

ESTUDIO DE APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DEL SULFATO DE  
ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO COMO COAGULANTE EN LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA  
(SANTANDER)

ANA FERNANDA HUERTAS ROJAS  
HENDERSON IVAN QUNTERO PEREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
2007

ESTUDIO APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DEL SULFATO DE  
ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO COMO COAGULANTE EN LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA  
(SANTANDER)

ANA FERNANDA HUERTAS ROJAS  
HENDERSON IVAN QUNTERO PEREZ

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR: EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY

Ph. D Ingeniero Químico

Profesor: Escuela de Ingeniería Química

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

2007

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**LA EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DE LEBRIJA (E.S.P.L).** Por permitirnos usar sus instalaciones para la realización de este estudio.

**LA EMPRESA COLOMBIANA PRODUCTOS QUIMICOS PANAMERICANOS (P.Q.P).** por su apoyo en la realización del proyecto.

**ALEXY GRANADOS GERENTE DE VENTAS REGION ORIENTE (P.Q.P).** Por su valiosa colaboración durante la realización del proyecto.

**JANETH QUINTERO** , directora de el laboratorio CEIAM guatiguara.

**EDGAR CASTILLO Y RAMIRO MARTINEZ.** Por la dirección, revisión y aceptación del trabajo .

A nuestras familias y amigos y a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron para la realización de este proyecto.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO COMO COAGULANTE EN LA PLANTA DE ACUEDUCTO DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA (SANTANDER) \*

**AUTORES:** ANA FERNANDA HUERTAS ROJAS; HENDERSON IVAN QUINTERO PEREZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Sulfato de aluminio Tipo B, coagulante, planta de agua potable de Lebrija, agua cruda, turbiedad, color.

### DESCRIPCIÓN

La viabilidad de la implementación del Sulfato de aluminio tipo B, líquido (STBL), como coagulante primario en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija se analiza en este trabajo desde el punto de vista técnico, económico y ambiental; mediante el desarrollo de prueba de laboratorio que tuvieron en cuenta las variables operacionales de la planta, además, un análisis económico del consumo de coagulante en los últimos años y pruebas físico-químicas del agua cruda y del agua tratada en la prueba de campo ejecutada.

Se utilizó un diseño de experimento general de proceso involucrando cinco factores y dos niveles para conocer las características del afluente, determinar las condiciones reales de operación de la planta y la combinación de factores buscando la más alta remoción de turbiedad y color.

Posteriormente se estudiaron diferentes muestras de agua organizadas en dos escenarios de turbiedad de agua cruda: turbiedad inicial alta y turbiedad inicial baja, para determinar la dosis óptimas de cada coagulante y se procedió a validar los dos sulfatos mediante la determinación de tiempo óptimo de mezcla rápida, gradiente y tiempo de floculación, velocidad de sedimentación, influencia del pH en la coagulación e influencia del coagulante en el pH final. Finalmente, se hizo una prueba de campo de 16 horas con el STBL que permitió un análisis comparativo técnico, económico y ambiental más preciso.

Este estudio demostró que el STBL presenta mejores resultados en remoción de turbiedad y color y mayor calidad de agua tratada en condiciones normales de operación, además, la dosis óptima aplicada reflejó favorabilidad económica en costo de consumo de coagulante.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química  
Director: Edgar Castillo

## SUMMARY

**TITLE:** Applicability And Implementing Study Sulfate Type B Liquid As Coagulant At The Treatment Plant 'Lebrija' (Santander)\*

**AUTHORS:** ANA FERNANDA HUERTAS ROJAS; HENDERSON IVAN QUINTERO PEREZ\*\*

**KEY WORDS:** Aluminum sulfate type B, coagulant, treatment plant of lebrija's drinkable water, hard water, turbid water, color.

### DESCRIPTION

The viability of implementing aluminum liquid sulfate type B as primary coagulant at the 'lebrija' treatment plant, it has been analyzed keeping in mind the technical-economical and environmental aspects. With the development of laboratory proves and also thinking about the operation variables at the drinkable water plant. On top of that an economical analysis of the consume in the last years, and chemical-physical proves of hard water and treated water performed at the field test.

It was used a general experimental design of the process , involving five factors and two levels in order to know the flowing characteristics; determine the plant condition operations and the combination factor that provided the best removal in color and turbid water.

Later it was studied different water samples organized in two stages of hard turbid water: high hard turbid water , low hard turbid water, in order to determine the best dose of each coagulant and it was proceed performed the consolidate of the two sulfates through the determination of the best time of fast mix , gradient and flocculation time, sedimentation speed, the influence of coagulant at the final pH, and influence of pH in coagulation. Finally it was done a field proof of sixteen hours with the STBL that allowed a comparative analysis technical-economical and environmental more précised.

This study grues the knowledge that STBL shows the best results in color and turbid water removal, with a high quality level of treated water in normal operation condition, besides that the best used dose shows suitable economical conditions about the prices on coagulant consume.

---

\*\* Degree Project.

\*\* Physical-chemical Engineerings Faculty, chemical Engineering  
Eng: Edgar Castillo

## TABLA DE CONTENIDO

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| 1. INTRODUCCION   | 1           |
| 2. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL   | 3           |
| 2.1 CLASIFICACION DE LA FUENTE DE<br>ABASTECIMIENTO                                       | 3           |
| 2.2 TRATAMIENTO DE TIPO CONVENCIONAL<br>PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA               | 3           |
| 2.2.1 Componente Físico   | 3           |
| 2.2.2 Componente Químico  | 4           |
| 2.2.3 Componente Microbiológico   | 4           |
| 2.3 PROCESOS UNITARIOS EN EL<br>TRATAMIENTO DE AGUA                                       | 4           |
| 2.3.1 Proceso De Oxidación-Aireación  | 4           |
| 2.3.2 Mezcla Rápida   | 5           |
| 2.3.3 Coagulación   | 5           |
| 2.3.4 Floculación   | 5           |
| 2.3.5 Sedimentación   | 6           |
| 2.3.6 Corrección De pH  | 6           |
| 2.3.7 Filtración  | 6           |
| 2.3.8 Desinfección  | 6           |
| 2.4 DESCRIPCIÓN Y CARACTERISTICAS DE<br>LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA | 7           |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.4.1   | Cámara De Aireación  | 7  |
| 2.4.2   | Edificio De Dosificación   | 8  |
| 2.4.3   | Floculadores   | 8  |
| 2.4.3.1 | Funcionamiento   | 8  |
| 2.4.4   | Sedimentadores   | 9  |
| 2.4.4.1 | Descripción  | 9  |
| 2.4.4.2 | Funcionamiento   | 10 |
| 2.4.5   | Filtros  | 10 |
| 2.4.5.1 | Descripción  | 10 |
| 2.4.6   | Tanques De Almacenamiento  | 10 |
| 3.      | DISEÑO DE EXPERIMENTOS   | 11 |
| 3.1     | SELECCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS                                       | 11 |
| 4.      | DESARROLLO EXPERIMENTAL  | 12 |
| 4.1     | ETAPAS METODOLÓGICAS   | 12 |
| 4.1.1   | Revisión Bibliográfica   | 12 |
| 4.1.2   | Etapa Experimental   | 12 |
| 4.1.3   | Evaluación Técnica Del Sulfato De Aluminio Tipo B, Líquido                 | 13 |
| 4.1.4   | Análisis económico   | 13 |
| 4.2     | PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL   | 13 |
| 4.2.1   | Determinación De La Dosis Óptima De Coagulante                             | 13 |
| 4.2.2   | Determinación De La Influencia De La Dosis<br>De Coagulante En El pH Final | 14 |
| 4.2.3   | Determinación De La Influencia Del pH En La Coagulación                    | 14 |
| 4.2.4   | Velocidad De Sedimentación De Las Partículas                               | 15 |
| 4.2.5   | Determinación De Los Parámetros Óptimos De<br>Coagulación- Floculación.    | 16 |
| 4.2.5.1 | Tiempo Óptimo De Mezcla Rápida.  | 16 |
| 4.2.5.2 | Determinación De Mejor Tiempo Y Gradiente De Floculación<br>STBL.          | 16 |
| 5.      | RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS  | 18 |
| 5.1     | RESULTADOS EXPERIMENTALES  | 18 |

|  |    |
|--|----|
| 5.1.1 Determinación De La Dosis Óptima De Cada Coagulante            | 18 |
| 5.1.1.1 Determinación De La Dosis Óptima De STBS Para Baja Turbiedad | 18 |
| 5.1.1.2 Determinación De La Dosis Óptima De STBS Para Turbiedad Alta | 21 |
| 5.1.1.3 Determinación De La Dosis Óptima De STBL Para Turbiedad Baja | 23 |
| 5.1.1.4 Determinación De La Dosis Óptima De STBL Para Turbiedad Alta | 25 |
| 5.1.2 Influencia De La Dosis De Coagulante En El pH Final            | 27 |
| 5.1.3 Validación De Los Coagulantes                                  | 27 |
| 5.1.4 Determinación De La Influencia Del pH En La Coagulación        | 28 |
| 5.1.5 Velocidad De Sedimentación                                     | 29 |
| 5.1.6 Tiempo Óptimo De Mezcla Rápida                                 | 29 |
| 5.1.7 Tiempo Y Gradiente De Floculación                              | 30 |
| 5.2 EVALUACION TÉCNICA DEL SULFATO DE ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO       | 31 |
| 5.2.1 Almacenamiento   | 31 |
| 5.2.2 Forma De Dosificación  | 32 |
| 5.2.3 Parámetros Operacionales Para Cada Coagulante                  | 32 |
| 5.2.4 Parámetros De Calidad Del Agua Tratada                         | 32 |
| 5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO   | 33 |
| 6. CONCLUSIONES  | 34 |
| 7. RECOMENDACIONES   | 35 |
| 8. BIBLIOGRAFIA  | 36 |

## LISTA DE TABLAS

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Tabla 4.1</b> Variables de operación para las pruebas de jarras.                               | 14   |
| <b>Tabla 4.2</b> Secuencia para los ensayos de tiempo y gradiente de floculación                  | 17   |
| <b>Tabla 5.1</b> Rango de variables a medir para turbiedad baja                                   | 18   |
| <b>Tabla 5.2</b> Rango de variables a medir para turbiedad alta                                   | 18   |
| <b>Tabla 5.3</b> Diseño aleatorizado por bloques completos para el experimento de dosis aplicada  | 19   |
| <b>Tabla 5.4</b> Análisis de Varianza para la dosis de STBS para turbiedad baja                   | 19   |
| <b>Tabla 5.5</b> Diseño aleatorizado por bloques completos para el experimento de dosis aplicada  | 21   |
| <b>Tabla 5.6</b> Análisis de varianza para la dosis de STBS para turbiedad alta                   | 21   |
| <b>Tabla 5.7.</b> Diseño aleatorizado por bloques completos para el experimento de dosis aplicada | 23   |
| <b>Tabla 5.8.</b> Análisis de Varianza para la dosis de STBL para turbiedad baja                  | 23   |
| <b>Tabla 5.9.</b> Diseño aleatorizado por bloques completos para el experimento de dosis aplicada | 25   |
| <b>Tabla 5.10.</b> Análisis de Varianza para la dosis de STBL para turbiedad alta                 | 25   |
| <b>Tabla 5.11</b> Dosis determinadas para cada uno de los coagulantes                             | 27   |
| <b>Tabla 5.12</b> Análisis de Varianza para la determinación de la influencia del pH              | 28   |
| <b>Tabla 5.13</b> Análisis de Varianza para la determinación de la velocidad de sedimentación     | 29   |
| <b>Tabla 5.14</b> Análisis de Varianza para determinación de tiempo de mezcla rápida              | 30   |
| <b>Tabla 5.15</b> Costo de coagulante P.Q.P de 2007   | 33   |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Figura 2.1</b> Cámara de aireación en la planta del municipio de Lebrija                              | 7    |
| <b>Figura 2.2</b> Canaleta Parshall de la planta del municipio de Lebrija                                | 8    |
| <b>Figura 2.3</b> Floculador No.1 planta del municipio de Lebrija  | 9    |
| <b>Figura 2.4</b> Floculador No.2 planta del municipio de Lebrija  | 9    |
| <b>Figura 2.5</b> Sedimentadores de la planta del municipio de Lebrija                                   | 9    |
| <b>Figura 2.6</b> (a) y (b) Galería de filtros en la planta del municipio de Lebrija                     | 10   |
| <b>Figura 5.1</b> Grafico de medias de Turbiedad por el método LSD para determinar dosis de coagulante   | 20   |
| <b>Figura 5.2</b> Grafico de medias de Color por el método LSD para determinar dosis de coagulante       | 20   |
| <b>Figura 5.3</b> Diagrama de cajas para determinación de dosis coagulante                               | 21   |
| <b>Figura 5.4</b> Grafico de medias de Turbiedad por el método LSD para determinar dosis de coagulante   | 22   |
| <b>Figura 5.5</b> Grafico de medias de Color por el método LSD para determinar dosis de coagulante       | 22   |
| <b>Figura 5.6</b> Diagrama de cajas para determinación de dosis coagulante                               | 22   |
| <b>Figura 5.7</b> Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar dosis de coagulante   | 24   |
| <b>Figura 5.8.</b> Grafico de medias de Color con el método LSD para determinar dosis de coagulante      | 24   |
| <b>Figura 5.9</b> Diagrama de cajas para determinación de dosis coagulante                               | 24   |
| <b>Figura 5.10.</b> Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar dosis de coagulante | 26   |
| <b>Figura 5.11.</b> Grafico de medias de Color con el método LSD para determinar dosis de coagulante     | 26   |
| <b>Figura 5.12.</b> Diagrama de cajas para determinación de dosis coagulante                             | 27   |
| <b>Figura 5.13.</b> Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para ajustar el pH                  | 28   |
| <b>Figura 5.14</b> Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para la                              | 29   |

velocidad de sedimentación

**Figura 5.15** Gráfico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar tiempo de mezcla rápida

30

## LISTA DE ANEXOS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Anexo 1</b> Diseño experimental: Diseño factorial 2 <sup>5</sup>  | 37   |
| <b>Anexo 2</b> Criterios organolépticos físicos y químicos de la calidad de agua potable según el decreto 475 de 1998                      | 39   |
| <b>Anexo 3</b> Fichas técnicas del sulfato de aluminio tipo b, sólido y líquido  | 41   |
| <b>Anexo 4</b> Secuencia de pruebas para la determinación de los mejores parámetros operacionales  | 43   |
| <b>Anexo 5</b> Análisis de varianza para el color utilizando STBS para turbiedad baja  | 45   |
| <b>Anexo 6</b> Análisis de varianza para el color utilizando STBS para turbiedad alta  | 46   |
| <b>Anexo 7</b> Análisis de varianza para el color utilizando STBL para turbiedad baja  | 47   |
| <b>Anexo 8</b> Análisis de la varianza para el color utilizando STBL para turbiedad alta   | 48   |
| <b>Anexo 9</b> Influencia de la dosis de coagulante en el pH final   | 49   |
| <b>Anexo 10</b> Intervalo de pH óptimo   | 55   |
| <b>Anexo 11</b> Tiempo óptimo de sedimentación   | 56   |
| <b>Anexo 12</b> Tiempo óptimo de mezcla rápida   | 57   |
| <b>Anexo 13</b> Análisis de la varianza para tiempo y gradiente de floculación con turbiedad baja  | 58   |
| <b>Anexo 14</b> Análisis de la varianza para tiempo y gradiente de floculación con turbiedad alta  | 60   |
| <b>Anexo 15</b> Tiempo óptimo de floculación para STBL   | 62   |
| <b>Anexo 16</b> Reporte de resultados de pruebas físicoquímicas  | 64   |
| <b>Anexo 17</b> Costos de tratamiento debido al consumo de coagulante en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de lebrija | 68   |
| <b>Anexo 18</b> Costos de inversión en el sistema de dosificación y almacenamiento del STBL  | 70   |

## 1. INTRODUCCIÓN

La cobertura de servicio del sector agua y saneamiento en Colombia enfrenta el problema de suministro de agua potable en cantidad y calidad suficiente; los departamentos y municipios deben hacerse responsables de utilizar métodos y etapas de potabilización que se adapten a las condiciones de desarrollo de la región y minimicen los costos de operación y tratamiento para no disminuir el uso de agua potable a causa de incrementos tarifarios a los usuarios; esto, sumado al desarrollo industrial y el crecimiento poblacional en el país, hace pensar en la necesidad de optimizar procesos y etapas como la de coagulación-floculación, ajuste de pH, tiempos de mezcla rápida y de sedimentación que determinan la mayor o menor eficiencia y son componentes del costo total de la prestación de servicio de un acueducto. <sup>(1)</sup>

El Sulfato de Aluminio es el coagulante más usado en Colombia y es producido en gran parte para la región andina por la empresa Colombiana, Productos Químicos Panamericanos. Y por esto, P.Q.P interesado en demostrar el mejor funcionamiento de sus coagulantes líquidos y la empresa de servicios Públicos de Lebrija en mejorar las condiciones de operación de la planta de tratamiento de agua potable, establecieron hacer un estudio de las condiciones óptimas de operación de la planta para luego demostrar la eficiencia del Sulfato de Aluminio tipo B, líquido (STBL), en el proceso de purificación del agua, esperando una reducción de costos de tratamientos y aumentando la calidad de agua tratada frente al Sulfato de Aluminio tipo B, sólido utilizado actualmente en la planta.

De acuerdo, a esto se evalúa el comportamiento del STBS y STBL a diferentes condiciones en el proceso de potabilización del agua para determinar la viabilidad técnico-económica del cambio del coagulante en la planta de tratamiento de agua potable en el municipio de Lebrija.

El uso del alumbre como coagulante causa variaciones en las propiedades fisicoquímicas del agua aportando contenido de hierro y aluminio, además provocando un descenso en el pH; sin embargo, estos parámetros son controlados según lo establecido por el ministerio de salud en el decreto 475 de 1998.

En este estudio se tuvo en cuenta el impacto ambiental debido al uso del Sulfato de Aluminio tipo B en forma sólida y líquida; los resultados obtenidos fueron positivos en su totalidad para STBL, según lo establecido por el decreto.

