

**VALORACION TÉCNICO – ECONÓMICA DEL PROCESO COAGULACION EN  
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE FLORIDABLANCA  
(ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P)**

**ANGELA MILENA PEREZ DITTA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**BUCARAMANGA**

**2015**

**VALORACION TÉCNICO – ECONÓMICA DEL PROCESO COAGULACION EN  
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE FLORIDABLANCA  
(ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P)**

**ANGELA MILENA PEREZ DITTA**

**Anteproyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de:  
INGENIERA AMBIENTAL**

**Director:**

**PhD. ALEXANDRA CERÓN VIVAS**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**BUCARAMANGA**

**2015**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bucaramanga,

## DEDICATORIA

La Gloria y la Honra siempre serán para Dios, revelación más alta que cualquier filosofía.

A mi Padre Enrique que en paz descanse, desde el cielo es el faro que ilumina mi camino y mi ángel de la guardia.

A mi madre Xiomara, por brindarme su constante apoyo y enseñarme a luchar por los objetivos de la vida.

A mi esposo Fernando Andrés, apoyo absoluto, cómplice de mis ilusiones y por su amor incondicional.

A mi hijo Enrique Andrés, eje fundamental de mi vida, mi razón de ser.

A mis hermanas Iveth, Durley y Johana, manos tendidas y solidarias en momentos difíciles.

A mis sobrinos, cariño que llenan nuestra familia de felicidad.

Ángela Milena Pérez Ditta.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios quien con el todo lo puedo.

A mi familia y a todas aquellas personas, por sus afectos y comprensiones durante todo este tiempo en que me mantuve ocupada en la elaboración del presente proyecto, y que siempre me dieron una voz de aliento para seguir adelante en la difícil tarea de hacer posible la realización de este sueño, como es la tesis de grado.

Con la colaboración incondicional de:

La doctora Alexandra Cerón, Directora de proyecto por su tiempo y orientación en la realización de este proyecto.

A todo el grupo de Docentes de la facultad de Ingeniera Ambiental, por el aporte de conocimientos que me brindaron durante toda la carrera.

Al personal administrativo y de los laboratorios de la facultad de Ingeniera Ambiental por su colaboración durante la ejecución del proyecto.

A la Ingeniera Yolanda Otero, jefe de la planta de Floridablanca por brindarme su confianza y la oportunidad de elaborar este proyecto.

Al personal de la planta de tratamiento de Floridablanca por su tiempo y colaboración.

A Francisco Angarita compañero de trabajo de laboratorio, por compartir sus conocimientos y colaboración durante la ejecución del proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INGENIERA AMBIENTAL .....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>17</b>
<b>3. MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 MARCO CONTEXTUAL .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 MARCO TEORICO .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.1 PROCESO DE COAGULACION .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.1.1 pH .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1.2 TURBIEDAD .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.1.3 COLOR .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.1.4 ALCALINIDAD .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.1.5 TEMPERATURA DEL AGUA.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.1.6 INTENSIDAD DE LA MEZCLA RÁPIDA.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.1.7 CONCENTRACIÓN DEL COAGULANTE .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2 TIPOS DE COAGULANTES.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2.1 LOS POLIELECTROLITOS.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2.2 COAGULANTES METALICOS .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.3 SISTEMA DE DOSIFICACION DE LOS COAGULANTES LIQUIDOS .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3.1 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN EN SOLUCIÓN POR GRAVEDAD.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3.2 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN EN SOLUCIÓN POR BOMBEO .....</b>	<b>32</b>

