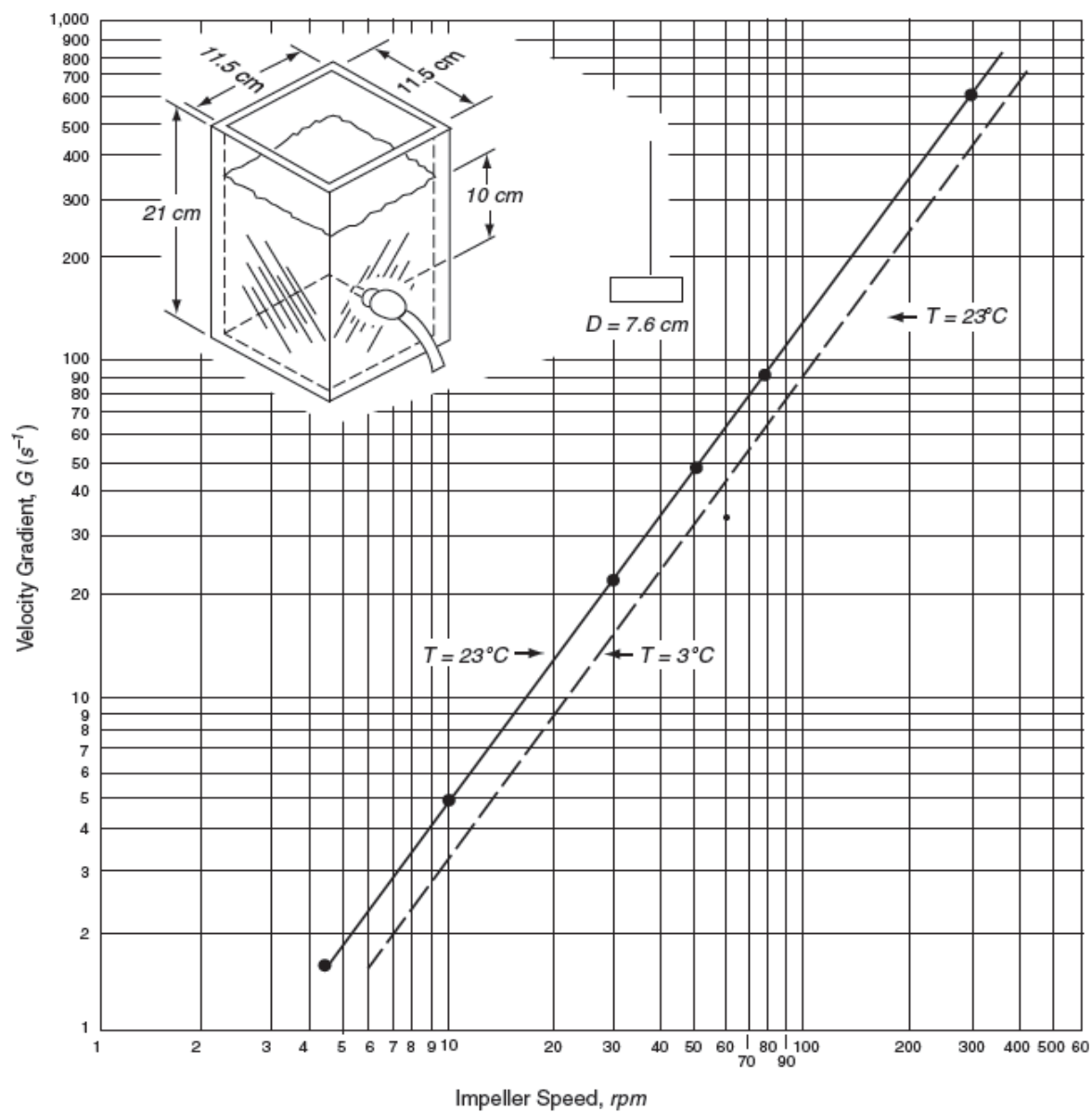
$$P = 4,684 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$$

Gradiente de la mezcla lenta

$$G = \sqrt{\frac{4,684 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}}{(3,32 \text{ m}^3) * (0,001003\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}})}} = 37,51 \text{ s}^{-1}$$

ANEXO G

GRÁFICA PARA LA DETERMINACIÓN DE GRADIENTES DE VELOCIDAD



Fuente: Operational Control of Coagulation and Filtration Processes.

ANEXO H

RANGOS DE PARÁMETROS TENIDOS EN CUENTA POR LA EMPRESA PARA AGUA INDUSTRIAL Y RESIDUAL DE SULFATO OBTENIDO EN LA PRUEBA

Tabla 1. Rangos de parámetros tenidos en cuenta por la empresa para agua industrial.

PARAMETRO	UNIDADES	AGUA COAGULADA (rango de control)
pH	Unidades	> 5
Color aparente	UPC	< 15
Turbiedad	NTU	< 2,0
Cloro libre	mg/L Cl ₂	< 0,2
Sulfatos	mg/L SO ₄	< 50

Fuente: Laboratorio de aguas- planta TERMOPAIPA

Tabla 2. Análisis de residual de sulfato cuando se desarrolló la prueba en planta.