Este trabajo fue realizado con el agua del naciente El pantano durante el periodo de diciembre 2006 hasta mayo 2007, con condiciones variables de agua cruda y se obtuvieron resultados demostrando que en la planta del municipio de Lebrija la implementación del Sulfato de Aluminio tipo B líquido es viable técnicamente presentando una mayor eficiencia en remoción de turbiedad y color residual de agua cruda, además, presentando ventajas sobre el STBS en el proceso de potabilización con un comportamiento eficaz en un rango más amplio de pH; mayor velocidad de sedimentación y reducción en la dosis de coagulante para los escenarios de turbiedad alta principalmente, reflejando así viabilidad económica.

## **2. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL**

A continuación 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 empleados para el desarrollo del presente trabajo.

### **2.1 CLASIFICACION DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO**

La calidad del agua cruda oscila en gran proporción de una fuente a otra; por ello el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable también varía. Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad del tratamiento es diferente.

Según el decreto 1594 de 1998, el gobierno de Colombia fijó una serie de criterios para calificar los estándares de una fuente de agua cruda, que se utilizará para realizar suministros domésticos, con base en estos criterios también la legislación hace sugerencias sobre el tipo de tratamiento que se debe realizar al agua. Las fuentes se clasifican en: Excelente, Buena y Fuente Pobre.<sup>(3)</sup>

### **2.2 TRATAMIENTO DE TIPO CONVENCIONAL PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA**

El sistema de tratamiento de tipo convencional debe contener tres componentes fundamentales: tratamiento físico, tratamiento químico y tratamiento microbiológico.<sup>(4)</sup>

**2.2.1 Componente Físico:** Con este se busca la eliminación de la turbiedad y el color; es decir la eliminación de materias en suspensión, finamente divididas, que no asientan fácilmente, acompañadas muchas veces de materias orgánicas coloidales o disueltas, que no son retenidas por la simple filtración. Para ello es necesario un tratamiento previo con coagulante químico, seguido

de decantación o clarificación y luego filtración, a través de un manto de arena u otro material inerte y finalmente un tratamiento de desinfección, más o menos intenso, según el grado de contaminación. Además, eliminar o reducir la intensidad de los gustos u olores para lo cual se recomiendan distintos procedimientos, que dependen de la naturaleza del problema; se puede hablar de tratamiento por: aireación, Carbón activado, uso de cloro u otros oxidantes, como el ozono, etc, y algunas veces combinado con tratamiento previo del agua natural con un alguicida.

**2.2.2 Componente Químico:** El tratamiento corrector químico se refiere a la corrección del pH del agua, a la reducción de la dureza, a la eliminación de los elementos nocivos o al agregado de ciertos productos químicos, buscando siempre mejorar la calidad del agua. La corrección del pH puede hacerse agregando cal o carbonato de sodio, antes o después de la filtración. La reducción de la dureza, puede hacerse por métodos simples (cal, soda, Zeolita o resinas) o métodos compuestos (cal-soda; cal zeolita, cal-resinas).

**2.2.3 Componente Microbiológico:** El tratamiento bacteriológico se refiere casi exclusivamente a la desinfección con cloro, pudiéndose utilizar cloro puro, sales clorogénas o hipocloritos. Las dosis a utilizar generalmente se fijan en base al cloro residual. Luego de aplicar este tratamiento el agua será apta para el consumo humano y se conducirá por gravedad hasta el tanque de almacenamiento y distribución.

## **2.3 PROCESOS UNITARIOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**

**2.3.1 Proceso De Oxidación- Aireación:** La aireación es el proceso unitario mediante el cual el agua es puesta en contacto íntimo con el aire con el propósito de modificar la concentración de sustancias volátiles contenidas en ella. En resumen es el proceso de introducir aire al agua. Las funciones mas importantes de la aireación son: transferir oxígeno al agua para aumentar el OD, disminuir la concentración de  $\text{CO}_2$ , disminuir la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$ , remover gases como metano, cloro y amoníaco, oxidar hierro y manganeso y

remover sustancias volátiles productoras de olores y sabores. Con esto, cumple sus objetivos de purificación del agua mediante el arrastre o barrido de las sustancias volátiles causado por la mezcla turbulenta del agua con el aire y por el proceso de oxidación de los metales y los gases. <sup>(5)</sup>

**2.3.2 Mezcla Rápida:** La canaleta Parshall es una estructura que permite medir el caudal y efectuar la mezcla rápida. Es una unidad muy utilizada que trabaja con el concepto de resalto hidráulico provocado para mezclar los reactivos con el agua. Por lo tanto la mezcla rápida es indispensable para tener un uso racional de productos químicos.

**2.3.3 Coagulación:** La coagulación se hace para lograr la desestabilización de las partículas coloidales, para quitar los coloides del agua la mejor solución es realizar como primer paso una coagulación de las partículas con un agente coagulante y comienza en el mismo instante en que se agrega el coagulante al agua y dura fracciones de segundos. <sup>(5)</sup>

El objetivo de este paso es desestabilizar la carga electrostática coloidal para promover su aglomeración futura durante el paso de la floculación <sup>(6)</sup>. Debido a que son partículas de muy bajo diámetro que son responsables de la turbiedad o del color del agua.

La coagulación es un proceso complejo que se ve afectado por los siguientes factores: características del agua, tipo y dosis de coagulante, pH de coagulación, condiciones de mezcla y temperatura.

**2.3.4 Floculación:** Una vez se agregan las sustancias coagulantes al agua, estas reaccionan con la alcalinidad a causa de cargas eléctricas y forman unos grumos de partículas en suspensión, denominados FLOC, los cuales, se requiere que efectúen una serie de choques y de este modo se aglomeren entre sí, esto se logra mediante un proceso de agitación lenta.

En el proceso de choque entre partículas intervienen en forma secuencial tres formas de transporte: Floculación pericinética <sup>(2)</sup>, Floculación ortocinética o gradiente de velocidad y Sedimentación diferencial.

**2.3.5 Sedimentación:** La sedimentación es una unidad que permite la separación de los lodos formados en el floculador, buscando disminuir 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. El reposo natural prolongado también ayuda a mejorar la calidad del agua, pues provee oportunidad de la acción directa del aire y los rayos solares, lo cual mejora el sabor y elimina algunas sustancias nocivas del agua. La sedimentación secundaria ocurre cuando se aplica un coagulante para producir el asiento de la materia sólida contenida en el agua.

**2.3.6 Corrección De pH:** Al reaccionar el coagulante con el agua, se forma un ión aluminio hidratado  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ , el cual al reaccionar con las moléculas que conforman la alcalinidad del agua, hace descender el pH del agua. <sup>(1)</sup> Este proceso se realiza mediante la adición de cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), aplicada en solución, la cual es preparada en un tanque mezclador de cal y suministrada por medio de un dosificador.

**2.3.7 Filtración:** Unidad utilizada para separar las partículas y microorganismos que no se eliminaron en los procesos anteriores, la filtración depende en gran manera de la eficiencia que tengan los procesos de coagulación-floculación-sedimentación. Permitiendo pulir el agua, removiendo microflóculos: esto es, turbiedad, color, quistes de amebas, etc.

**2.3.8 Desinfección:** Tiene como objetivo la eliminación de agentes patógenos presentes en el agua tales como bacterias, virus y protozoarios, los cuales pueden producir enfermedades o infecciones en el organismo.

Esta operación se lleva a cabo mediante la aplicación de cloro gaseoso u otro agente desinfectante como por ejemplo hipoclorito de sodio, en dosis apropiadas al agua filtrada, para cumplir con los objetivos de este proceso.

## **2.4 DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA**

El agua cruda que llega a la planta para ser tratada proviene de dos captaciones a través de bocatomas de fondo las cuales son: el naciente el pantano y quebrada el águila, su funcionamiento depende de las necesidades de la comunidad.

Estos dos caudales se aforan en la canaleta Parshall, y así el caudal total captado se encuentra entre 33-70 L/s.

**2.4.1 Cámara De Aireación:** El sistema de aireación esta localizado en la entrada del agua cruda. La cámara de aireación contiene quince (15) bandejas en total, cada una de 2m longitud, 2m de ancho, 25cm de profundidad útil. Las últimas cuatro (4) filas de bandejas contienen carbón activado, la distancia entre cada bandeja es de 26cm, provistos en sus fondos de carbón coque para cumplir con los principales objetivos de esta unidad.

La bandeja inferior actúa como pre-sedimentador de 8m de longitud, 2.9m de ancho y profundidad de 52cm, la cual tiene una salida de tres (3) pulgadas para la limpieza.



**Figura 2.1.** Cámara de aireación en la planta del municipio de Lebrija.

**2.4.2 Edificio De Dosificación:** El agua proveniente de la cámara de aireación se recibe en una cámara de llegada y esta pasa a la canaleta Parshall que se muestra en la figura 2.2, en la cual ocurre la dosificación del coagulante (sulfato de aluminio Tipo B, sólido) aprovechando la mezcla que allí ocurre por la turbulencia producida en el resalto hidráulico.

Este proceso se conoce como MEZCLA RAPIDA y tiene como finalidad poner en contacto íntimo y mezclar de forma homogénea y continua el coagulante para que la coagulación y floculación sean lo mejor posible.



**Figura 2.2.** Canaleta Parshall de la planta del municipio de Lebrija

**2.4.3 Floculadores:** Dos tanques de floculación de paletas horizontales, el floculador No.1 tiene 5.14m de ancho, 12m de longitud y 2.4m de profundidad. Están divididos longitudinalmente en 121 compartimientos separados por tabiques de concreto, figura 2.3. El floculador No.2 tiene 21.6m de longitud, 6m de ancho, profundidad 79 cm y está dividido por 81 compartimientos separados por tabiques de concreto, figura 2.4.

**2.4.3.1 Funcionamiento:** Luego de la aplicación y mezcla rápida del coagulante en la canaleta Parshall, pasa a los canales de entrada de cada uno de los tanques de floculación.

En su paso por los compartimientos, el agua es agitada lentamente debido al gradiente, a medida que avanza el agua, disminuye la velocidad, favoreciendo de esta manera la formación de los floc lo cual aumenta la eficiencia del proceso.



**Figura 2.3.** Floculador No 1. Planta del municipio de Lebrija



**Figura 2.4.** Floculador No 2. Planta del municipio de Lebrija

**2.4.4 Sedimentadores:** Se encuentran ubicados inmediatamente después de los tanques de floculación.

**2.4.4.1 Descripción:** Los dos sedimentadores de la planta del municipio de Lebrija son de tipo acelerados de flujo ascendente con placas paralelas. Ver figura 2.5. Las dimensiones son: ancho 2.95m y longitud 12m cada uno.



**Figura 2.5.** Sedimentadores de la planta del municipio de Lebrija.

**2.4.4.2 Funcionamiento:** Los Sedimentadores son abastecidos por una canaleta que trae el agua floculada, cada sedimentador posee una canaleta que lleva el agua sedimentada a un canal central que a su vez entrega a un canal abierto, común a las dos estructuras.

El flujo es ascendente, de manera que el agua sube, atravesando las placas planas de asbesto colocadas para que los floc se depositen en el fondo.

**2.4.5 Filtros:** Los filtros están ubicados al final de una canaleta que recibe el agua sedimentada donde se suministra cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), figura 2.6.



**Figura 2.6.** (a) y (b) Galería de filtros en la planta del municipio de Lebrija

**2.4.5.1 Descripción:** Los filtros tiene un lecho filtrante compuesto por una capa de grava, una de arena y en la parte superior una capa de antracita. Las dimensiones son: ancho 1.67m, longitud 1.67m y altura total 5.5m.

**2.4.6 Tanques De Almacenamiento:** Cada uno de los tanques de almacenamiento de la planta del municipio de Lebrija tiene un volumen de 150 y 300 m<sup>3</sup>. Se encuentran ubicados luego de la unidad de desinfección.

### **3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS <sup>(8)</sup>**

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en las variables de respuestas en la salida.

Con un diseño se puede optimizar la información generada acerca de un proceso en relación con los objetivos planteados.

#### **3.1 SELECCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

Cuando surge un problema de investigación se tiene la necesidad de hacer comparaciones de métodos o de tratamientos para elegir la mejor alternativa entre las que se dispone o para conocer el comportamiento de la variable de interés dentro de un proceso conocido.

Para el desarrollo experimental del siguiente trabajo, se comparó el sulfato de aluminio tipo B (STB) en sus dos modalidades sólida y líquida, con el fin de determinar cual de los dos proporciona las mejores características de calidad de agua y reduce los costos de operación.

Para este estudio se escogió un diseño factorial  $2^k$ , teniendo k factores cada uno con dos niveles, en nuestro caso son cualitativos, inferior y superior encerrando cada uno rangos numéricos de comportamientos, ver ANEXO 1.

Este diseño se utilizó para conocer las características del afluente, además, determinar las condiciones reales de operación de la planta y la mejor combinación entre los factores buscando la más alta remoción de turbiedad y color.

Para hallar las dosis óptimas y validar los dos coagulante STBS y STBL se organizaron las muestras escogidas en dos escenarios de turbiedad de agua cruda y se utilizó un diseño aleatorizado por bloques completos para su análisis estadístico.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este trabajo consta de un estudio técnico y económico para la decisión del cambio de coagulante en la planta del municipio de Lebrija, el cual fue realizado a nivel de laboratorio en las instalaciones de dicha planta y en el laboratorio del CEIAM-GUATIGUARA de la UIS. Para la realización de este trabajo se siguió la siguiente metodología.

### 4.1 ETAPAS METODOLÓGICAS

**4.1.1 Revisión Bibliográfica:** Esta etapa involucró el conocimiento de las pruebas y ensayos de las variables que se ven involucradas en el costo de tratamiento y en la calidad del agua, teniendo en cuenta el decreto 475 de 1998, ver ANEXO 2, leyes de Ministerio de Salud. <sup>(7)</sup>

**4.1.2 Etapa Experimental:** El desarrollo experimental consta de diversos ensayos que se realizarán simultáneamente para el Sulfato de Aluminio tipo B sólido y el Sulfato tipo B líquido. (Ficha técnica Ver ANEXO 3)

El mecanismo para simular el proceso de tratamiento de agua potable en el municipio de Lebrija, consistirá en adecuar las etapas de coagulación-floculación en vasos precipitados de 1 L y evaluar distintos parámetros durante y/o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento.

Se determinarán las siguientes variables:

- ✓ Dosis del coagulante.
- ✓ Tiempo de mezcla rápida
- ✓ Tiempo de sedimentación.
- ✓ Influencia del pH en la coagulación.
- ✓ Influencia de la dosis de coagulante en el pH.

Teniendo en cuenta que los parámetros que afectan el muestreo: Turbiedad, color y pH del agua cruda.

**4.1.3 Evaluación Técnica Del Sulfato De Aluminio Tipo B, Líquido:** En esta etapa se hizo el análisis de los resultados obtenidos en la prueba comparativa, y se determinó la viabilidad del cambio de coagulante en la planta desde el punto de vista técnico, obteniendo también los parámetros operacionales óptimos para cada coagulante.

Los factores que se analizaron en esta evaluación fueron.

- ✓ Forma de dosificación.
- ✓ Reducción en el consumo de coagulante.
- ✓ Efectividad en el rango de pH.
- ✓ Carreras de filtración.
- ✓ Parámetros de calidad del agua tratada. <sup>(7)</sup>
- ✓ Parámetros operacionales para cada coagulante.

**4.1.4 Análisis económico:** Se determinó la viabilidad del cambio de coagulante en la planta desde el punto de vista económico.

El análisis económico se realizó con base en los resultados obtenidos a nivel del laboratorio y en los datos diarios de operación de la planta. Luego, de determinar el consumo de productos químicos se calculó el costo anual que involucra este consumo y se comparó con el costo anual del sulfato de aluminio tipo B sólido, actualmente utilizado.

## **4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

**4.2.1 Determinación De La Dosis Óptima De Coagulante:** Buscando una rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta se determina la dosis de cada coagulante, se utilizó un equipo de jarras PHIPPS&BIRD, de cuatro jarras cilíndricas de 1000ml de capacidad.

Los coagulantes se aplicaron en soluciones de concentración 1% P/V o V/V para el caso del STBL, las cuales no se pueden conservar por más de 24 horas debido a la hidrólisis y pueden perder la capacidad de coagulación.

Las variables de respuesta analizadas en cada una de las jarras son: Influencia de la dosis de coagulante en el pH final, color y turbiedad residual.

Las variables de operación con las que se realizaron estas pruebas son:

**Tabla 4.1.** Variables de operación para las pruebas de jarras

| <b>Variable operacional</b>             | <b>Valor fijado</b> |
|---|---------------------|
| Velocidad de agitación en mezcla rápida | 100rpm              |
| Velocidad de agitación en floculación   | 50rpm               |
| Tiempo de floculación                   | 15min               |
| Concentración de coagulante             | 1%                  |
| Tiempo de mezcla rápida                 | 1min                |
| Tiempo de sedimentación                 | 15min               |

A partir de las variables de operación, mostradas anteriormente, se determinaron los parámetros operacionales y se iniciaron las pruebas, teniendo en cuenta las secuencias del ANEXO 4.

#### **4.2.2 Determinación De La Influencia De La Dosis De Coagulante En El pH**

**Final:** El objetivo es mirar la influencia del coagulante en la alcalinidad y en el pH final, para comparar sus efectos.

El ensayo consiste en:

1. Determinar el pH inicial del agua cruda.
2. Adicionar a cada jarra, dosis progresivas de coagulante.
3. Seguir la prueba de jarras normalmente y al final determinamos el pH.
4. Hacer una grafica de pH final vs. Dosis de coagulante.
5. Esta prueba se hará para STBS y STBL.

#### **4.2.3 Determinación De La 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.

El objetivo es determinar el rango de pH en el cual se den los mejores resultados de coagulación.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Se efectúa una prueba de dosis óptima para cada coagulante.

2. Se coloca agua cruda en cada jarra y en cada una de ella se ajusta el pH usando ácido sulfúrico 0.1N o hidróxido de sodio 0.1N, de tal forma que varíe desde un valor de 4 hasta 9 unidades de pH en las 4 jarras.
3. 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 vs. pH y otro color vs. pH.