<b>3.2.4 MECANISMOS DE COAGULACION .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.4.1 COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN-NEUTRALIZACIÓN .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.4.2 COAGULACIÓN POR COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.4.3 COAGULACIÓN POR PUENTE QUIMICO .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.4.4 COAGULACIÓN POR INCORPORACIÓN O DE BARRIDO .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.4ESTRUCTURAS PARA LA MEZCLA RAPIDA .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.4.1 MEZCLADORES RAPIDOS MECANICOS .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.4.2. MEZCLADORES RAPIDOS HIDRAULICOS .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.5 PARAMETROS OPERACIONALES DE LA MEZCLA RAPIDA .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.6EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS DE MEZCLA RÁPIDA. ....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.7DIAGRAMAS DE COAGULACION .....</b>	<b>45</b>
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1. ETAPA 1: ELABORACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.1. COAGULACIÓN SIN AJUSTE DE PH – PRUEBA DE JARRAS. ....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2. COAGULACIÓN CON AJUSTE DE PH – PRUEBA DE JARRAS. ....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. ETAPA 2: EVALUACION TECNICA Y ECONOMICA DEL SISTEMA DE DOSIFICACION DEL PROCESO DE COAGULACION.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3. ETAPA 3: EVALUACION HIDRAULICA DE LA MEZCLA RAPIDA-CANALETA PARSHALL.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.1. PRUEBA DE TRAZADORES .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.2. VERIFICACIÓN DEL GRADIENTE Y TIEMPO DE MEZCLA DE LA CANALETA PARSHALL.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4 ETAPA 4: FORMULACION DE ALTERNATIVAS. ....</b>	<b>56</b>

<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1. ETAPA 1: DOSIS ÓPTIMAS DE COAGULANTES - DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN.....</b>	<b>57</b>
5.1.1. Dosificación con Sulfato de Aluminio Liquido Tipo B –Turbiedad Baja	57
5.1.2. Dosificación con Sulfato de Aluminio Liquido Tipo B –Turbiedad Alta.	59
5.1.3. Dosificación con PAC –Turbiedad Baja.....	62
5.1.4. Dosificación con PAC –Turbiedad Alta.....	64
<b>5.2. ETAPA 2: EVALUACION TECNICA-ECONOMICA DEL SISTEMA DE DOSIFICACION- COAGULACION.....</b>	<b>68</b>
5.2.1. Evaluación Técnica del Sistema de Dosificación. ....	68
5.2.2. Evaluación Económica del Sistema de Dosificación.....	72
<b>5.3. ETAPA 3: EVALUACION HIDRAULICA DE LA MEZCLA RAPIDA. ....</b>	<b>75</b>
5.3.1. Descripción de los Mezcladores de la PTAP de Floridablanca.....	75
5.3.2. Prueba de Trazadores- Canaleta Parshall.....	77
5.3.3. Verificación del Gradiente y Tiempo de Mezcla – Canaleta Parshall. ..	78
<b>5.4. ETAPA 4: ALTERNATIVAS.....</b>	<b>81</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Generalidades de la partícula .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2. Diferencias entre color y turbiedad .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4. Tipos de polímeros .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5. Ventajas y desventajas de los coagulantes .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Gradientes óptimos de mezcla.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7. Parámetros y equipos de medición.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 8. Concentración de los reactivos.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 9. Caudales utilizados prueba de trazador.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 10. Ecuaciones para verificación de gradiente de mezcla en canaleta Parshall.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 11. Características de las muestras de agua cruda .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 12. Parámetros iniciales muestra de agua cruda .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 13. Parámetros iniciales muestra de agua.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 14. Parámetros iniciales muestra de agua.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 15. Parámetros iniciales muestra de agua.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 16. Parámetros iniciales muestra de agua.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 17. Parámetros iniciales muestra de agua.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 22. Costo de SALB y PAC por kilogramos año 2014.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 23. Gasto de coagulante según presupuesto PTAP y evaluación económica .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 18. Resultados obtenidos prueba de trazadores.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 19. Caudales obtenidos de las ecuaciones.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 20. Verificación del funcionamiento de la canaleta Parshall .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 21. Tiempo de mezcla y gradiente de velocidad canaleta Parshall.....</i>	<i>80</i>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Dosificadores con orificios regulables</i> .....	30
<i>Figura 2. Dosificadores de orificio fijo</i> .....	31
<i>Figura 3. Dosificador proporcional</i> .....	32
<i>Figura 4. Bomba dosificadora de pistón</i> .....	33
<i>Figura 5. Bomba dosificadora de diafragma</i> .....	33
<i>Figura 6. Coagulación por adsorción</i> .....	34
<i>Figura 7. Fuerza de atracción y repulsión</i> .....	35
<i>Figura 8. Adsorción inicial con la dosis óptima del polímero</i> .....	36
<i>Figura 9. Formación del floculo</i> .....	36
<i>Figura 10. Adsorción secundaria de polímero</i> .....	37
<i>Figura 11. Adsorción inicial exceso de dosis del polímero</i> .....	37
<i>Figura 12. Ruptura del floculo</i> .....	37
<i>Figura 13. Adsorción secundaria de polímeros</i> .....	38
<i>Figura 14. Coagulación por Barrido</i> .....	38
<i>Figura 15. Mezcladores mecánicos</i> .....	40
<i>Figura 16. Mezcladores hidráulicos</i> .....	40
<i>Figura 17. Aplicación de trazadores</i> .....	44
<i>Figura 18. Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad</i> .....	46
<i>Figura 19. Dominios de remoción de color con presencia de turbiedad</i> .....	47
<i>Figura 21. Operación de la dosificación de coagulantes líquidos</i> .....	71
<i>Figura 20. Canaleta Parshall</i> .....	79