FECHA	DOSIS DE SULFATO (ppm)	RESIDUAL DE SULFATO (mg/L SO ₄)
27/10/14	54	44
28/10/14	52	38
30/10/14	59	40
31/10/14	45	44
04/11/14	44	45
05/11/14	48	45
07/11/14	55	39
10/11/14	40	40
11/11/14	37	44
12/11/14	41	46
13/11/14	46	45

Fuente: Autor

Matriz transpuesta X^t

7,4	7,3	7,3	7,5	7,5	7,5	7,6	7,2	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7	7,2	7	7	6,9	6,7	6,8	6,9	7,3	7,3	7,3	7,2	7,1
364	360	362	343	353	329	313	271	241	216	200	187	188	184	185	176	202	194	182	209	171	185	175	187	136	131	133	139	138	134	135	135
175	141	168	138	139	152	123	147	164	116	148	117	128	133	115	148	204	157	168	205	163	108	156	156	117	289	227	202	216	207	246	256
16	9,3	12	7,9	7,7	9,2	9,5	11	13	9,3	11	8,8	12	9,7	10	10	15	12	13	17	13	7,1	19	12	9,7	30	23	20	19	17	22	23

1. Matriz $X^t * X$

1642,94	49448,2	38123,7	3109,106
49448,2	1659281	1098436	86395,52
38123,7	1098436	950603	79672,17
3109,106	86395,5	79672,17	6858,072

2. Inversa de la matriz $(X^t * X)^{-1}$

0,02581	-0,0003	-0,000827	0,002031
-0,000328	8,9E-06	-7,35E-06	0,000122
-0,000827	-7E-06	0,000134	-0,00109
0,002031	0,00012	-0,001089	0,01034

3. Inversa de la matriz $(X^t * X)^{-1}$ multiplicada por el vector Y

8,163392	A = 8,163392
0,048611	B= 0,048611
-0,013961	C= -0,013961
-0,654338	D= -0,654338

Dosis de sulfato = 8,163392*pH + 0,048611*Conductividad – 0,013961*Color – 0,654338* Turbiedad

Tabla. Comparación entre los valores experimentales y los valores estimados sobre la dosis de Sulfato de Aluminio y cálculo del porcentaje de error

N° de ensayos	Valor experimental (jarras)	Valor estimado (modelo)	% de error
1	60	65,5	8,39694656
2	65	69,1	5,93342981
3	70	67	-4,47761194
4	70	70,8	1,1299435
5	80	71,4	-12,0448179
6	65	69,1	5,93342981
7	65	69,4	6,34005764
8	65	62,8	-3,50318471
9	65	59,1	-9,98307953
10	65	60,8	-6,90789474
11	65	58,6	-10,9215017
12	70	59,7	-17,2529313
13	55	57,7	4,67937608
14	55	58,7	6,3032368
15	55	58,6	6,14334471
16	55	57,9	5,00863558
17	55	55,1	0,1814882
18	55	57,5	4,34782609
19	55	56,9	3,33919156
20	55	53,6	-2,6119403
21	55	56,4	2,4822695
22	55	60	8,33333333
23	55	51,3	-7,21247563
24	55	55,3	0,54249548
25	50	53,4	6,3670412
26	35	38	7,89473684
27	45	44,6	-0,89686099
28	55	50,3	-9,34393638
29	50	51,1	2,15264188
30	50	51,9	3,66088632
31	45	47,7	5,66037736
32	50	46,1	-8,45986985
		Promedio	0,03795573

Fuente: Autor

ANEXO J

GUÍA PARA LOS ANALISTAS EN EL MOMENTO DE AJUSTAR LA BOMBA DOSIFICADORA DE SULFATO DE ALUMINIO Y POLÍMERO TENIENDO EN CUENTA LAS CONDICIONES INICIALES DEL AGUA CRUDA

Tabla 1. Guía para los analistas en el momento de ajustar la bomba dosificadora de sulfato de aluminio teniendo en cuenta las condiciones iniciales del agua cruda.

RANGO			Dosis Sulfato de Aluminio aproximada (ppm)	DIAL DE LA BOMBA SULFATO (%)		
pH (unidades)	Conductividad (µs/cm)	Turbiedad (NTU)		Caudal 15 (m³/h)	caudal 17 (m³/h)	caudal 20 (m³/h)
7,1 - 7,6	> 235	7,0 - 13	60 - 65	60	65	75
6,9 - 7,1	160 - 235	10,0 - 18	55	55	60	70
6,7 - 7	130 - 160	11,0 - 18	50	50	55	65
6,9 - 7,1	115 - 135	20 - 25	45	45	50	60
6,7 - 6,9	120 - 135	25- 35	35- 40	40	45	55

Fuente: Autor

SULFATO PREPARADO: 12,5 Kg

- ✓ $DOSIS\ SULFATO = 8,163392 * PH + 0,048611 * COND - 0,01396 * COLOR - 0,65434 * TURB$
- ◆ Teniendo en cuenta que el pH es inversamente proporcional a la turbiedad

Tabla 2. Guía para los analistas en el momento de ajustar la bomba dosificadora de Sulfato de Aluminio y polímero teniendo en cuenta las condiciones iniciales del agua cruda.

RANGO			Dosis Sulfato de Aluminio aproximada (ppm)	Dosis de polímero aproximada (ppm)	Dial de la bomba sulfato (%)			Dial de la bomba polímero (%)		
pH (unidades)	Conductividad (µs/cm)	Turbiedad (NTU)			caudal 15 (m³/h)	caudal 17 (m³/h)	caudal 20 (m³/h)	caudal 15 (m³/h)	caudal 17 (m³/h)	caudal 20 (m³/h)
7,1 - 7,6	> 235	7,0 – 13	50	0,9	50	55	65	15	20	25
6,9 - 7,1	160 - 235	10,0 - 18	45	0,8	45	50	60	15	15	20
6,7 – 7	130 - 160	11,0 – 18	40	0,7	40	45	55	10	15	15
6,9 - 7,1	115 - 135	20 – 25	35	0,6	35	40	50	10	10	15
6,7 - 6,9	120 - 135	25- 35	30	0,5	30	35	45	10	10	10

Fuente: Autor

- Sulfato preparado: 12,5 kg polímero preparado : 150 gr