**4.2.4 Velocidad De Sedimentación De Las Partículas <sup>(1)</sup>:** El objetivo de este ensayo es comparar el trabajo que los coagulantes STBS y STBL realizan y que tan rápido precipitan los flocs. Este ensayo se hará con los dos coagulantes a la vez, ya que solo se necesitan una jarra por coagulante.

El ensayo a seguir es el siguiente:

1. Se determina la turbiedad del agua cruda, la cual se designa como  $N_0$
2. Se aplica a cada jarra la dosis óptima de coagulante, mientras se hace girar el agitador a 100rpm.
3. Después de la mezcla rápida se cambia la velocidad de las paletas a 50rpm durante 15min.
4. Se detiene las paletas, se levantan y se empiezan a tomar muestras de cada jarra a intervalos de tiempos regulares, de:  $t=3\text{min}$ ,  $t=12\text{min}$ ,  $t=20\text{min}$ ,  $t=25\text{min}$ .
5. A cada una de las muestras y para cada intervalo de tiempo se le determina la turbiedad  $N_t$ . Con estos datos se traza una curva de porcentaje de turbiedad removida vs. Tiempo de sedimentación.

El porcentaje de remoción será:  $\left(1 - \frac{N_t}{N_0}\right) * 100$

Al graficar estos valores contra los tiempos de toma de muestra se puede observar la velocidad de sedimentación del floc formado con cada coagulante.

**4.2.5 Determinación De Los Parámetros Óptimos De Coagulación-Floculación:** Los parámetros óptimos que se determinaran son: tiempo óptimo de mezcla rápida, tiempo y gradiente óptimo de floculación.

**4.2.5.1 Tiempo Óptimo De Mezcla Rápida <sup>(1)</sup>:** Se hará una prueba de jarras normalmente, variando solamente el tiempo de mezcla rápida, los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se efectúa una prueba de jarras y se determina la dosis óptima para los dos coagulantes.
2. Se utilizan dos jarras (Una para cada coagulante) y a cada una de ellas se le aplica la dosis óptima, mientras que giran los agitadores a 100rpm.
3. Se dejan girar las paletas a 100rpm, durante el tiempo escogido, por ejemplo 30s, y luego se cambia la velocidad a 50rpm, y se continúa la prueba normalmente.
4. Todo el ensayo se repite para 60, 90 y 120 segundos de mezcla rápida.
5. Al final se harán curvas de Turbiedad vs. Tiempo de mezcla rápida y de color vs. Tiempo de mezcla rápida, para cada coagulante y de esta forma se determina el tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante

Esta prueba se determinó con una turbiedad de agua cruda de 24NTU, debido a que este valor se presenta en promedio durante la mayor parte del año.

**4.2.5.2 Determinación De Tiempo Óptimo Y Mejor Gradiente De Floculación STBL <sup>(1)</sup>:** El principal objetivo es conocer la intensidad de agitación, 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.

Este ensayo se realizó con dos valores diferentes de turbiedad inicial del agua cruda, determinando la dosis óptima de STBL utilizada para cada una de ellas. Después de que se ha determinado la dosis óptima se procede de la siguiente manera:

1. Se aplica a las tres jarras la dosis óptima del coagulante a 100rpm, la mezcla rápida se deja durante el tiempo óptimo encontrado anteriormente.
2. Luego se reduce la velocidad de los agitadores a la deseada, en este caso 40rpm. Este se toma como el 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 4.2.
4. En este ensayo el tiempo de sedimentación es de 10min. A cada una de las muestras se determina turbiedad y color, para graficar Turbiedad residual y color vs. Tiempo de floculación.
5. Después, se procede a realizar de nuevo, variando la velocidad de las paletas a 50rpm y los resultados se graficaran de la misma manera.

Esta secuencia constituye la prueba de gradientes completa para el STBL, solo se analizo el comportamiento de este coagulante, teniendo en cuenta que el tiempo y gradiente de floculación no fueron factores de influencia en el análisis de experimentos general.

**Tabla 4.2.** Secuencia para los ensayos de tiempo y gradiente de floculación

| <b>Tiempo de floculación (minutos)</b> | <b>Acción a ejecutar</b>                      |
|--|---|
| 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          |
| 37                                     | Se toma la muestra de la celda No. 4          |

Solo se hizo para dos velocidades de agitación durante el proceso de floculación teniendo en cuenta que el gradiente de agitación promedio en los floculadores de la planta oscila en el rango estudiado (40-50 rpm).

## 5 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

La experimentación se realizó en el periodo comprendido entre diciembre de 2006 y mayo de 2007, en este periodo se presentaron variaciones en los valores de turbiedad, color y pH del agua cruda y los rangos se presentan a continuación

**Tabla 5.1.** Rango de Variables para turbiedad baja

| Turbiedad(NTU) | Color(UPC) | pH        |
|----------------|------------|-----------|
| 17 - 21        | 99 - 109   | 6.5 – 8.0 |

Sin embargo, en el período de experimentación también se presentaron condiciones del agua cruda a las que se trabaja normalmente en alto invierno. Además, se amplió el rango de pH de agua cruda para analizar el comportamiento de los coagulantes STBS y STBL en los niveles establecidos.

**Tabla 5.2.** Rango de variables a medir para turbiedad alta

| Turbiedad(NTU) | Color(UPC)  | pH        |
|----------------|-------------|-----------|
| 220-540        | 1310 - 3040 | 6.5 – 8.0 |

### 5.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

**5.1.1 Determinación De La Dosis Óptima De Cada Coagulante:** Para este ensayo se estudiaron diversas muestras de agua cruda con diferentes valores de turbiedad, color y pH. Los experimentos se diseñaron para cada uno de los coagulantes Teniendo en cuenta un diseño aleatorizado por bloques completos<sup>(8)</sup>.

Se organizaron las muestras en dos escenarios de turbidez teniendo en cuenta que la relación entre coagulantes en dosis óptima esta entre 1.2 a 1.6, para esto se utilizaron los rangos presentados en las tablas 5.1 y 5.2.

#### 5.1.1.1 Determinación De La Dosis Óptima De STBS Para Baja Turbiedad:

Para esta prueba se analizaron cuatro muestras escogidas aleatoriamente que presentan valores de turbiedad de: 17, 19, 20 y 21NTU; los valores de color 99, 104, 110 y 109UPC respectivamente. Las dosis con que se trabajaron fueron: 15, 20, 25 y 30ppm. Estos datos se muestran en la tabla 5.3.

**Tabla 5.3.** Diseño aleatorizado por bloques completos para determinar dosis de STBS  
**Dosis de coagulante STBS (ppm)**

| Experimento | Turbidez Inicial (NTU) | 15 | 20 | 25 | 30 |
|-------------|------------------------|----|----|----|----|
| 1           | 17                     | 6  | 5  | 3  | 5  |
| 2           | 19                     | 6  | 5  | 3  | 5  |
| 3           | 20                     | 5  | 7  | 4  | 8  |
| 4           | 21                     | 7  | 4  | 4  | 5  |

Utilizando el sistema computacional Statgraphics se determino la dosis con que se lograba una mejor remoción de turbiedad y color, empleando la técnica estadística ANOVA con dos criterios de clasificación.

La hipótesis está dada por:  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ , 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 5.4.** Análisis de Varianza para la dosis de STBS en turbiedad inicial baja  
 Análisis de la Varianza para Turbidez final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente              | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|---------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis            | 15,25             | 3  | 5,08333        | 4,46       | 0,0350  |
| B: Turbidez inicial | 4,25              | 3  | 1,41667        | 1,24       | 0,3501  |
| RESIDUOS            | 10,25             | 9  | 1,13889        |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)   | 29,75             | 15 |                |            |         |

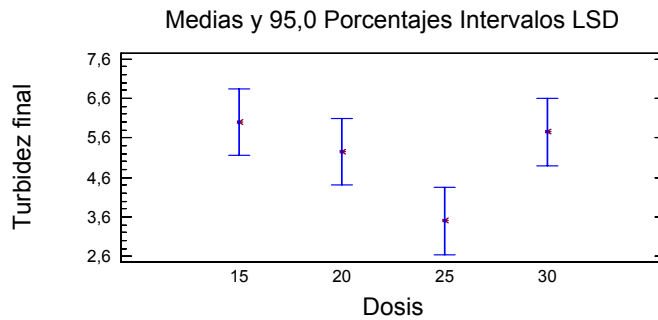
De la tabla 5.4 se observa que para la dosis del coagulante se obtuvo un p-valor = 0,0350 <  $\alpha$  = 0.05, lo cual indica que esta tiene un efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, por lo que se rechaza la hipótesis de igualdad para la turbidez media poblacional, y se acepta que al menos dos de las dosis son diferentes en cuanto a la turbidez residual que se generan. Como se rechazó la hipótesis de igualdad de las cuatro dosis de coagulante; mediante un grafico de cajas simultaneo y mediante un grafico de medias utilizando el método de la diferencia mínima significativa se encontró la dosis con que se obtenía mayor remoción de turbiedad y color.

Para el caso de color los resultados son muy similares; se encontró un p-valor = 0,0007 por lo que se rechaza la hipótesis de igualdad.

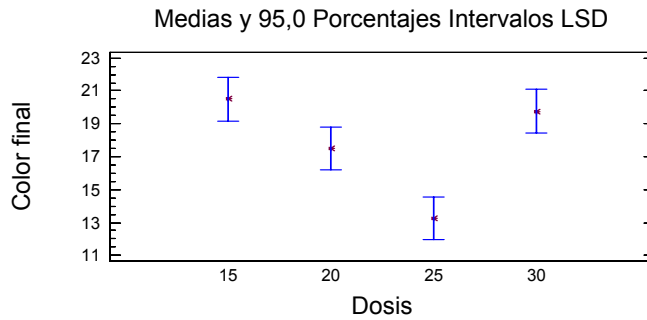
La tabla ANOVA para el análisis de color aparece en el ANEXO 5.

En la figura 5.1 Y 5.2 se aprecia que los mejores niveles en remoción de turbiedad y color se presentan para una dosis de 25ppm.

Para el caso correspondientes a 15, 20 y 30ppm no se presenta la remoción de turbiedad adecuada, debido a que la media y el intervalo de confianza incluyen valores por encima de la norma establecida por el decreto 475 para turbiedad de agua potable. Además los intervalos se traslapan lo que los hace estadísticamente iguales.

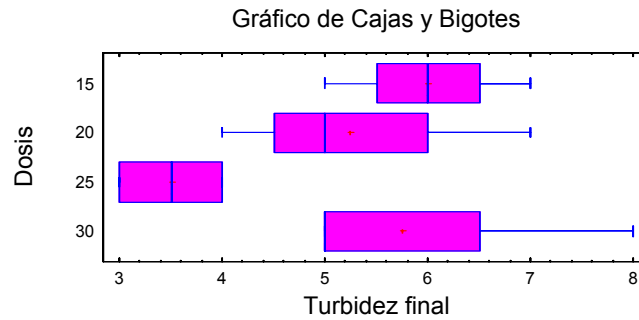


**Figura 5.1.** Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar dosis de coagulante



**Figura 5.2.** Grafico de medias de Color con el método LSD para determinar dosis de coagulante

En el diagrama de la figura 5.3 se observa claramente que la dosis correspondiente a 25ppm es diferente a sus medias y además, no se traslapa y representa la menor turbiedad residual, por lo tanto, tiene el mejor comportamiento. De esta manera podemos escoger la dosis de 25ppm de STBS como la adecuada para los experimentos posteriores, donde se comparara los dos tipos de coagulante.



**Figura 5.3.** Diagrama de cajas para determinación de dosis de coagulante.

### 5.1.1.2 Determinación De La Dosis Óptima De STBS Para Turbiedad Alta:

El análisis para determinar la dosis de STBS para turbiedad alta es el mismo utilizado para turbiedad baja.

**Tabla 5.5.** Diseño aleatorizado por bloques completos para determinar dosis de STBS

| Experimento | Turbidez Inicial (NTU) | Dosis de coagulante STBS (ppm) |    |    |    |
|-------------|------------------------|--------------------------------|----|----|----|
|             |                        | 40                             | 50 | 60 | 70 |
| 1           | 220                    | 8                              | 5  | 3  | 7  |
| 2           | 378                    | 8                              | 6  | 4  | 9  |
| 3           | 485                    | 7                              | 5  | 3  | 11 |
| 4           | 540                    | 10                             | 7  | 3  | 8  |

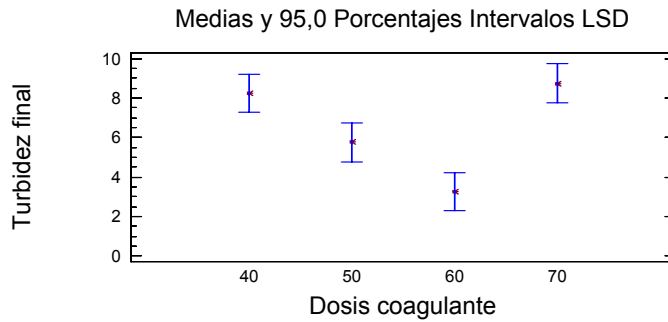
En el análisis de varianza para turbiedad y color se rechaza la hipótesis de la igualdad, donde se acepta que la turbiedad y el color residual generado por cada una de las dosis son diferentes. El ANOVA para el color aparece reportado en el ANEXO 6.

**Tabla 5.6.** Análisis de Varianza para la dosis de STBS en turbiedad inicial alta

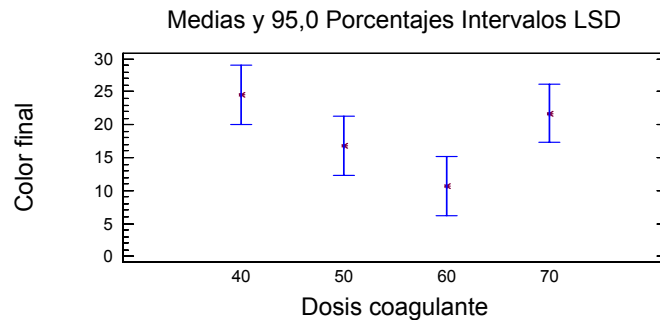
Análisis de la Varianza para Turbidez final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente              | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|---------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis coagulante | 77,0              | 3  | 25,6667        | 17,11      | 0,0005  |
| B: Turbidez inicial | 3,5               | 3  | 1,16667        | 0,78       | 0,5354  |
| RESIDUOS            | 13,5              | 9  | 1,5            |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)   | 94,0              | 15 |                |            |         |

En la figura 5.4 y 5.5 se ven claramente que la dosis correspondiente a 60ppm presenta mejor porcentaje en remoción de turbiedad y color residual.



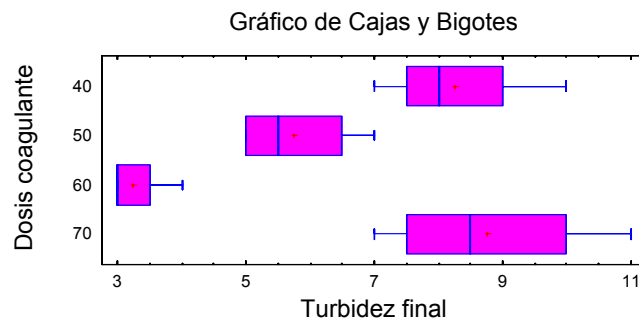
**Figura 5.4.** Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar dosis de coagulante



**Figura 5.5.** Grafico de medias de Color con el método LSD para determinar dosis de coagulante

La dosis correspondiente a 50 ppm presenta turbiedades y colores residuales bajos, sin embargo, no mejora los resultados de la dosis de 60ppm ya que los intervalos de confianza de esta dosis no se traslapan, lo que hace que sean estadísticamente diferentes. Las dosis de 40 y 70ppm presentan intervalos de confianza que se traslapan lo que los hace estadísticamente iguales.

En el diagrama de la figura 5.6 se observa claramente que la dosis de 60ppm es la adecuada por los niveles de remoción de turbiedad residual.



**Figura 5.6.** Diagrama de cajas para determinación de dosis coagulante

De esta manera podemos escoger la dosis de 60ppm de Sulfato de Aluminio Tipo B sólido para luego hacer la comparación de los dos coagulantes.

### 5.1.1.3 Determinación De La Dosis Óptima De STBL Para Turbidez Baja:

Para esta prueba se analizaron cuatro muestras escogidas aleatoriamente que presentaron valores de turbidez de: 17, 19, 20 y 21NTU; los valores de color 99, 104, 116 y 97UPC respectivamente. Las dosis con que se trabajaron fueron: 30, 40, 50 y 60ppm. Estos datos se muestran en la tabla 5.7.

**Tabla 5.7.** Diseño aleatorizado por bloques completos para el experimento de dosis aplicada

| Experimento | Turbidez Inicial (NTU) | Dosis de coagulante STBL (ppm) |    |    |    |
|-------------|------------------------|--------------------------------|----|----|----|
|             |                        | 30                             | 40 | 50 | 60 |
| 1           | 17                     | 8                              | 3  | 6  | 9  |
| 2           | 19                     | 7                              | 3  | 5  | 6  |
| 3           | 20                     | 10                             | 1  | 3  | 6  |
| 4           | 21                     | 9                              | 2  | 5  | 6  |

De la tabla 5.8 se observa que para la dosis del coagulante se obtuvo un p-valor =  $0,0003 < \alpha = 0,05$ , lo cual indica que esta tiene un efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, por lo que se rechaza la hipótesis de igualdad de las cuatro dosis de coagulante, y se acepta que al menos dos de las dosis son diferentes en cuanto a la turbidez residual que se generan.

Mediante un diagrama de cajas simultáneo y un gráfico de medias utilizando el método de la diferencia mínima significativa se encontró la dosis que genera la mayor remoción de turbiedad y color residual en el escenario de turbiedad inicial baja.