## LISTA DE GRAFICAS

<i>Grafica 1. Curva de calibración.....</i>	<i>53</i>
<i>Grafica 2. Diagrama de coagulación con turbiedad baja .....</i>	<i>58</i>
<i>Grafica 3. Diagrama de coagulación con color bajo.....</i>	<i>58</i>
<i>Grafica 4. Diagrama de coagulación con turbiedad alta .....</i>	<i>60</i>
<i>Grafica 5. Diagrama de coagulación con color alto.....</i>	<i>60</i>
<i>Grafica 6. Diagrama de coagulación con turbiedad + alta .....</i>	<i>61</i>
<i>Grafica 7. Diagrama de coagulación con color + alto .....</i>	<i>62</i>
<i>Grafica 8. Diagrama de coagulación con turbiedad baja .....</i>	<i>63</i>
<i>Grafica 9. Diagrama de coagulación con color bajo.....</i>	<i>63</i>
<i>Grafica 10. Diagrama de coagulación con turbiedad alta .....</i>	<i>65</i>
<i>Grafica 11. Diagrama de coagulación con color alto.....</i>	<i>65</i>
<i>Grafica 12. Diagrama de coagulación con turbiedad + alta .....</i>	<i>66</i>
<i>Grafica 13. Diagrama de coagulación con color + alto.....</i>	<i>67</i>
<i>Grafica 14. Dosis de coagulante SALB.....</i>	<i>73</i>
<i>Grafica 15. Dosis de coagulante PAC.....</i>	<i>73</i>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Localización PATP de Floridablanca .....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 2. Recolección y almacenamiento de agua cruda .....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 3. Prueba de jarras .....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 5. Prueba de trazadores en canaleta Parshall.....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 6. Tanques de almacenamiento .....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 7. Tanques aforadores.....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 8. Bombas dosificadoras de coagulantes .....</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 9. Flautas de aplicación del coagulante.....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 3. Retro mezclador sección antigua .....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 4. Canaleta Parshall sección de ampliación .....</i>	<i>76</i>

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1.....	90
ANEXO 2.....	93
ANEXO 3.....	96
ANEXO 4.....	99
ANEXO 5.....	102
ANEXO 6.....	105
ANEXO 7.....	108
ANEXO 8.....	109

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** VALORACION TÉCNICO-ECONÓMICA DEL PROCESO COAGULACION EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE FLORIDABLANCA (ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P)

**AUTOR(ES):** ANGELA MILENA PEREZ DITTA

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR(A):** ALEXANDRA CERÓN VIVAS

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar técnica y económicamente el sistema de coagulación y mezcla rápida de la planta de Floridablanca, este se llevó a cabo a partir de estudios experimentales, de una evaluación técnica y económica al estado actual que maneja la planta en cuanto a los coagulantes líquidos que se están empleando y las estructuras que trabajan para llevar a cabo este sistema de dosificación. El estudio experimental se realizó con el fin de obtener diagramas de coagulación y verificar el comportamiento de los coagulantes para aguas con características de turbiedad alta y baja, estos resultados se consiguieron por medio de pruebas de jarras empleando sulfato de aluminio líquido tipo B y policloruro de aluminio. Se realizó una prueba de trazadores con el fin de analizar el comportamiento hidráulico de la unidad de mezcla rápida de la sección de ampliación de la planta (Canaleta Parshall), verificando la ecuación de la canaleta, el gradiente y tiempo de mezcla. La evaluación técnica se enfocó en el almacenamiento, dosificación de los insumos químicos y localización de estos con el fin de verificar que cumplen con lo exigido según el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-2000. La evaluación económica busco estimar el valor comparativo de los costos de los dos coagulantes líquidos. Finalmente se sugirieron alternativas de mejora para optimizar el funcionamiento del Acueducto de Floridablanca.

### PALABRAS CLAVES:

Diagramas de Coagulación, Trazadores, Canaleta Parshall.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** TECHNICAL-ECONOMIC ASSESSMENT COAGULATION PROCESS VALUATION INSIDE OF THE DRINKING WATER TREATMENT PLANT IN FLORIDABLANCA (BUCARAMANGA METROPOLITAN AQUEDUCT S.A.E.S.P).

**AUTHOR(S):** ANGELA MILENA PEREZ DITTA

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR:** ALEXANDRA CERON VIVAS

### ABSTRACT

The present work has as principal objective which is to evaluate the coagulation system technically and economically as well as the Floridablanca rapid mixing plant. Everything has been possible through experimental studies, a technical and economic evaluation in the actual conditions managed by the plant concerning liquid coagulants used as well as the employed structures permitting this dosing system. The experimental study was performed in order to obtain coagulation diagrams and verify the high and low water coagulants turbidity feature behaviors, these results were achieved by jar tests using liquid aluminum sulphate B and aluminum polyvinyl. A tracer test was conducted in order to analyze the Unit Quick Mix section hydraulic behavior of the (Parshall gutter) plant expansion section verifying the equation of the chute, the gradient and the mixing time. The technical evaluation was focused on the storage, the chemical inputs dosing and their location in order to ensure they were complying with the requirements according to Technical Regulations for the sector of Water and Sanitation -2000. Economic evaluation sought to estimate the both coagulants liquids costs comparative value. Finally alternatives have been suggested for the betterment alternatives to optimize the aqueduct of Floridablanca operation.

### KEYWORDS:

Coagulation diagrams, tracer, Parshall gutter.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el creciente interés por el tema ambiental y la salud pública, han llevado a que los estándares internacionales de la calidad de agua sean más exigentes, lo que implica que se realicen seguimientos y nuevos estudios al comportamiento de las aguas en los procesos de potabilización.

La planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca está localizada en la zona Suroriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, en los barrios Bucarica y Caracolés del municipio de Floridablanca, a una altura media de 1042 msnm. Su construcción inicial se hizo entre los años 1970-1971; Esta planta está destinada a tratar aguas provenientes de las fuentes de la hoya del Río Frío, para abastecer la zona Sur del Área Metropolitana conjuntamente con la plantas Morrórico, La Flora y Bosconia, para constituir entre todas el sistema de tratamiento de agua del triángulo Bucaramanga-Florida-Girón. [1]

En la actualidad Floridablanca es uno de los municipios que se ha desarrollado con más rapidez en los últimos años, lo cual se refleja en un crecimiento de la población. En este sentido, la demanda de agua potable se incrementó, por lo cual el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga ha ajustado la planta de tratamiento de Floridablanca a las nuevas necesidades de la población, diseñando dos plantas: la antigua y la planta de ampliación. La planta antigua con floculación mecánica, sedimentación convencional y sedimentación de alta tasa; la de ampliación con floculación hidráulica y sedimentación de alta tasa.

La optimización de los procesos de tratamiento de la planta de tratamiento de agua potable, PTAP, de Floridablanca ha sido de vital importancia y objetivo para los diferentes actores como los académicos y empresarios, ya que de ella se provee uno de los municipios de mayor crecimiento en la región. Para afrontar los nuevos desafíos a los que se enfrentan las planta potabilizadoras de agua, la PTAP de Floridablanca se vio en la necesidad de ajustar su sistema de dosificación de coagulantes sólidos por líquidos, ya que estos brindan un mejor servicio de abastecimiento de agua y de mejor calidad sin posibles riesgos para la salud humana.

El presente proyecto tiene como finalidad obtener bases técnicas y económicas para optimizar el proceso de coagulación de la PTAP de Floridablanca. Esto se obtendrá por medio de la elaboración de pruebas a escala de laboratorio, para obtener una dosis óptima de los coagulantes líquidos. Se evaluó hidráulicamente la unidad de mezcla rápida para verificar su correcto funcionamiento y se valoró el manejo de los coagulantes líquidos para plantear alternativas que generen una mejora en esta etapa del proceso de potabilización.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Valorar técnica y económicamente el proceso de coagulación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Floridablanca (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.)