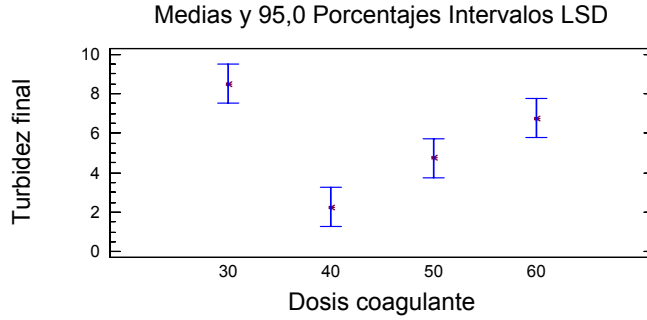
**Tabla 5.8.** Análisis de Varianza para la dosis de STBL en turbiedad inicial baja

Análisis de la Varianza para Turbidez final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

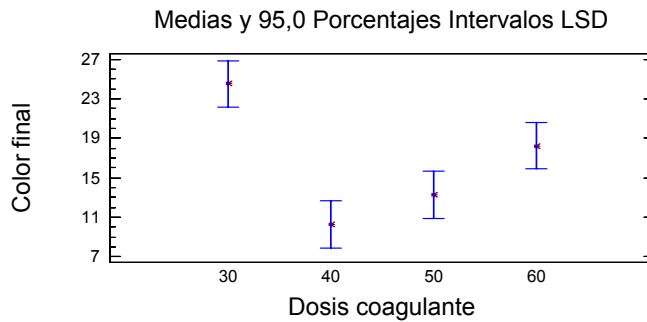
| Fuente               | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|----------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis coagulante  | 86,6875           | 3  | 28,8958        | 18,49      | 0,0003  |
| B: Turbidez inicial  | 5,1875            | 3  | 1,72917        | 1,11       | 0,3960  |
| RESIDUOS             | 14,0625           | 9  | 1,5625         |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)    | 105,938           | 15 |                |            |         |

Según la figura 5.7 y figura 5.8, se aprecia que la dosis de 40ppm remueve mayor cantidad de turbiedad y color residual.

Para el caso del color el ANOVA aparece en el ANEXO 7.

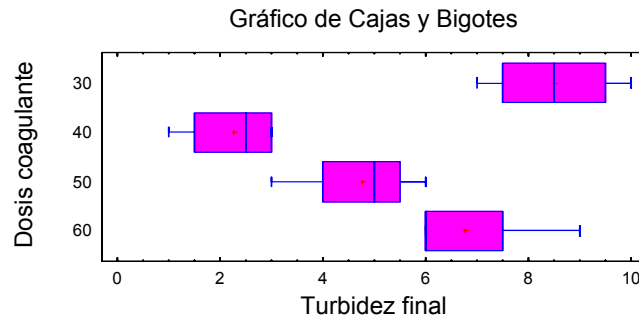


**Figura 5.7.** Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar dosis de coagulante



**Figura 5.8.** Grafico de medias de Color con el método LSD para determinar dosis de coagulante

En el diagrama de la figura 5.9 se observa que la dosis correspondiente a 40ppm es diferente a las otras en cuanto a sus medias, además no se traslapa la caja por lo cual presenta la menor turbiedad residual teniendo el mejor comportamiento.



**Figura 5.9.** Diagrama de cajas para determinación de dosis coagulante

La dosis correspondiente a 50ppm presenta buen comportamiento estadístico al no traslaparse la caja, sin embargo, no presenta los mejores resultados en remoción de turbiedad, por lo que se descarta. De lo anterior, podemos escoger la dosis de 40ppm del STBL como la adecuada para el tratamiento del agua a turbiedades bajas y será la tenida en cuenta para la comparación de los coagulantes a estas condiciones.

#### 5.1.1.4 Determinación De La Dosis Óptima De STBL Para Turbiedad Alta:

El análisis para determinar la dosis de STBL para turbiedad alta es el mismo utilizado para turbiedad baja. Los resultados de STBL para turbiedad alta son:

**Tabla 5.9.** Diseño aleatorizado por bloques completos para el experimento de dosis aplicada

| Experimento | Turbidez Inicial (NTU) | Dosis de coagulante STBL (ppm) |    |    |    |
|-------------|------------------------|--------------------------------|----|----|----|
|             |                        | 50                             | 60 | 70 | 80 |
| 1           | 220                    | 11                             | 8  | 3  | 9  |
| 2           | 378                    | 12                             | 6  | 2  | 9  |
| 3           | 485                    | 12                             | 8  | 2  | 9  |
| 4           | 540                    | 11                             | 9  | 3  | 10 |

De la tabla 5.10 se observa que para la dosis del coagulante se obtuvo un p-valor =  $0,0000 < \alpha = 0,05$ , lo cual indica que esta variable tiene un efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, por lo que se rechaza la hipótesis de igualdad de las cuatro dosis de coagulante, y se acepta que al menos dos de las dosis son diferentes en cuanto a la turbidez residual que se generan.

**Tabla 5.10.** Análisis de Varianza para la dosis de STBL en turbiedad inicial alta

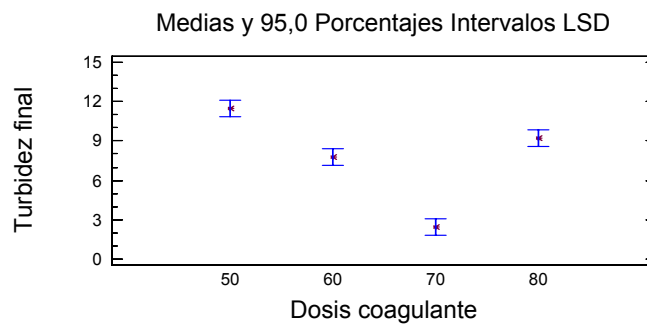
Análisis de la Varianza para Turbidez final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente              | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|---------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis coagulante | 175,5             | 3  | 58,5           | 95,73      | 0,0000  |
| B: Turbidez inicial | 2,0               | 3  | 0,666667       | 1,09       | 0,4016  |
| RESIDUOS            | 5,5               | 9  | 0,611111       |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)   | 183,0             | 15 |                |            |         |

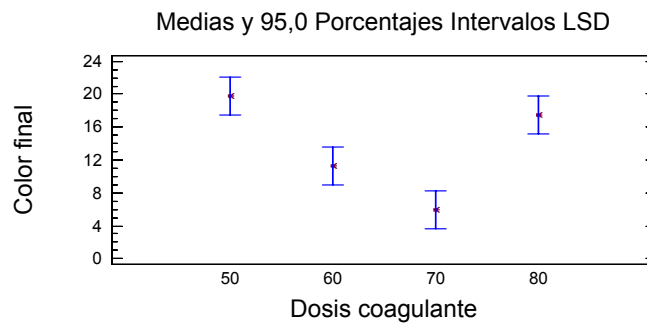
Mediante un diagrama de cajas simultáneo y un gráfico de medias utilizando el método de la diferencia mínima significativa se encontró la dosis que genera la

mayor remoción de turbiedad y color residual en el escenario de turbiedad inicial alta. Para el caso de color residual los resultados son muy similares; se encontró un p-valor = 0,0004 por lo que se rechaza la igualdad. La tabla ANOVA para el análisis de color residual aparece en el ANEXO 8.

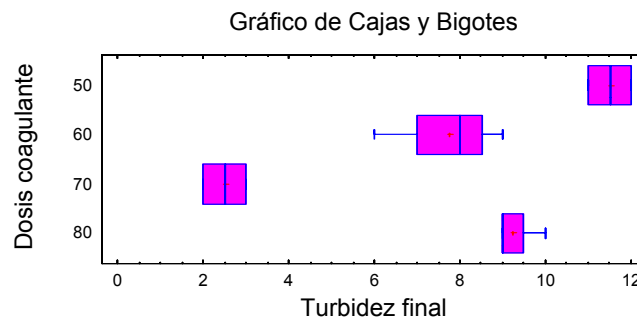
Según la figura 5.10 y figura 5.11, se aprecia que la dosis de 70ppm remueve mayor cantidad de turbiedad y color. Las dosis correspondientes a 50, 60 y 80ppm presenta buen comportamiento estadístico al no traslaparse en sus intervalos de confianza, sin embargo, no presenta los mejores resultados en remoción de turbiedad, por lo que se descartan.



**Figura 5.10.** Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar dosis de coagulante



**Figura 5.11.** Grafico de medias de Color con el método LSD para determinar dosis de coagulante



**Figura 5.12.** Diagrama de cajas para determinación de dosis coagulante

De lo anterior, podemos escoger la dosis de 70ppm de STBL como la adecuada para el tratamiento del agua a turbiedades altas y será la tenida en cuenta para la comparación de los coagulantes a estas condiciones.

**5.1.2 Influencia De La Dosis De Coagulante En El pH Final:** Teniendo en cuenta la importancia de esta prueba, ya que esta indica la reducción o eliminación del consumo de alcalinizantes en la planta, se trabajó con cuatro muestras de diferente turbiedad.

Los resultados de esta prueba los cuales se presentan en el ANEXO 9, marcaron la misma tendencia para los dos coagulantes; es decir, en la medida que se aumenta la dosis, el pH final decrece significativamente. El Sulfato de Aluminio tipo B líquido presentó mayor influencia en el pH final que el Sulfato de Aluminio tipo B sólido, por lo cual se incrementará el consumo de cal en la planta, en temporada de baja turbiedad. Sin embargo, los resultados muestran que para alta turbiedad las dosis de tratamiento de alúmina requeridas de STBL son menores que para el STBS, y por esto, el consumo de cal en la planta decrece ya que las dosis de STBL presentan menor influencia en el pH final.

**5.1.3 Validación De Los Coagulantes:** Después de determinadas las dosis optimas para los dos coagulantes en los dos escenarios de turbiedad correspondientes al agua cruda.

**Tabla 5.11** Dosis determinadas para cada uno de los coagulantes

|                      | <b>Dosis STBS<br/>(ppm)</b> | <b>Dosis STBL<br/>(ppm)</b> |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Turbidez baja</b> | 25                          | 40                          |
| <b>Turbidez alta</b> | 60                          | 70                          |

Se analizó el comportamiento de los dos coagulantes frente a cuatro parámetros de operación, utilizando las dosis determinadas para el nivel de

turbiedad baja teniendo en cuenta que en un 75% del año se presenta ésta condición en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija.

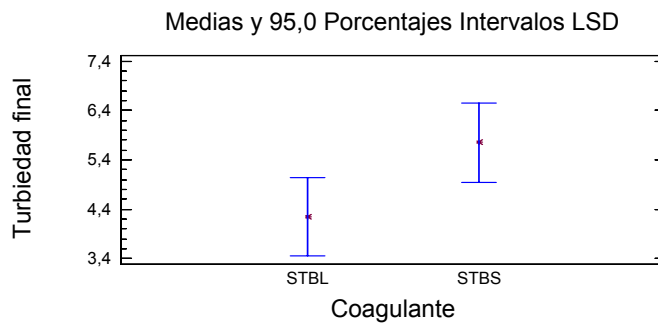
#### 5.1.4 Determinación De La Influencia Del pH En La Coagulación:

**Tabla 5.12** Análisis de Varianza para la determinación de la influencia del pH  
Análisis de la Varianza para Turbiedad final -Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente                      | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|-----------------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| <b>EFFECTOS PRINCIPALES</b> |                   |    |                |            |         |
| A: Coagulante               | 4,5               | 1  | 4,5            | 9,00       | 0,0577  |
| B: Ajuste de pH             | 34,0              | 3  | 11,3333        | 22,67      | 0,0146  |
| RESIDUOS                    | 1,5               | 3  | 0,5            |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)           | 40,0              | 7  |                |            |         |

Del análisis de varianza, el p-valor=0,0146<0,05 correspondiente al nivel de pH, presenta un efecto estadístico significativo en la turbiedad final. La mejor remoción de turbiedad en el intervalo estudiado de pH lo presenta el STBL, ver figura 5.13

Con los resultados de esta prueba, se determinó el intervalo de pH en el cual cada coagulante tiene la mejor remoción de turbiedad y color residual. (Ver ANEXO 10).



**Figura 5.13.** Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para el ajuste de pH

En el intervalo de 6.8-7.5 unidades de pH, los dos coagulantes presentan el mejor comportamiento, sin embargo, a las mismas condiciones, el coagulante que presenta mejor porcentaje de remoción en turbiedad y color residual es el Sulfato de Aluminio tipo B líquido.

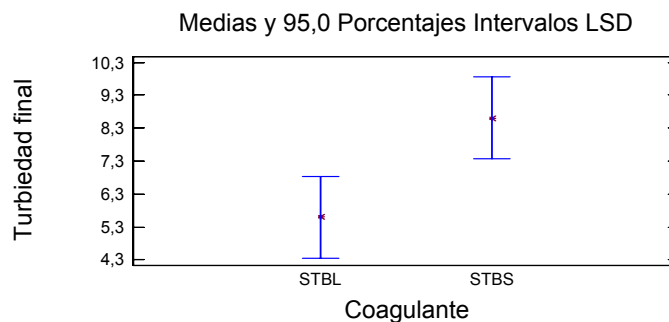
### 5.1.5 Velocidad De Sedimentación

**Tabla 5.13** Análisis de Varianza para la determinación de la velocidad de sedimentación  
Análisis de la Varianza para Turbiedad final- Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente                  | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|-------------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFFECTOS PRINCIPALES    |                   |    |                |            |         |
| A: Coagulante           | 22,5              | 1  | 22,5           | 11,25      | 0,0285  |
| B: Tiempo Sedimentación | 138,4             | 4  | 34,6           | 17,30      | 0,0086  |
| RESIDUOS                | 8,0               | 4  | 2,0            |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)       | 168,9             | 9  |                |            |         |

De la tabla anterior podemos observar que tanto el coagulante como el tiempo de sedimentación presentan valores menores a 0.05, lo cual me indica que sus respuestas en turbiedad residual son estadísticamente diferentes.

El grafico de medias, de la figura 5.14, muestra el STBL como el coagulante que presenta mayor remoción de turbiedad en el intervalo de tiempo estudiado. En el ANEXO 11, se muestran los resultados para un agua de turbiedad y color residual de 24NTU y 129UPC, los dos coagulantes, en ambos casos presentan el mismo comportamiento, sin embargo, el STBL presenta la mayor velocidad de sedimentación.



**Figura 5.14** Grafico de medias de Turbiedad con el método LSD para la velocidad de sedimentación

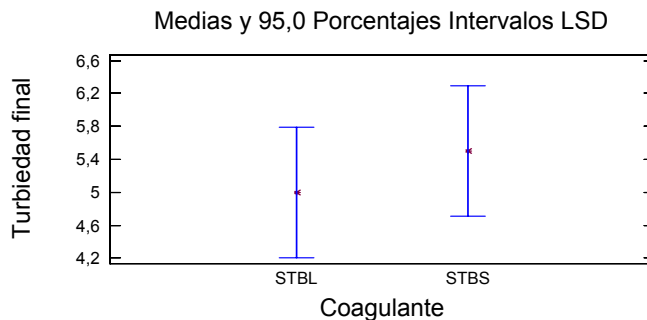
**5.1.6 Tiempo Óptimo De Mezcla Rápida:** En la tabla 5.14 se presenta el análisis estadístico mediante un ANOVA, para la determinación del tiempo óptimo de mezcla rápida.

Analizando la tabla 5.14, se puede observar que el tiempo de mezcla rápida presenta un  $p\text{-value} = 0.0368 < \alpha = 0.05$ , demostrando la importancia estadística de este factor en la variable de respuesta.

**Tabla 5.14** Análisis de Varianza para determinación de tiempo de mezcla rápida  
Análisis de la Varianza para Turbiedad final -Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente                      | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|-----------------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| <b>EFFECTOS PRINCIPALES</b> |                   |    |                |            |         |
| A: T mezcla rápida          | 17,5              | 3  | 5,83333        | 11,67      | 0,0368  |
| B: Coagulante               | 0,5               | 1  | 0,5            | 1,00       | 0,3910  |
| RESIDUOS                    | 1,5               | 3  | 0,5            |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)           | 19,5              | 7  |                |            |         |

Teniendo en cuenta, el grafico de medias de la figura 5.15, el coagulante que presenta mayor remoción es el STBL en el intervalo de tiempo de mezcla rápida estudiado.



**Figura 5.15** Gráfico de medias de Turbiedad con el método LSD para determinar tiempo de mezcla rápida

En el ANEXO 12 se presentan gráficamente los comportamientos de los dos coagulantes para la determinación del tiempo óptimo de mezcla rápida.

Para un agua de turbiedad y color residual de 24NTU y 129UPC.

El tiempo óptimo de mezcla rápida para los dos coagulantes, fue de 1 minuto, por los resultados dados en turbiedad y color residual.

**5.1.7 Tiempo Y Gradiente De Flocculación:** Para esta prueba se analizaron dos turbiedades diferentes correspondientes a 19 y 378 NTU para estos los análisis estadísticos se encuentran en el ANEXO 13 y ANEXO 14.

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

Los valores de gradientes ensayados fueron:

| Velocidad de agitación (rpm) | Gradiente( $S^{-1}$ ) |
|------------------------------|-----------------------|
| 40                           | 33                    |
| 50                           | 44                    |

Solo se hizo el estudio para dos valores ya que el gradiente de velocidad de agitación en los floculadores de la planta se encuentra actualmente comprendido en este intervalo.

Del análisis de varianza para turbiedad baja podemos observar que tanto la velocidad de agitación como el tiempo de floculación y el tipo de coagulante presentan p-valor menores a 0.05, lo cual me indica que estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en turbiedad residual. Teniendo en cuenta los gráficos de medias del ANEXO 13 Y ANEXO 14, se observa que el STBL presenta mejor eficiencia en remoción de turbiedad en el intervalo de tiempo de floculación estudiado.

En el ANEXO 15 se presenta gráficamente el comportamiento del STBL en remoción de turbiedad y color residual con cada velocidad de agitación para la determinación del mejor tiempo de floculación.

## **5.2 EVALUACION TÉCNICA DEL SULFATO DE ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO**

Esta evaluación se hizo de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y en la prueba de campo, y se determinó la viabilidad del cambio del STBS a STBL desde el punto de vista técnico y ambiental.

**5.2.1 Almacenamiento:** El Sulfato de Aluminio tipo B, líquido se debe almacenar en un tanque especialmente diseñado para el producto; tanques de poliéster, fibra de vidrio, acero o concreto revestido. Además, el área de almacenamiento debe tener poca humedad y ventilación.

**5.2.2 Forma De Dosificación:** Para el STBL se debe utilizar un sistema de tanque y bombas de desplazamiento positivo, además de tuberías y codos resistentes al medio ácido.

**5.2.3 Parámetros Operacionales Para Cada Coagulante:** Los parámetros operacionales obtenidos para los dos coagulantes son muy similares, este factor hace viable el cambio de coagulante ya que no representa cambios en la infraestructura de la planta.

El consumo de coagulante en turbiedad baja es muy similar en los dos coagulantes presentando una relación de 1.6; mientras que en turbiedad alta la relación existente es de 1.2. Lo cual hace viable el cambio de coagulante.

En la figura 5.13 y el ANEXO 10; se muestra que STBL trabaja en un amplio rango de pH lo cual garantiza que para cualquier valor de pH del agua cruda comprendido en este intervalo este trabajará adecuadamente dando viabilidad a su uso.

Como se muestra en la figura 5.14 y el ANEXO 11; la velocidad de sedimentación presentada por STBL es mayor, lo cual aumenta las carreras de filtración ya que el agua llegara a los filtros con menor turbiedad y color, lo cual disminuye la velocidad con la que aumenta la caída de presión en los filtros.

**5.2.4 Parámetros De Calidad Del Agua Tratada:** Con la prueba de campo realizada utilizando el STBL se evaluaron los parámetros fisicoquímicos del agua cruda y tratada, de acuerdo al decreto 475 de 1998, ver ANEXO 16. Los cuales fueron: pH, color, turbiedad, alcalinidad, aluminio residual, cloruros, sulfatos, nitritos, conductividad y metales pesados.

Los parámetros analizados tuvieron un cumplimiento del 100%, lo cual hace viable técnica y ambientalmente la implementación de este coagulante, además disminuyo notablemente el nivel de aluminio residual con respecto al presentado en los reportes fisicoquímicos para el agua tratada con el STBS.

### 5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

En este análisis se estudio la viabilidad económica para la implementación del Sulfato de Aluminio tipo B líquido en la planta del municipio de Lebrija y se hizo una comparación entre los costos de consumo de coagulante utilizando Sulfato de Aluminio tipo B sólido (coagulante actualmente utilizado) y el Sulfato de Aluminio tipo B líquido, teniendo las razones de reemplazo obtenidas en el estudio de las dosis óptimas para cada nivel de turbiedad.

**Tabla 5.15** Costo de coagulante P.Q.P de 2007

| <b>Coagulante</b>          | <b>Costo unitario (\$/Kg)</b> | <b>IVA(%)</b> | <b>Costo total (\$/Kg)</b> |
|----------------------------|-------------------------------|---------------|----------------------------|
| Sulfato aluminio B sólido  | 590                           | 16            | 684,4                      |
| Sulfato aluminio B líquido | 360                           | 16            | 417,6                      |

El costo del STBL fue calculado a partir del consumo predicho en los ensayos de laboratorio y para el STBS se utilizaron los datos reales suministrados por Empresa de Servicios Públicos de Lebrija (ESPL).

En el ANEXO 17 se encuentra el costo mensual de Abril 2005 hasta Agosto 2006 para cada coagulante, mostrando que desde el punto de vista económico en consumo de coagulante es viable utilizar el Sulfato de Aluminio tipo B líquido en la planta del municipio de Lebrija. Sin embargo, el uso de este coagulante requiere una inversión inicial en sistema de dosificación y almacenamiento, ya que es necesaria la instalación de unos equipos adecuados que se especifican junto con las condiciones de operación en la planta en el ANEXO 18.

Como se observa en el ANEXO 17, la reducción en costos anual de coagulante es equivalente a \$1'699478,9. Demostrando que el STBL ofrece una buena alternativa económica como reemplazo del STBS.

La implementación del STBL como coagulante primario en la planta requiere una inversión inicial aproximada de \$22'000.000 lo cual hace a esta alternativa económicamente no viable inicialmente, sin embargo, las tendencias de mejoramiento y los nuevos requerimientos para el funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua potable en Colombia apuntan a la implementación de coagulantes líquidos con mayor eficiencia y notable mejoramiento en el proceso de potabilización

## 6. CONCLUSIONES

El cambio de STBS por el STBL resulta viable desde el punto de vista técnico y ambiental; la viabilidad económica se observa por la relación de dosificación de los dos coagulantes, sin embargo, esta reducción de costos no es significativa frente a la inversión inicial de instalaciones y equipos que requiere el uso de este coagulante en la planta.

Con la realización de la prueba de campo realizada se logro una evaluación técnica y ambiental más acertada demostrando que el STBL presenta un buen desempeño con los parámetros operacionales utilizados actualmente en el proceso de potabilización.

Para el agua tratada del naciente el pantano durante el periodo de tiempo que comprendió el estudio; el STBL presenta mejores resultados en remoción de turbiedad y color que los presentados por el STBS; además en el agua tratada se reduce el alto contenido de aluminio residual presentado normalmente en la planta y se ajustan mejor todos los parámetros físico-químicos establecidos por el ministerio de salud en el decreto 475 de 1998.

Los resultados reportados en este trabajo demuestran que en la planta del municipio de Lebrija, el STBL presenta una buena eficiencia en remoción de turbiedad y color del agua cruda, reduciendo el costo en el consumo de coagulante, mayor velocidad de sedimentación de los floc, aumentando el tiempo en las carreras de filtración y actuando eficazmente en un amplio rango de pH del agua cruda.

## 7. RECOMENDACIONES

El estudio realizado de los dos coagulantes STBS y STBL para establecer la viabilidad de la implementación del STBL; además de la realización de una prueba de campo, debe ser profundizado con varias pruebas de campo mas en las que se evalué el comportamiento y funcionamiento del STBL en condiciones variadas para así tener una evaluación técnica, económica y ambiental lo mas acertada posible.

Las mejores condiciones de operación determinadas en el laboratorio para los dos sulfatos se ajustan directamente a las condiciones reales operadas en la planta, sin embargo, en caso de tener problemas técnicos con turbiedad o color residual y el pH final del agua se recomienda hacer una dosificación de cal al agua cruda para elevar el pH inicial a un nivel comprendido entre 7 – 8 unidades además se podría pensar en una mejora en el diseño para ampliar el tiempo de retención en los sedimentadores hasta un tiempo entre 20 y 25 min donde se encontró que se presentan los mejores porcentajes de remoción de turbiedad y color.

El sulfato de aluminio tipo B liquido presenta ventajas técnicas y ambientales frente al sulfato de aluminio tipo B solido; en la parte económica se presenta rentabilidad en cuanto a la dosificación necesaria de STBL frente al STBS ya que el precio del coagulante liquido es más bajo, sin embargo, requeriría de una inversión inicial que no haría rentable su utilización pero seria una inversión en mejoramiento que se vera favorecida con el tiempo ya que el uso de los coagulantes líquidos se esta aumentando en las plantas de tratamiento del país y por esto su precio tendera a la baja por la mayor oferta por parte de los proveedores.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- (1) ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogotá. Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental "ACODAL". Mc Graw Hill. 2000. Tomo 1, Pág.:11, 15, 52, 54, 72, 163-192.
- (2) 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.
- (3) MINISTERIO DE SALUD. Decreto 1594 de 1998. República de Colombia. Capítulos I y IV.
- (4) ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDADELA ALVARO URIBE VELEZ EN EL MUNICIPIO DE GIRÓN, Planta de tratamiento de agua potable. Volumen IIIa. Pág.:4-6.
- (5) PLANTA CONTINUA. Sistemas hidráulicos y sanitarios Ltda. "SIHSA".
- (6) KEMMER, Frank N; McCallion, John. Manual del agua, tratamiento y aplicaciones. 1 ed. México. Nalco Chemical Company. Mc Graw Hill, 1989. Pág.:8-21.
- (7) MINISTERIO DE SALUD. Decreto 475 de 1998. República de Colombia. Capítulos I y II.
- (8) MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. Grupo editorial Iberoamericano. Pág.: 119-149; 257-276.

## Anexo 1

### DISEÑO EXPERIMENTAL: DISEÑO FACTORIAL 2<sup>5</sup>

Factores:

- ✓ Tipo de coagulante
- ✓ Dosis del coagulante.
- ✓ Tiempo de mezcla rápida.
- ✓ Tiempo de sedimentación.
- ✓ Influencia del pH en la coagulación.

Niveles: dos (2)

Número de replica: dos (2)

Número de experimentos: Noventa y seis (96)

**Tabla 3.1.** Factores y niveles para el diseño de experimentos

| <b>Niveles<br/>Factores</b>            | <b>(1)</b>     | <b>(2)</b>      |
|--|----------------|-----------------|
| <b>Tipo de coagulante</b>              | STBS           | <b>STBL</b>     |
| <b>Dosis del coagulante</b>            | 25-40ppm       | <b>70-90ppm</b> |
| <b>Tiempo de mezcla rápida</b>         | 1min           | <b>1.5min</b>   |
| <b>Tiempo de sedimentación</b>         | 15min          | <b>25min</b>    |
| <b>Variación del pH del agua cruda</b> | <b>6.8-7.4</b> | <b>7.4-8.0</b>  |

Podemos apreciar el número de experimentos para cada Sulfato de Aluminio (STBS y STBL) de la siguiente forma:

Tabla de experimentos

| <b>Factores<br/>Experimentos</b> | <b>Concentración<br/>del coagulante</b> | <b>Tiempo<br/>mezcla<br/>rápida</b> | <b>Tiempo<br/>sedimentación</b> | <b>Variación<br/>del pH</b> |
|----------------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| <b>1</b>                         | 25-40ppm                                | 1min                                | 15min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>2</b>                         | 25-40ppm                                | 1min                                | 25min                           | <b>6.8-7.4</b>              |
| <b>3</b>                         | 25-40ppm                                | 1.5min                              | 15min                           | <b>6.8-7.4</b>              |
| <b>4</b>                         | 70-90ppm                                | 1min                                | 15min                           | <b>6.8-7.4</b>              |
| <b>5</b>                         | 25-40ppm                                | 1min                                | 15min                           | <b>6.8-7.4</b>              |
| <b>6</b>                         | 25-40ppm                                | 1min                                | 25min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>7</b>                         | 25-40ppm                                | 1.5min                              | 15min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>8</b>                         | 70-90ppm                                | 1min                                | 15min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>9</b>                         | 70-90ppm                                | 1min                                | 25min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>10</b>                        | 70-90ppm                                | 1.5min                              | 15min                           | <b>6.8-7.4</b>              |
| <b>11</b>                        | 70-90ppm                                | 1min                                | 25min                           | <b>6.8-7.4</b>              |
| <b>12</b>                        | 25-40ppm                                | 1.5min                              | 25min                           | <b>6.8-7.4</b>              |
| <b>13</b>                        | 70-90ppm                                | 1.5min                              | 25min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>14</b>                        | 25-40ppm                                | 1.5min                              | 25min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>15</b>                        | 70-90ppm                                | 1.5min                              | 15min                           | <b>7.4-8.0</b>              |
| <b>16</b>                        | <b>70-90ppm</b>                         | <b>1.5min</b>                       | <b>25min</b>                    | <b>6.8-7.4</b>              |

## Anexo 2

### CRITERIOS ORGANOLEPTICOS FISICOS Y QUIMICOS DE LA CALIDAD DE AGUA POTABLE SEGÚN EL DECRETO 475 DE 1998

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

**ARTICULO 6.** 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.

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

| CARACTERISTICAS      | EXPRESADAS EN                             | VALOR ADMISIBLE |
|----------------------|---|-----------------|
| Color verdadero      | Unidades de platino cobalto (UPC)         | <15             |
| OLOR Y SABOR         |   | Aceptable       |
| Turbiedad            | Unidades nefelométricas de turbidez (NTU) | <5              |
| Sólidos totales      | mg/L                                      | <500            |
| Conductividad        | Microhms/cm                               | 50-1000         |
| Sustancias flotantes |   | Ausentes        |

**ARTICULO 8.** 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:

| CARACTERISTICAS            | 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 <sup>-</sup> | 0.05                 |
| Cianuro total              | CN <sup>-</sup> | 0.1                  |

|  |                   |          |
|--|-------------------|----------|
| Cloroformo                             | CHCl <sub>3</sub> | 0.03     |
| Cobre                                  | Cu                | 1.0      |
| Cromo hexavalente                      | Cr <sup>+6</sup>  | 0.01     |
| Fenoles totales                        | Fenol             | 0.001    |
| Mercurio                               | Hg                | 0.001    |
| Molibdeno                              | Mo                | 0.07     |
| Níquel                                 | Ni                | 0.02     |
| Nitritos                               | NO <sup>2</sup>   | 0.1      |
| nitratos                               | NO <sup>3</sup>   | 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 <sub>3</sub>             | 50                   |
| Hidróxidos        | CaCO <sub>3</sub>             | <LD                  |
| Alcalinidad total | CaCO <sub>3</sub>             | 100                  |
| Cloruros          | Cl <sup>-</sup>               | 250                  |
| Dureza total      | CaCO <sub>3</sub>             | 160                  |
| Hierro total      | Fe                            | 0.3                  |
| Magnesio          | Mg                            | 36                   |
| Manganeso         | Mn                            | 0.1                  |
| Sulfatos          | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 250                  |
| Zinc              | Zn                            | 5                    |
| Fluoruros         | F <sup>-</sup>                | 1.2                  |
| fosfatos          | PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 0.2                  |

**ARTICULO 9.** El valor admisible del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución de agua potable, deberá estar comprendido entre 0.2 y 1.0 mg/litro.

**ARTICULO 10.** El valor para el potencial de hidrógeno, pH, para el agua potable deberán estar comprendido entre 6.5 y 9.0.

## Anexo 3

### FICHAS TÉCNICAS DEL SULFATO DE ALUMINIO TIPO B, SÓLIDO Y LÍQUIDO

#### 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 Súper B Especial

**Fórmula química:**  $Al_2(SO_4)_3 \cdot n H_2O$

**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% min.                             | 2.0% máx.                                 | 8% máx.                 |
| Tipo B Líquido*         | 7.3% min.                              | 1.2 % máx.                                | 0.1% máx.               |
| Tipo A Sólido*          | 17.0% min.                             | 0.75% máx.                                | 0.5% máx.               |
| Tipo A Líquido*         | 8.0% min.                              | 0.4% máx.                                 | 0.10% máx.              |
| Tipo Iron Free Sólido*  | 17% min.                               | 0.008% máx.                               | 0.10% máx.              |
| Tipo Iron Free Líquido* | 8.3% min.                              | 0.004% máx.                               | 0.03% máx.              |
| Super B Especial.       | 16.2% min.                             | 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. envuelve 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 4

### SECUENCIA DE PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MEJORES PARÁMETROS OPERACIONALES

| <b>Prueba</b>                                 | <b>Parámetros</b>  | <b>Comentario</b>                                 |
|---|--|---|
| 1. Determinación de la dosis óptima           | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Concentración de la solución: 1%</li> <li>➤ Tiempo de mezcla rápida: 1min</li> <li>➤ Velocidad de floculación: 50rpm</li> <li>➤ Tiempo de floculación: 15min</li> <li>➤ Tiempo de sedimentación: 15min</li> </ul> | Turbidez del agua cruda, en el rango de 19-540NTU |
| 2. Influencia de la dosis coagulante en el pH | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Concentración de la solución: 1%</li> <li>➤ Tiempo de mezcla rápida: 1min</li> <li>➤ Velocidad de floculación: 50rpm</li> <li>➤ Tiempo de floculación: 15min</li> <li>➤ Tiempo de sedimentación: 15min</li> </ul> |   |
| 3. Determinación del tiempo de mezcla rápida  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dosis de coagulante: La hallada en 1</li> <li>➤ Velocidad de floculación: 50rpm</li> <li>➤ Tiempo de floculación: 15min</li> <li>➤ Tiempo de sedimentación: 15min</li> </ul>                                      | Tiempos evaluados: 30, 60, 90, 120 segundos.      |
| 4. Determinación del tiempo de sedimentación  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dosis de coagulante: La hallada en 1</li> <li>➤ Velocidad de floculación: 50rpm</li> <li>➤ Tiempo de floculación: 15min</li> </ul>  | Tiempos evaluados: 3, 12, 20, 25min               |
| 5. Influencia del pH en la coagulación        | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dosis de coagulante: La hallada en 1</li> <li>➤ Velocidad de floculación: 50rpm</li> <li>➤ Tiempo de floculación: 15min</li> <li>➤ Tiempo de sedimentación: 15min</li> </ul>                                      | Rango empleado 4-8 unidades de pH                 |

Con estos parámetros, se harán las pruebas, los pasos a seguir son los siguientes:

- a. Se determina: el color, la turbiedad y el pH del agua cruda.
- b. Se llenan las jarras con el agua cruda y se añaden los coagulantes a cada una de ellas, Después de la adición del coagulante, las paletas de los agitadores deben estar girando a una velocidad de 100rpm, para asegurar una buena incorporación del coagulante en todo el líquido.
- c. Se dejan girar las paletas por 1min, después de la aplicación de los coagulantes, para garantizar buena mezcla.
- d. Después de este periodo se cambia la velocidad de las paletas a 50rpm durante 15min.
- e. Se suspende la agitación y se deja sedimentar el agua durante periodos entre 15 - 25min.
- f. Al final de este tiempo se extraerán aproximadamente 50ml de cada una de las muestras y se determinarán los parámetros: color, turbiedad residual y pH.
- g. Se tomará como dosis óptima aquella muestra que de los menores resultados de Turbiedad y Color.