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el punto óptimo de la coagulación en la planta de tratamiento de agua potable, mediante la construcción de diagramas de coagulación.
- Evaluar hidráulicamente las estructuras utilizadas para la mezcla rápida, el gradiente, el tiempo en condiciones de operación de la planta.
- Evaluar técnica y económicamente el sistema de dosificación del proceso de coagulación para la P.T.A.P. de Floridablanca.
- Formular alternativas de mejora para el adecuado funcionamiento de la mezcla rápida de la P.T.A.P. De Floridablanca

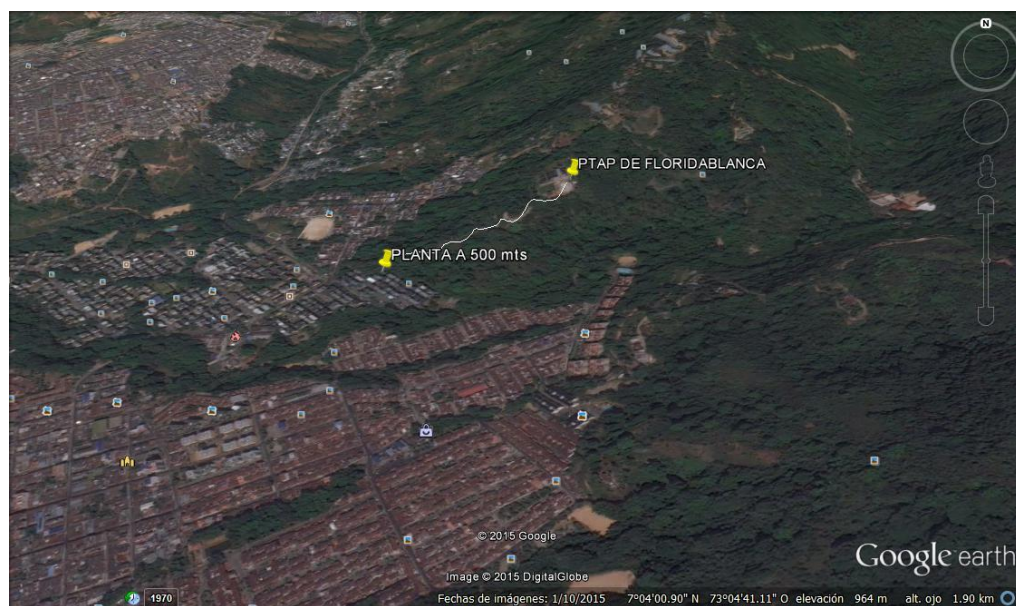
### 3. MARCO REFERENCIAL

#### 3.1 MARCO CONTEXTUAL

La planta de Floridablanca se localiza en la zona sur-oriental del Área metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta del Barrio Caracolí del municipio de Floridablanca, a una altura media de 1042 msnm.

La planta se construyó alrededor de los años 1970 - 1971 y fue ampliada y diseñada en los años 1982 – 1983 para captar el agua proveniente del Rio Frio, que es captado aguas arriba de la antigua cervecería Clausen y con una corta conducción entrega a la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Floridablanca.

*Ilustración 1. Localización PATP de Floridablanca*



**Fuente.** Autor

En la planta, la capacidad máxima de tratamiento de agua para potabilización es de 620 l/s, para esto el sistema se compone de dos secciones:

**Sección 1:** Planta original o antigua optimizada de tipo convencional.

**Sección 2:** Planta de ampliación o nueva de tipo convencional.

La planta utiliza una serie de procesos encadenados que dependen de las características del agua a tratar, la secuencia del mismo es el siguiente.

## **Captación y Conducción**

La captación es una estructura construida en la fuente de suministro para derivar el caudal necesario a la planta. Una vez captada el agua, es sometida a un proceso de retención de arenas y sólidos mediante la decantación que se lleva a cabo en los desarenadores. Continúa a esto, se transporta el agua hasta la planta de tratamiento por medio de canales y tubos de aducción. [17]

El agua del Rio Frio se conduce para el acueducto con una aducción conformada por dos tuberías, una de 14" y otra de 16" AC de diámetro, que entrega a la Planta de Floridablanca.