## Anexo 5

### ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL COLOR UTILIZANDO STBS PARA TURBIEDAD BAJA

Análisis de la Varianza para Color final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente               | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|----------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis             | 127,5             | 3  | 42,5           | 15,61      | 0,0007  |
| B: color inicial     | 27,0              | 3  | 9,0            | 3,31       | 0,0713  |
| RESIDUOS             | 24,5              | 9  | 2,72222        |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)    | 179,0             | 15 |                |            |         |

## Anexo 6

### ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL COLOR UTILIZANDO STBS PARA TURBIEDAD ALTA

Análisis de la Varianza para Color final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente               | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|----------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis coagulante  | 438,687           | 3  | 146,229        | 4,66       | 0,0314  |
| B: Color inicial     | 126,688           | 3  | 42,2292        | 1,35       | 0,3201  |
| RESIDUOS             | 282,563           | 9  | 31,3958        |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)    | 847,938           | 15 |                |            |         |

## Anexo 7

### ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL COLOR UTILIZANDO STBL PARA TURBIEDAD BAJA

Análisis de la Varianza para Color final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente               | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|----------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis coagulante  | 466,687           | 3  | 155,562        | 17,60      | 0,0004  |
| B: color inicial     | 45,6875           | 3  | 15,2292        | 1,72       | 0,2316  |
| RESIDUOS             | 79,5625           | 9  | 8,84028        |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)    | 591,938           | 15 |                |            |         |

## Anexo 8

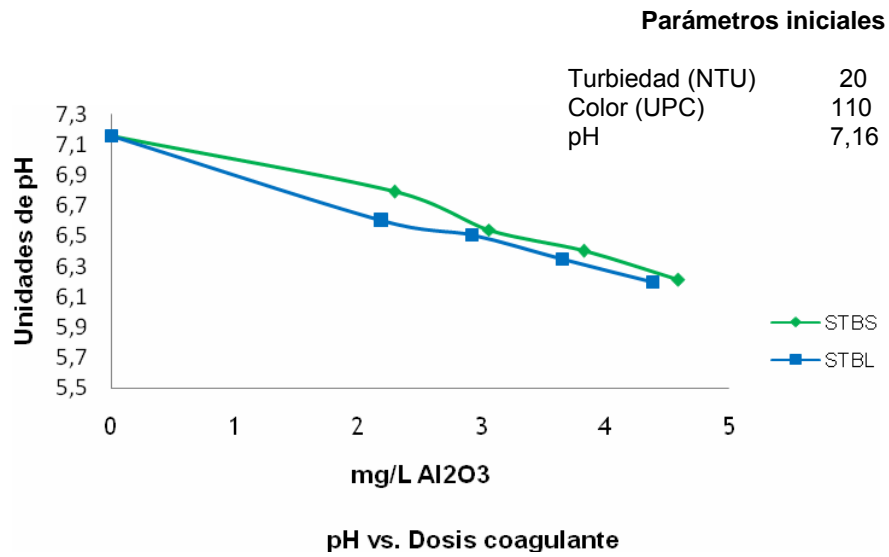
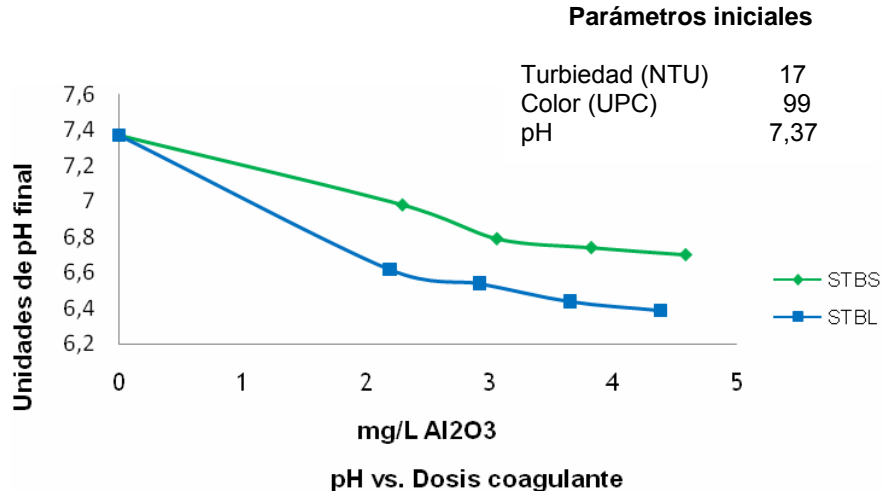
### ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL COLOR UTILIZANDO STBL PARA TURBIEDAD ALTA

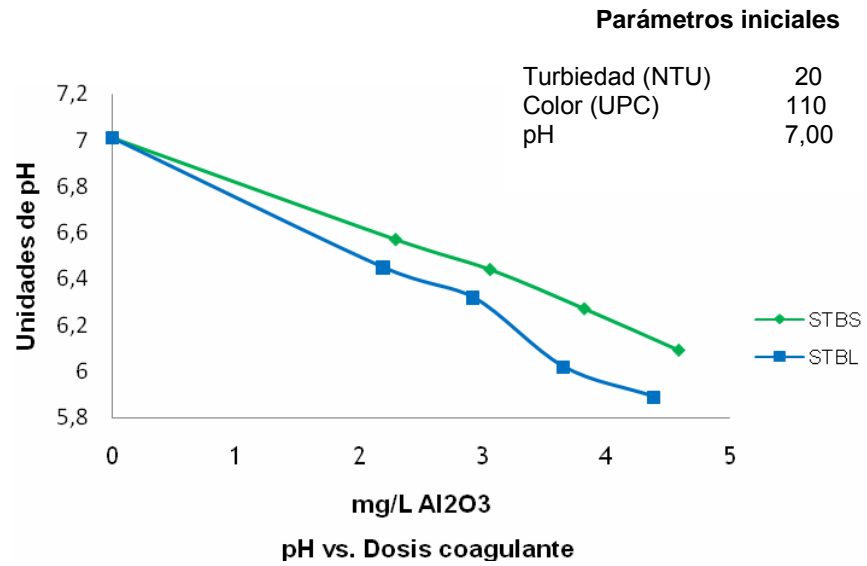
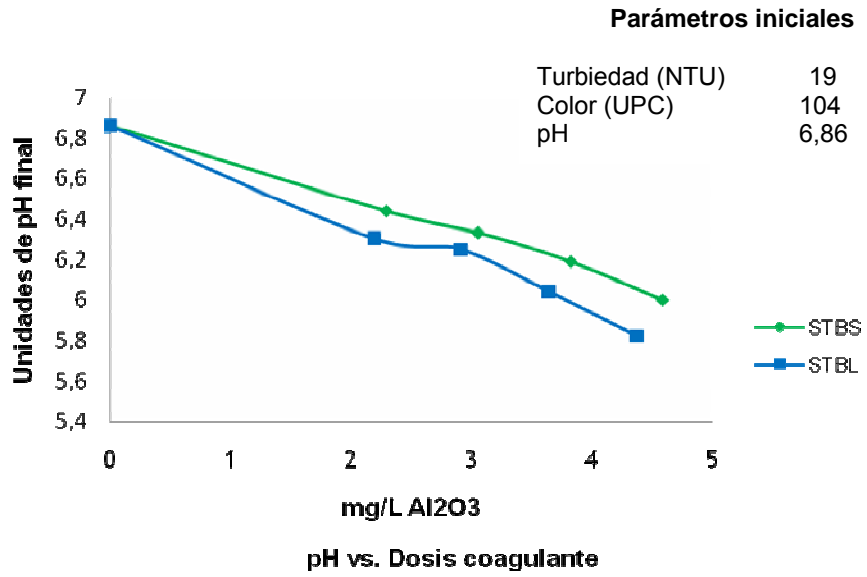
Análisis de la Varianza para Color final - Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente              | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|---------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| -----               |                   |    |                |            |         |
| EFECTOS PRINCIPALES |                   |    |                |            |         |
| A: Dosis coagulante | 465,25            | 3  | 155,083        | 18,43      | 0,0004  |
| B: Color inicial    | 6,75              | 3  | 2,25           | 0,27       | 0,8474  |
| RESIDUOS            | 75,75             | 9  | 8,41667        |            |         |
| -----               |                   |    |                |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)   | 547,75            | 15 |                |            |         |
| -----               |                   |    |                |            |         |

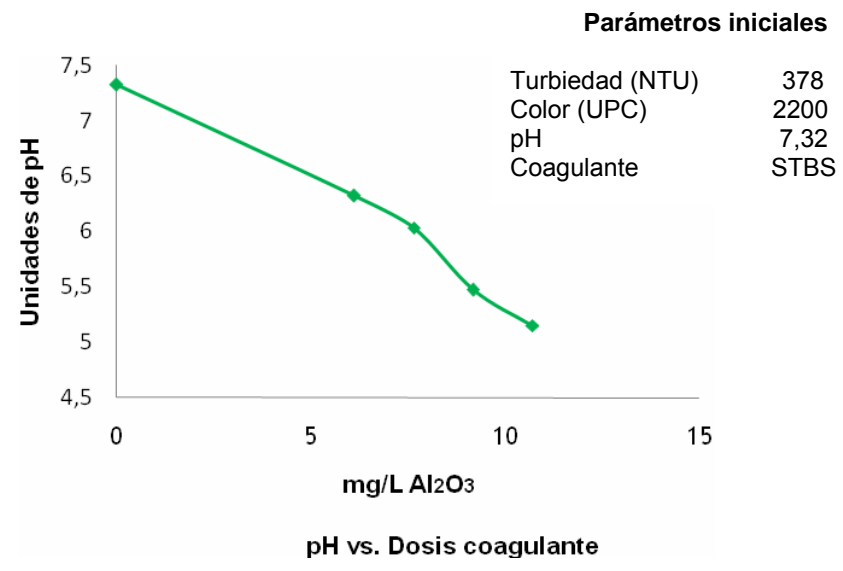
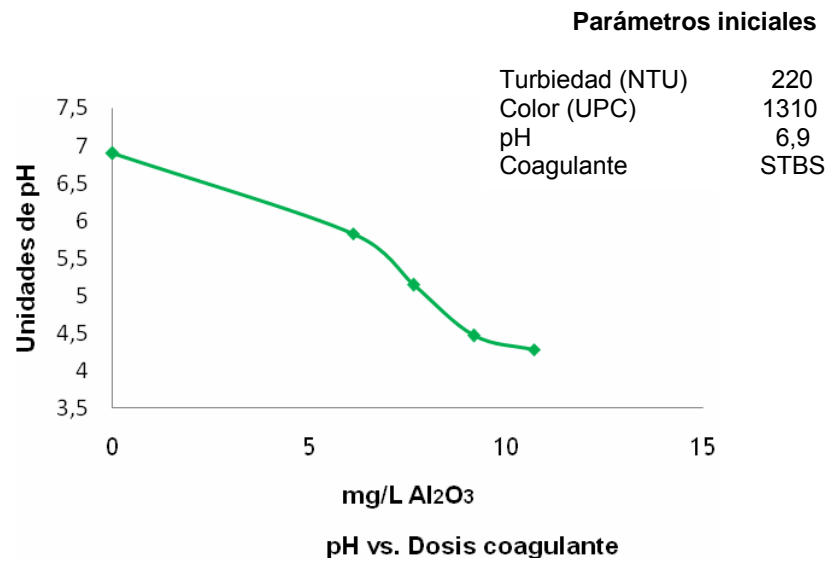
## Anexo 9

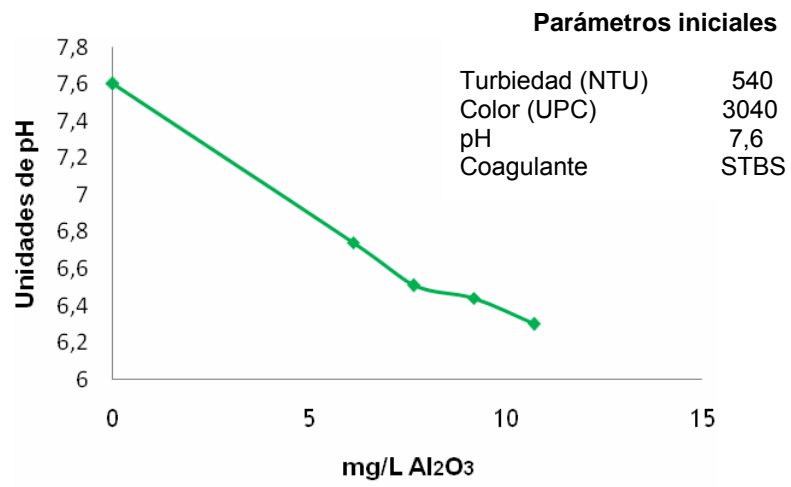
### INFLUENCIA DE LA DOSIS DE COAGULANTE EN EL pH FINAL PARA BAJA TURBIEDAD



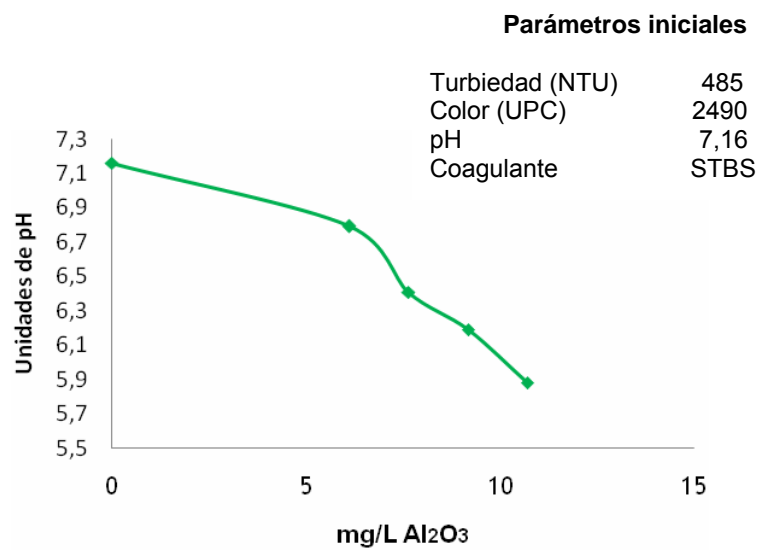


# INFLUENCIA DE LA DOSIS DE COAGULANTE EN EL pH FINAL PARA ALTA TURBIEDAD



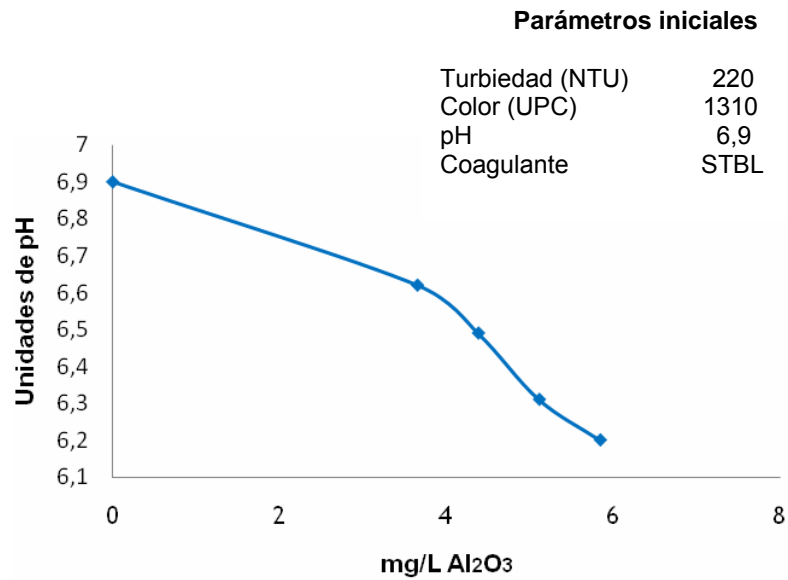


**pH vs. Dosis coagulante**

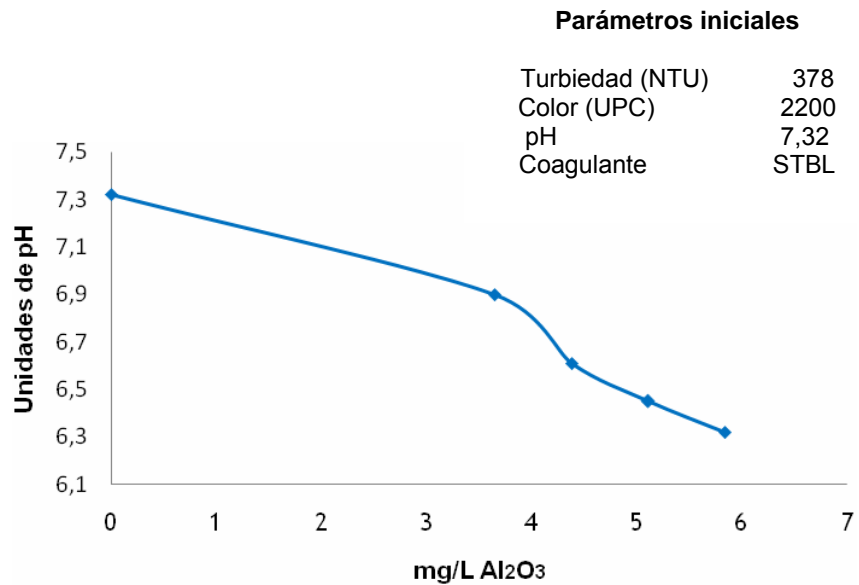


**pH vs. Dosis coagulante**

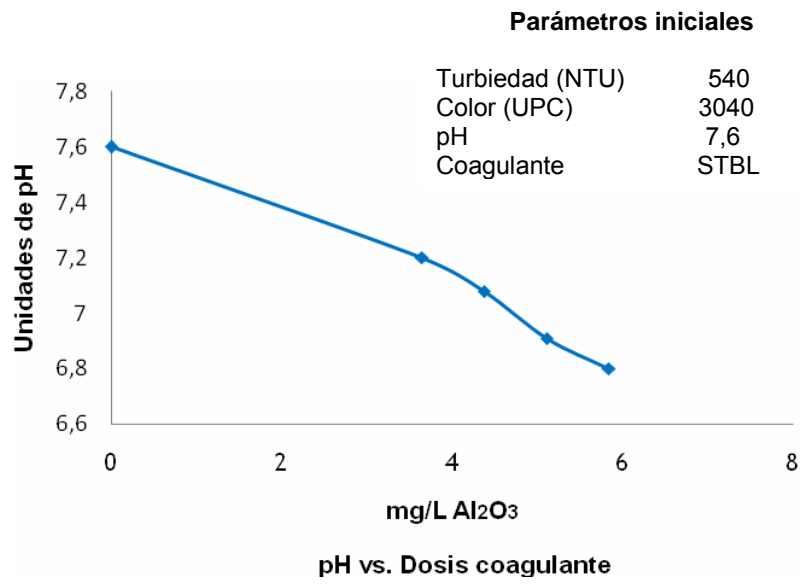
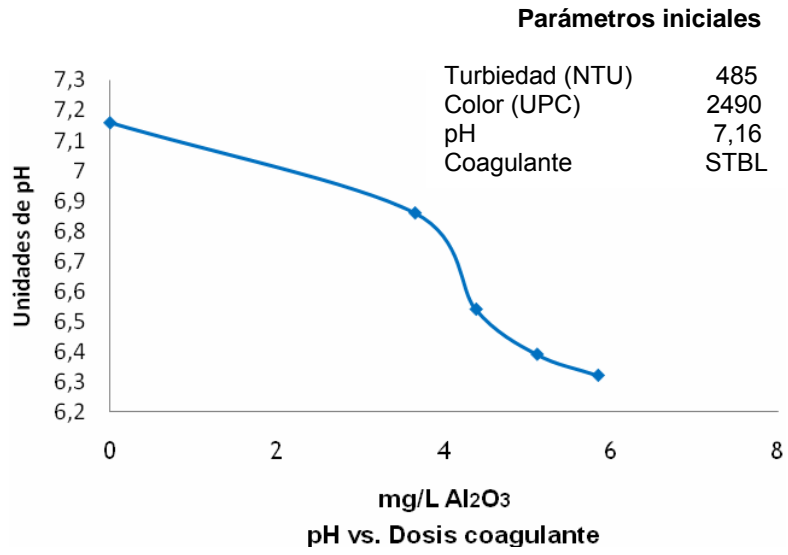
## INFLUENCIA DE LA DOSIS DE COAGULANTE EN EL pH FINAL PARA ALTA TURBIEDAD



pH vs. Dosis coagulante



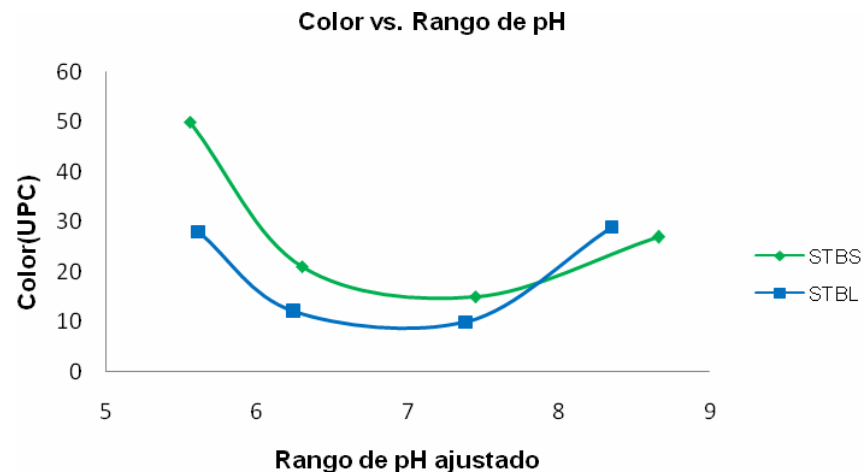
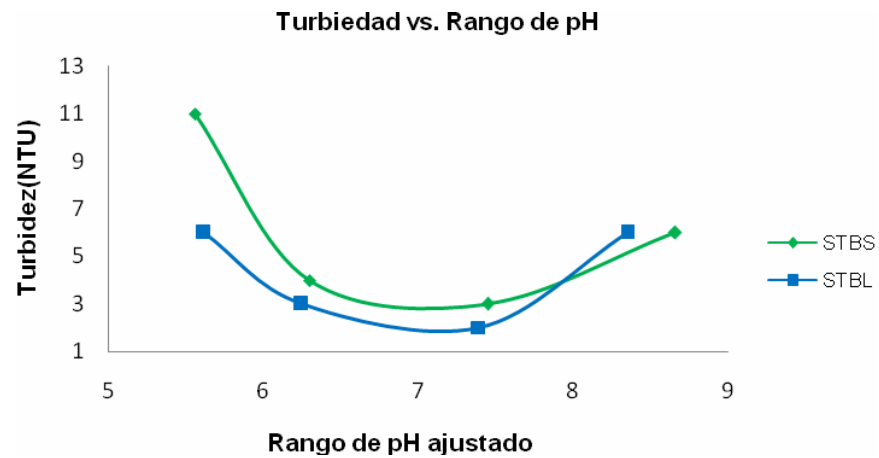
pH vs. Dosis coagulante



## Anexo 10

### INTERVALO DE pH ÓPTIMO

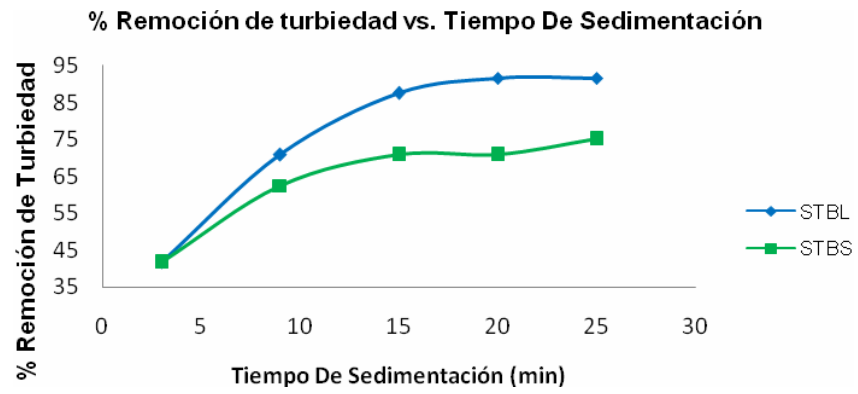
| Parámetros iniciales | Valor |
|----------------------|-------|
| Turbidez (NTU)       | 19    |
| Color (UPC)          | 104   |



| Coagulante | Rango de pH óptimo | Turbidez (NTU) | Color (UPC) | %Remoción Turbidez | %Remoción Color |
|------------|--------------------|----------------|-------------|--------------------|-----------------|
| STBS       | 6.8-7.5            | 3              | 15          | 84,21052632        | 85,57692308     |
| STBL       | 6.8-7.5            | 2              | 10          | 89,42105263        | 90,38461538     |

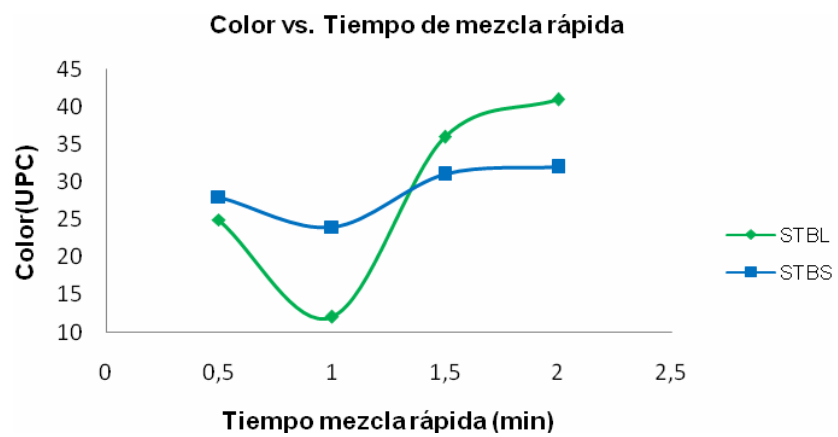
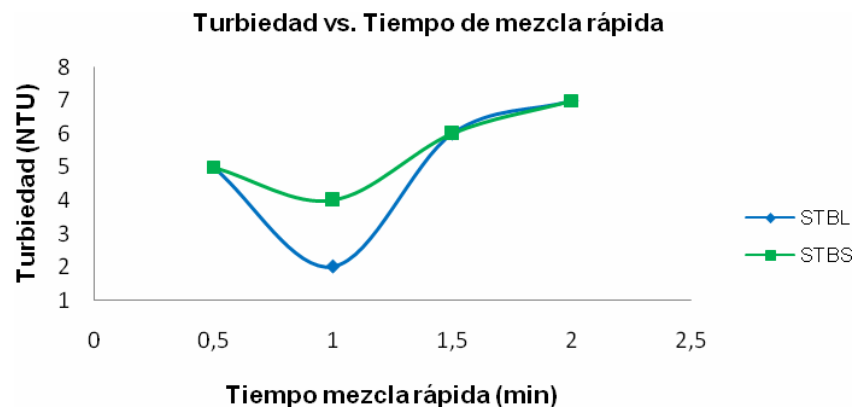
## Anexo 11

### TIEMPO ÓPTIMO DE SEDIMENTACIÓN



## Anexo 12

### TIEMPO ÓPTIMO DE MEZCLA RÁPIDA



### Anexo 13

## ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TIEMPO Y GRADIENTE DE FLOCULACIÓN UTILIZANDO LOS DOS COAGULANTES A TURBIEDAD BAJA

### Análisis de Varianza para la determinación de gradiente de floculación

Análisis de la Varianza para turbiedad final -Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente                      | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|-----------------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| <b>EFFECTOS PRINCIPALES</b> |                   |    |                |            |         |
| A: coagulante               | 7,5625            | 1  | 7,5625         | 9,92       | 0,0103  |
| B: rpm                      | 5,0625            | 1  | 5,0625         | 6,64       | 0,0276  |
| C: Tiempo floculación       | 51,1875           | 3  | 17,0625        | 22,38      | 0,0001  |
| RESIDUOS                    | 7,625             | 10 | 0,7625         |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)           | 71,4375           | 15 |                |            |         |

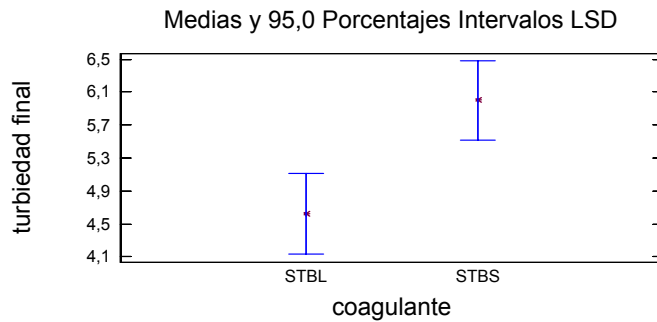


Gráfico de medias con el método LSD para determinar tipo de coagulante

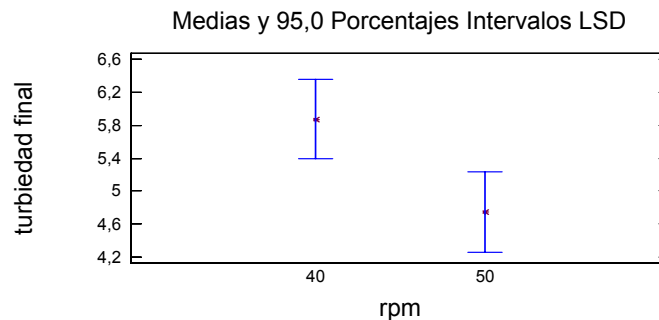


Gráfico de medias con el método LSD para determinar gradiente de agitación

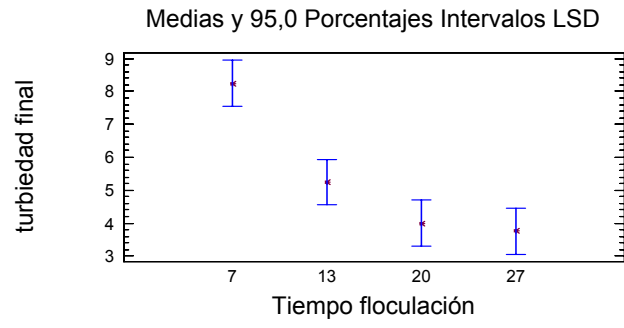


Gráfico de medias con el método LSD para determinar tiempo de floculación

## Anexo 14

### ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TIEMPO Y GRADIENTE DE FLOCULACIÓN UTILIZANDO LOS DOS COAGULANTES A TURBIEDAD ALTA

Análisis de la Varianza para turbiedad final- Sumas de Cuadrados de Tipo III

| Fuente                | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Cociente-F | P-Valor |
|-----------------------|-------------------|----|----------------|------------|---------|
| EFECTOS PRINCIPALES   |                   |    |                |            |         |
| A: coagulante         | 7,5625            | 1  | 7,5625         | 9,92       | 0,0103  |
| B: rpm                | 5,0625            | 1  | 5,0625         | 6,64       | 0,0276  |
| C: Tiempo floculación | 51,1875           | 3  | 17,0625        | 22,38      | 0,0001  |
| RESIDUOS              | 7,625             | 10 | 0,7625         |            |         |
| TOTAL (CORREGIDO)     | 71,4375           | 15 |                |            |         |

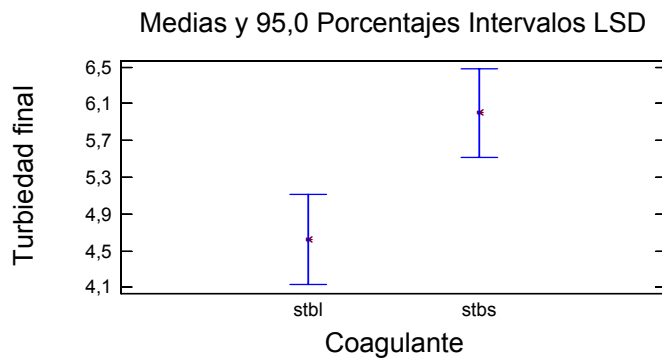


Gráfico de medias con el método LSD para determinar tipo de coagulante

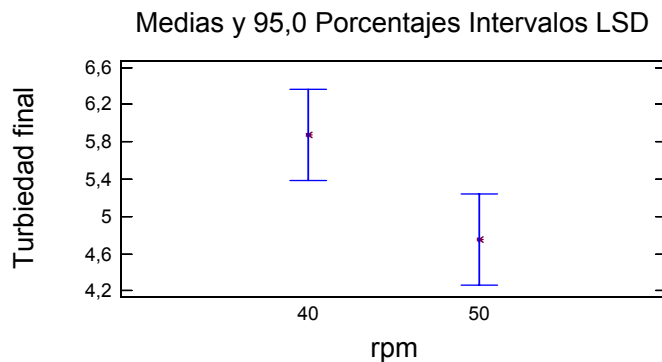


Gráfico de medias con el método LSD para determinar gradiente de agitación

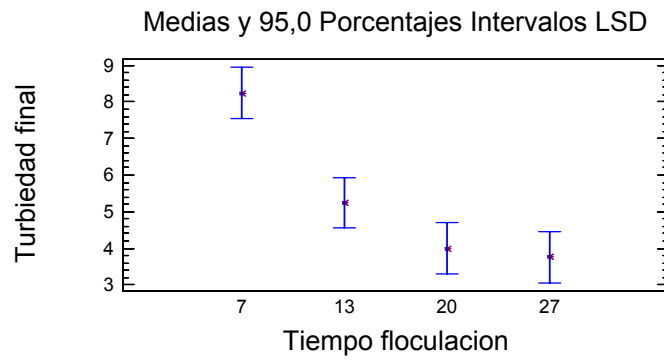
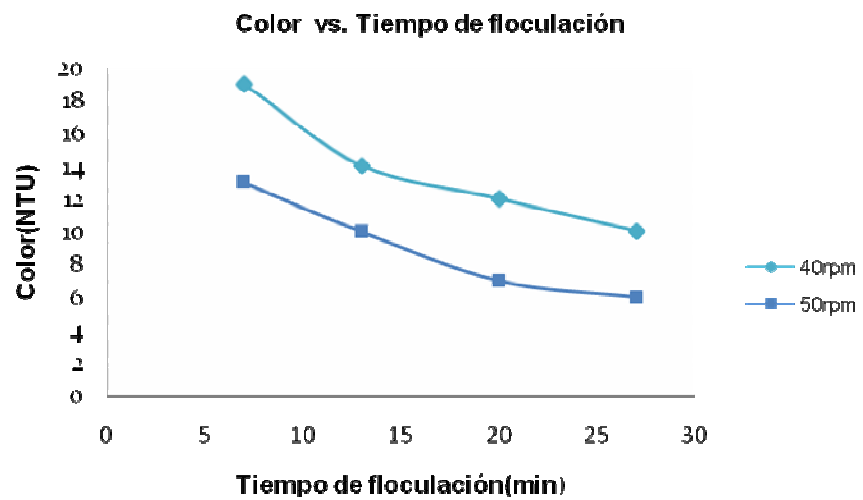
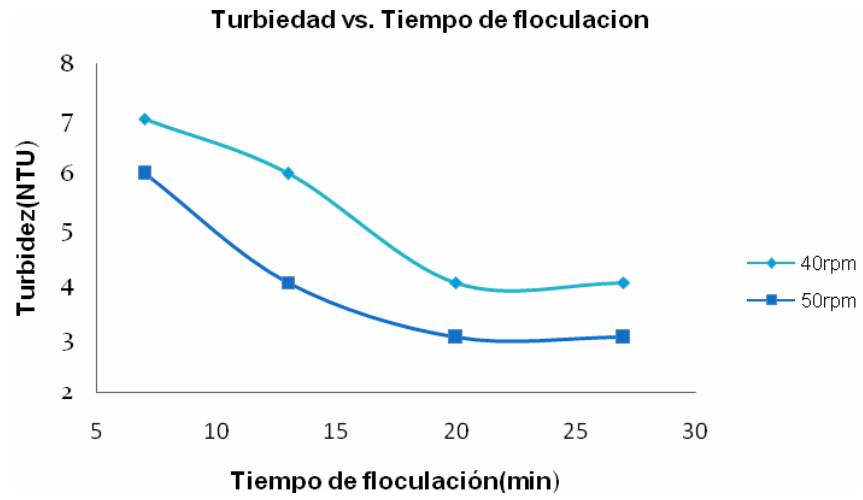