## **Coagulación y Floculación**

Mediante este proceso, se facilita la agrupación de las partículas responsables del color y la turbidez del agua. La planta de Floridablanca cuenta con dos sistemas de coagulación y dos sistemas de floculación. La coagulación y floculación para la planta antigua es a través de un Retromezclador hidráulico y floculación mecánica, mientras que para la planta de ampliación se trabaja en una canaleta Parshall y floculación hidráulica.

El proceso de coagulación se da mediante la aplicación al agua del insumo químico con el objetivo de desestabilizar las partículas que dan la turbiedad y el color, simulando una mezcla rápida con el coagulante suministrado mediante flautas dosificadoras.

Continuo a este proceso la floculación es la mezcla lenta donde se incrementa la posibilidad de choque entre las partículas presentes en el agua, dándose aglutinación de las más pequeñas formando otras de mayor tamaño (floculos), que a su vez son lo suficientemente grandes y pesadas como para sedimentar.

## **Sedimentación**

Con el agua casi en reposo y a través de la acción de la gravedad, se depositan en el fondo las partículas y agrupaciones formadas en el proceso anterior, formando un fango que se extrae posteriormente. [16]

En la sección antigua de la planta existen cuatro unidades de sedimentación de flujo horizontal, localizadas al lado del floculador y para la sección de ampliación existe un sedimentador de alta velocidad el cual tiene una unidad con dos compartimientos. [20]

## **Filtración**

Realizadas las operaciones anteriores se continúa con la retención de las partículas que no pudieron ser extraídas en el proceso anterior haciendo pasar el agua por unos filtros o medio poroso (compuesto por antracita y arena). [19]

El sistema de filtración de la PTAP de Floridablanca está compuesto por una batería de seis filtros rápidos, localizados en la galería de filtración, entre las dos secciones de filtración. En la sección antigua de la planta se encuentran cuatro filtros de sección cuadrada de 5,49 m por 5,49 m cada uno y área filtrante de 30,14 m<sup>2</sup>. Para la sección de ampliación se hayen dos filtros de 6,3 m de longitud y 5,4 m de ancho cada uno y un área filtrante de 34,02 m<sup>2</sup>. [19, 21]

### **Neutralización**

Se refiere al ajuste de la acidez del agua mediante reactivos químicos para evitar que corroa las tuberías. En la planta de Floridablanca, se utiliza lechada de cal, la cual es preparada en el mezclador de cal, pasa por una tubería al dosificador, suministrando la dosis requerida y la envía al punto de aplicación. [21]

### **Desinfección**

El agua que ha pasado por los filtros se lleva la desinfección donde se adiciona la cantidad de cloro gaseoso necesario para destruir los microorganismos que puedan estar presentes.

Finalmente, el agua a ser tratada sale de la planta y se almacena en grandes tanques con el fin de regular la presión y así distribuirla.

## **3.2 MARCO TEORICO**

### **3.2.1 PROCESO DE COAGULACION**

La coagulación o mezcla rápida es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales, las cuales son las encargadas de darle al agua cruda el color y la turbiedad característica. Este proceso se aplica con el fin de: remover turbiedad orgánica o inorgánica que no se pueda sedimentar rápidamente, remover color verdadero y aparente, y eliminar bacterias, virus y organismos patógenos, destruir algas y plancton en general, eliminar sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos en otros. [25]

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sustancias químicas. Este proceso es el resultado de dos fenómenos.

- El primero esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. [8]

Del proceso de coagulación depende la eficiencia de todo el sistema de tratamiento de agua potable, ya que si la coagulación es defectuosa, la eficiencia final del sistema es baja. En la coagulación se debe tener en cuenta una buena dosificación y mezcla rápida del tanque, esta debe ser constante y la sustancia química debe distribuirse de manera uniforme.

Para la evaluación del proceso de coagulación son importantes los diferentes factores que influyen en la optimización de este proceso que hace parte de la potabilización del agua.

### 3.2.1.1 pH

Es una forma de expresar la concentración de iones Hidrogeno [H+] o más exactamente de su actividad.

$$pH = -\log[H^+] \quad pH = \log \frac{1}{[H^+]} \quad \text{Ecuación 1}$$

El pH es una medida de carácter universal que indica la condición acida o alcalina del agua. El pH se ha establecido con base en la constante de ionización del agua. Si el pH está comprendido entre 0 y 7 el agua tiene una condición acida. Si el pH está comprendido entre 7 y 14, el agua posee un carácter alcalino. [2]

La amplitud de la escala de pH en la coagulación está influenciada por [8]:

- El tipo de coagulante empleado
- La composición química del agua
- La dosis del coagulante

Los coagulantes metálicos (sales de aluminio y hierro) presentan su zona óptima tras los valores de pH que hacen mínima la solubilidad de los productos de hidrolisis.

El pH es un factor crítico en los procesos como la coagulación, ya que hay un intervalo de pH en el que un coagulante específico hace que se obtengan mejores resultados y mayor eficiencia del este proceso.

Se presentan zonas óptimas del proceso de coagulación tras los valores de pH, para los coagulantes metálicos como son las sales de aluminio en rangos de pH 6.5 a 8.0 y las sales de hierro en pH de 5.5 a 8.5 unidades, haciendo mínima la solubilidad de los productos de hidrólisis. [5]

### 3.2.1.2 TURBIEDAD

La turbiedad es la propiedad óptica que tiene una sustancia líquida o sólida, de dispersar en todas las direcciones la luz que pasa por ella. La turbiedad está formada por arcillas en dispersión, se refiere a tierra fina (0.002 mm de grano o menos), a veces coloreada, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua. [5]

El tamaño de la partícula incide en la turbiedad, por la dificultad para sedimentar que presentan las partículas muy pequeñas especialmente los coloides, lo que se ilustra en la siguiente tabla 1: [6]

**Tabla 1.** Generalidades de la partícula

<b>Diámetro de Partícula (mm)</b>	<b>Escala de Tamaño</b>	<b>Área Superficial</b>	<b>Tiempo de Sedimentación</b>
10	Grava	3.15 cm <sup>2</sup>	0.3 s
1	Arena Fina	31.50 cm <sup>2</sup>	3 s
0.1	Arena Gruesa	315.0 cm <sup>2</sup>	38 s
0.01	Sedimento	3150.00 cm <sup>2</sup>	33 min
0.001	Bacteria	3.15 m <sup>2</sup>	55 h
0.0001	Partícula Coloidal	31.50 m <sup>2</sup>	230 días
0.00001	Partícula Coloidal	0.83 Ha	6.3 años
0.000001	Partícula Coloidal	2.83 Ha	63 años

**Fuente.** A. Londoño Carvajal [6]

El sistema de medición continua de turbiedad por falta de transparencia del agua debido a la presencia de partículas extrañas, se realiza mediante un turbidímetro nefelómetro. Las unidades utilizadas son, por lo general, unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). La remoción de turbiedad no es un proceso difícil, sin embargo no siempre se utiliza este equipo en todas las ocasiones. Cuando se tienen concentraciones medias de sólidos se utilizan equipos como son los analizadores ópticos y cuando se trata de evaluar valores pequeños de turbiedad se da uso a los turbidímetros de diseminación.

Los estándares internos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) establecen que las aguas de consumo humano deben tener preferentemente 1 UNT y en ningún caso más de 5 UNT. Las guías de calidad para agua de bebida del Canadá y las Guías de calidad para aguas de consumo humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan como valor guía 5 UNT. La OMS indica, sin embargo, que para una desinfección eficiente, el agua filtrada debería tener una turbiedad promedio menor o igual a 1 UNT. [8]

Según la Resolución 2115 de 2007, en Colombia se debe cumplir en todo el territorio nacional en la red de distribución de los sistemas de acueducto, que el agua para consumo humano tenga un valor máximo admisible de turbiedad menor o igual a 2 UNT. [26]

El proceso de la remoción de la turbiedad es fácil y eficiente para la purificación del agua, pero de alguna manera este afecta los costos de producción de una planta de tratamiento de agua potable, ya que requiere el uso de los coagulantes, producto que es relativamente costoso y que debe ser aplicado en cantidades determinadas.