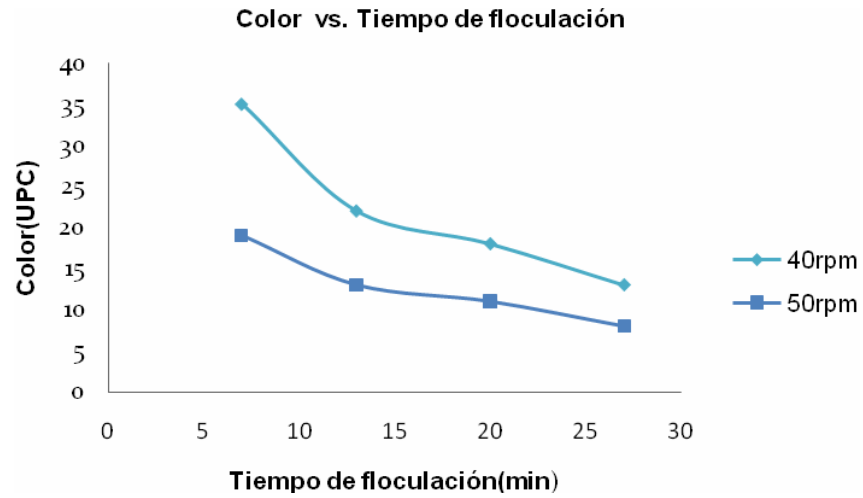
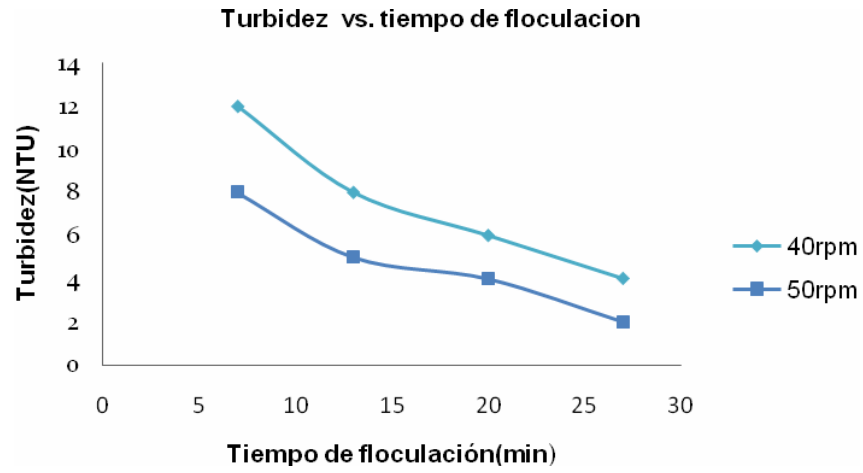
Gráfico de medias con el método LSD para determinar tiempo de floculación

## Anexo 15

### TIEMPO ÓPTIMO DE FLOCULACIÓN PARA STBL A TURBIEDAD BAJA



## TIEMPO ÓPTIMO DE FLOCULACIÓN PARA STBL A TURBIEDAD ALTA



## Anexo 16

### REPORTE DE RESULTADOS FISICOQUIMICOS PARA EL SULFATO DE ALUMINIO TIPO B, SOLIDO



**DEPARTAMENTO DE CONTROL CALIDAD AGUAS**

SOLICITUD No: 06-27-1F  
 FECHA: AGOSTO 15 DE 2006  
 SOLICITANTE: EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DE LEBRIJA  
 DIRECCION SOLICITANTE: Calle 11 # 8-73 Lebrija  
 NOMBRE DE LA MUESTRA: AGUA CRUDA  
 SITIO DE TOMA DE MUESTRA: ENTRADA PLANTA  
 MUESTRA TOMADA POR: NESTOR RICARDO SERRANO RINCON  
 FECHA DE TOMA DE MUESTRA: AGOSTO 09 DE 2006  
 FECHA DE RECEPCION: AGOSTO 09 DE 2006

**REPORTE DE RESULTADOS FISICOQUIMICOS**

| PARAMETRO     | NORMA   | RESULTADO | DECRETO 1594/84 | TECNICA         | UNIDADES               |
|---------------|---|-----------|-----------------|-----------------|------------------------|
| pH            | Standard Methods 4500-H <sup>+</sup> A, B, Ed. 19 | 7,11      | 5,0-9,0         | Potenciométrica | Unidades               |
| Color         | Norma Hach. Método 120.APHA                       | 238       | 75              | Fotométrica     | UPC                    |
| Turbiedad     | Standard Methods 2130 A,B Ed. 19                  | 37,0      | *               | Turbidimétrica  | NTU                    |
| Alcalinidad   | Standard Methods 2320 A,B Ed. 19                  | 18,54     | *               | Potenciométrica | mg/L CaCO <sub>3</sub> |
| Conductividad | Standard Methods 2510 A, B, Ed. 19                | 45        | *               | Conductimétrico | µmhos/cm               |
| Hierro        | Standard Methods 3500-Fe A, B, Ed. 19             | 1,99      | *               | Abs. Atómica    | mg/L Fe                |

F015 Rev.1 2004-07-27

"Estos resultados son válidos únicamente para la muestra analizada. Prohibida su reproducción sin la aprobación escrita del Departamento de Control Calidad Aguas. "

OBSERVACIONES: Ninguna

Revisó y Aprobó:

Pag. 1-1

  
 CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ  
 Jefe Dpto. de Control Calidad Aguas

**DEPARTAMENTO DE  
 CONTROL CALIDAD AGUAS**

SOLICITUD No: 06-27-2F  
 FECHA: AGOSTO 15 DE 2006  
 SOLICITANTE: EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DE LEBRIJA  
 DIRECCION SOLICITANTE: Calle 11 # 8-73 Lebrija  
 NOMBRE DE LA MUESTRA: AGUA TRATADA  
 SITIO DE TOMA DE MUESTRA: TANQUE DISTRIBUIDOR  
 MUESTRA TOMADA POR: NESTOR RICARDO SERRANO RINCON  
 FECHA DE TOMA DE MUESTRA: AGOSTO 09 DE 2006  
 FECHA DE RECEPCION: AGOSTO 09 DE 2006

**REPORTE DE RESULTADOS FISICOQUIMICOS**

| PARAMETRO     | NORMA   | RESULTADO | DECRETO<br>475/98 | TECNICA         | UNIDADES               |
|---------------|---|-----------|-------------------|-----------------|------------------------|
| pH            | Standard Methods 4500-H <sup>+</sup> A, B, Ed. 19               | 8,77      | 6,5 - 9,0         | Potenciométrica | Unidades               |
| Color         | Norma Hach. Método 120.APHA                                     | 13        | ≤ 15              | Fotométrica     | UPC                    |
| Turbiedad     | Standard Methods 2130 A,B Ed. 19                                | 3,1       | ≤ 5               | Turbidimétrica  | NTU                    |
| Alcalinidad   | Standard Methods 2320 A,B Ed. 19                                | 25,01     | 100               | Potenciométrica | mg/L CaCO <sub>3</sub> |
| Sulfatos      | Standard Methods 4500 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> A, E Ed. 19 | 8,13      | 150               | Turbidimétrica  | mg/L SO <sub>4</sub>   |
| Nitritos      | Standard Methods 4500-NO <sub>2</sub> A, B Ed. 19               | 0,004     | 0,1               | Colorimétrico   | mg/L NO <sub>2</sub>   |
| Aluminio      | Standard Methods 3500-Al A, D, Ed. 19                           | 0,33      | 0,2               | Eriocromo R     | mg/L Al                |
| Dureza total  | Standard Methods 2340 A, C, Ed. 19                              | 28,80     | 160               | Potenciométrica | mg/L CaCO <sub>3</sub> |
| Cloruros      | Standard Methods 4500-Cl A, C, D, Ed. 19                        | 4,97      | 250               | Potenciométrica | mg/L Cl                |
| Conductividad | Standard Methods 2540 A, B, Ed. 19                              | 85        | 50 - 1000         | Conductimétrico | μmhos/cm               |
| Hierro        | Standard Methods 3500-Fe A, B, Ed. 19                           | 0,20      | 0,30              | Abs. Atómica    | mg/L Fe                |

F015 Rev.1 2004-07-27

"Estos resultados son válidos únicamente para la muestra analizada. Prohibida su reproducción sin la aprobación escrita del Departamento de Control Calidad Aguas."

OBSERVACIONES: El Decreto 475/98 regula la calidad del agua tratada.

Revisó y Aprobó:

Pag. 1-1

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ  
 Jefe Dpto. de Control Calidad Aguas

# REPORTE DE RESULTADOS FISICOQUIMICOS PARA EL SULFATO DE ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO



**DEPARTAMENTO DE CONTROL CALIDAD AGUAS**

**SOLICITUD No:** 07-25-1F  
**FECHA:** JUNIO 4 DE 2007  
**SOLICITANTE:** EMPRESAS PUBLICAS DE LEBRIJA  
**DIRECCION SOLICITANTE:** MUNICIPIO DE LEBRIJA  
**NOMBRE DE LA MUESTRA:** AGUA CRUDA  
**SITIO DE TOMA DE MUESTRA:** ENTRADA PLANTA TRATAMIENTO  
**MUESTRA TOMADA POR:** ANA FERNANDA HUERTAS ROJAS  
**FECHA DE TOMA DE MUESTRA:** MAYO 24 DE 2007  
**FECHA DE RECEPCION:** MAYO 24 DE 2007

**REPORTE DE RESULTADOS FISICOQUIMICOS**

| PARAMETRO            | NORMA   | RESULTADO | DECRETO<br>1594/84 | TECNICA         | UNIDADES               |
|----------------------|---|-----------|--------------------|-----------------|------------------------|
| <b>pH</b>            | Standard Methods 4500-H <sup>+</sup> A, B, Ed. 19 | 6,58      | 5,0-9,0            | Potenciométrica | Unidades               |
| <b>Color</b>         | Norma Hach. Método 120, APHA                      | 315       | 75                 | Fotométrica     | UPC                    |
| <b>Turbiedad</b>     | Standard Methods 2130 A,B Ed. 19                  | 65,0      | *                  | Turbidimétrica  | NTU                    |
| <b>Alcalinidad</b>   | Standard Methods 2320 A,B Ed. 19                  | 30,4      | *                  | Potenciométrica | mg/L CaCO <sub>3</sub> |
| <b>Hierro</b>        | Standard Methods 3500-Fe A, B, Ed. 19             | 3,5       | *                  | Abs. Atómica    | mg/L Fe                |
| <b>Conductividad</b> | Standard Methods 2510 A, B, Ed. 19                | 62        | *                  | Conductimétrico | µmhos/cm               |

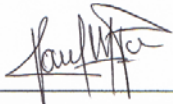
F015 Rev.1 2004-07-27

\*Estos resultados son válidos únicamente para la muestra analizada. Prohibida su reproducción sin la aprobación escrita del Departamento de Control Calidad Aguas.\*

OBSERVACIONES: NINGUNA

Revisó y Aprobó:

Pag. 1-1

  
**CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ**  
 Jefe Dpto. de Control Calidad Aguas

**DEPARTAMENTO DE  
 CONTROL CALIDAD AGUAS**

**SOLICITUD No:** 07-25-2F  
**FECHA:** JUNIO 4 DE 2007  
**SOLICITANTE:** EMPRESAS PUBLICAS DE LEBRIJA  
**DIRECCION SOLICITANTE:** MUNICIPIO DE LEBRIJA  
**NOMBRE DE LA MUESTRA:** AGUA TRATADA  
**SITIO DE TOMA DE MUESTRA:** TANQUE DE ALMACENAMIENTO  
**MUESTRA TOMADA POR:** ANA FERNANDA HUERTAS ROJAS  
**FECHA DE TOMA DE MUESTRA:** MAYO 24 DE 2007  
**FECHA DE RECEPCION:** MAYO 24 DE 2007

**REPORTE DE RESULTADOS FISICOQUIMICOS**

| PARAMETRO            | NORMA   | RESULTADO | DECRETO<br>475/98 | TECNICA         | UNIDADES               |
|----------------------|---|-----------|-------------------|-----------------|------------------------|
| <b>pH</b>            | Standard Methods 4500-H <sup>+</sup> A, B, Ed. 19               | 6,91      | 6,5 - 9,0         | Potenciométrica | Unidades               |
| <b>Color</b>         | Norma Hach. Método 120.APHA                                     | 14        | ≤ 15              | Fotométrica     | UPC                    |
| <b>Turbiedad</b>     | Standard Methods 2130 A,B Ed. 19                                | 2,6       | ≤ 5               | Turbidimétrica  | NTU                    |
| <b>Alcalinidad</b>   | Standard Methods 2320 A,B Ed. 19                                | 22,0      | 100               | Potenciométrica | mg/L CaCO <sub>3</sub> |
| <b>Aluminio</b>      | Standard Methods 3500-Al A, D, Ed. 19                           | 0,07      | 0,2               | Colorimétrico   | mg/L Al                |
| <b>Hierro</b>        | Standard Methods 3500-Fe A, B, Ed. 19                           | 0,30      | 0,30              | Abs. Atómica    | mg/L Fe                |
| <b>Sulfatos</b>      | Standard Methods 4500 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> A, F Ed. 19 | 6,1       | 150               | Turbidimétrica  | mg/L SO <sub>4</sub>   |
| <b>Nitritos</b>      | Standard Methods 4500-NO <sub>2</sub> A, B Ed. 19               | N.D       | 0,10              | Colorimétrico   | mg/L NO <sub>2</sub>   |
| <b>Dureza total</b>  | Standard Methods 2340 A, C, Ed. 19                              | 24,0      | 160               | Potenciométrica | mg/L CaCO <sub>3</sub> |
| <b>Cloruros</b>      | Standard Methods 4500-Cl- A, C, D, Ed. 19                       | 4,0       | 250               | Potenciométrica | mg/L Cl                |
| <b>Conductividad</b> | Standard Methods 2510 A, B, Ed. 19                              | 73        | 50 - 1000         | Conductimétrico | µmhos/cm               |

F015 Rev.1 2004-07-27

"Estos resultados son válidos únicamente para la muestra analizada. Prohibida su reproducción sin la aprobación escrita del Departamento de Control Calidad Aguas."

OBSERVACIONES: NINGUNA

Revisó y Aprobó:

Pag. 1-1

  
**CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ**  
 Jefe Dpto. de Control Calidad Aguas

## Anexo 17

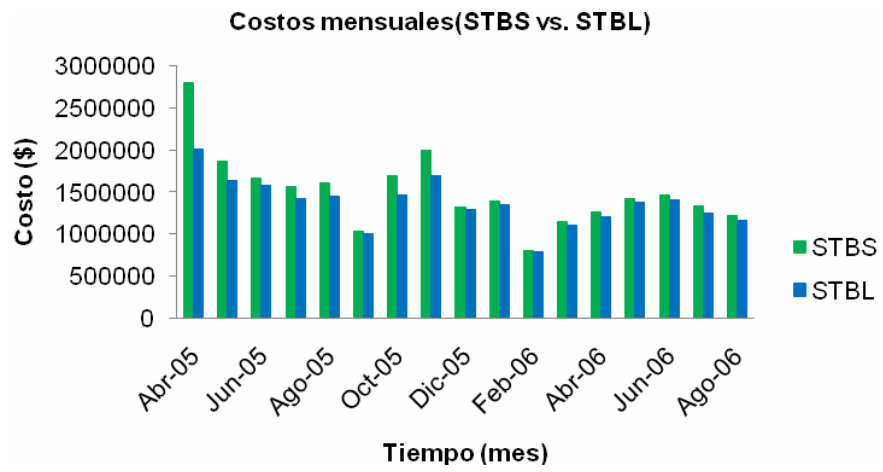
### COSTOS DE TRATAMIENTO DEBIDO AL CONSUMO DE COAGULANTE EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA

Costos mensuales para consumo de cada uno de los coagulantes

|               | STBS              | STBL               |
|---------------|-------------------|--------------------|
| <b>Mes</b>    | <b>Costo(\$)*</b> | <b>Costo(\$)**</b> |
| <b>Abr-05</b> | 2806040           | 2013354            |
| <b>May-05</b> | 1863621,2         | 1630115,52         |
| <b>Jun-05</b> | 1667882,8         | 1575103,68         |
| <b>Jul-05</b> | 1562485,2         | 1415316            |
| <b>Ago-05</b> | 1609024,4         | 1454486,88         |
| <b>Sep-05</b> | 1027284,4         | 1002908,16         |
| <b>Oct-05</b> | 1700734           | 1461140,64         |
| <b>Nov-05</b> | 1994341,6         | 1692045,6          |
| <b>Dic-05</b> | 1317470           | 1286208            |
| <b>Ene-06</b> | 1396176           | 1344950,4          |
| <b>Feb-06</b> | 808960,8          | 789765,12          |
| <b>Mar-06</b> | 1149792           | 1103327,04         |
| <b>Abr-06</b> | 1256558,4         | 1208645,76         |
| <b>May-06</b> | 1416708           | 1383091,2          |
| <b>Jun-06</b> | 1459140,8         | 1403344,8          |
| <b>Jul-06</b> | 1336633,2         | 1249723,68         |
| <b>Ago-06</b> | 1217547,6         | 1169655,84         |
| <b>TOTAL</b>  | <b>25590400,4</b> | <b>23183182,3</b>  |

\*Costos calculados con precios del 2007

\*\* Costos calculados con precios del 2007 para consumos predichos a partir de ensayos de laboratorio



## Anexo 18

### COSTOS DE INVERSION EN EL SISTEMA DE DOSIFICACION Y ALMACENAMIENTO DEL STBL

#### Instalaciones y Equipos

| Equipo                    | Capacidad                               | Costo        |
|---------------------------|---|--------------|
| Tanque en fibra de vidrio | 14 m <sup>3</sup>                       | \$15'000.000 |
| Accesorios                | Tuberías y codos                        | \$3'000.000  |
| Muro de contención        | Triturado, arena, cemento, mano de obra | \$4'000.000  |

#### Condiciones de operación para el Sulfato de aluminio B, Sólido

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| Caudal                  | 33L/s         |
| Cantidad consumida      | 2199,5 Kg/mes |
| Dosis óptima            | 25ppm         |
| Contenido de insolubles | 8% máx.       |

#### Condiciones de operación para el Sulfato de aluminio tipo B, líquido

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| Caudal                  | 33 L/s        |
| Cantidad consumida      | 3265,6 Kg/mes |
| Dosis óptima            | 40ppm         |
| Contenido de insolubles | 0.1% máx.     |

#### Costo directo de operación

|  |                |
|--|----------------|
| Costo mensual total con STBS                 | \$1'505.337,8  |
| Costo mensual total con STBL                 | \$1'363.714,6  |
| Costo anual de operación con Sulfato Sólido  | \$18'064053,6  |
| Costo anual de operación con Sulfato Líquido | \$16'364.574,7 |
| Total de inversión para STBL                 | \$22'000.000   |