### **3.2.1.3 COLOR**

Se dice que el color de una agua es debido a la descomposición de materia orgánica que contienen los suelos; esto depende de una gran variedad de compuestos orgánicos como las sustancias húmicas que son de masa molecular variada de 800 a 50000 gr/mol. El color se mide en mg/L de Pt/Co. La intensidad del color es proporcional al platino. El Cobalto forma el complejo que permite medir el color. [9]

Se distinguen dos formas de expresar el color:

Color Aparente es el valor que resulta de medir el color sin remover la turbiedad, es decir, que se mide el color debido a sustancia en solución y en suspensión.

Color Verdadero o Color Real, es debido a sustancias en solución. Se mide después de retirar la turbiedad por centrifugación, es decir, después de retirar las sustancias suspendidas. [8]

Existe una relación entre el color y el pH, y una diferencia entre turbiedad y pH. El primero según lo describe Black y Christman [5], es el hecho de que el color presenta un “efecto indicador”, debido a que la intensidad de color cambia con el pH, es decir, al subir el pH se incrementa el color, pero el mayor incremento se obtiene con aguas que tienen originalmente un color bajo. El segundo es que tienen características bastante diferentes, no solo el fenómeno óptico se percibe

de forma distinta, sino que sus características físicas y químicas difieren grandemente como se puede ver en la tabla 2:

**Tabla 2.** Diferencias entre color y turbiedad

Ítem	Color	Turbiedad
Composición Física	Sustancias disueltas parcialmente coloidales	Arcillas coloidales
Composición Química	Ácidos Orgánicos con pesos moleculares entre 200 y 50.000 o más	Cristales de Silicatos
Origen	Orgánico	Mineral
Tamaño de la Dispersión	87% < 0.01 $\mu$	Entre 0.1 y 10 $\mu$
Intensidad	Aumenta con el pH	No varía con el pH
Comportamiento Químico	Se Comportan Preferentemente con Sustancias Disueltas	Se comportan únicamente como suspensiones coloidales

Fuente. J. Arboleda Valencia [5]

### 3.2.1.4 ALCALINIDAD

En general la alcalinidad es la capacidad del agua de neutralizar ácidos. No obstante, aniones de ácidos débiles (bicarbonatos, carbonatos, hidróxido, sulfuro, bisulfuro, silicato y fosfato), llegan a formar sales que contribuyen a la alcalinidad.

En el proceso de coagulación, la alcalinidad influye directamente, ya que reacciona con coagulantes hidrolizables (sales de hierro y aluminio) [8]. La alcalinidad y el pH tienen una relación directa, ya que las aguas con alcalinidad alta, pueden necesitar un mayor nivel de dosificación de coagulante para lograr el descenso de pH, y cuando la alcalinidad es baja la hidrólisis de aluminio en solución y la formación de AL (OH<sub>3</sub>), pueden reducir el pH [10].

Según Y. Andía Cárdenas [9]. Se clasifica el tipo de coagulación presente en el agua dependiendo a la concentración de coloides y la alcalinidad del agua.

**Tabla 3.** Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación

Tipo de Agua	Tipo de Coagulación	Requerimiento
1. Baja Concentración de Coloides, Alta Alcalinidad.	Formación de Precipitado Floc de Barrido	Alta Dosis de Coagulantes Adición de Alcalinidad o Partículas o Ambas.

2. Baja Concentración de Coloides, Alta Alcalinidad.	Formación de Precipitado Floc de Barrido	Alta Dosis de Coagulantes Adición de Partículas
3. Alta Concentración de Coloides, Baja Alcalinidad.	Adsorción de polímeros Metálicos Positivos, en la Superficie de los Coloides. (pH 4 a 7)	Dosis de Coagulantes Incrementan con Concentración de Partículas, Adición de Alcalinidad.
4. Alta Concentración de Coloides, Alta Alcalinidad	Adsorción de polímeros Metálicos Positivos y Precipitaciones de Hidróxidos (pH >7)	Dosis de Coagulantes Incrementan con Concentración de Partículas.

Fuente. Y. Andía Cárdenas [9]

### 3.2.1.5 TEMPERATURA DEL AGUA

La temperatura es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, ya que en general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla como es el de la coagulación. [8]

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente la coagulación. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc [6].

### 3.2.1.6 INTENSIDAD DE LA MEZCLA RÁPIDA

Según algunos estudios, la adecuación de este parámetro es de especial importancia en la mezcla rápida e influye dependiendo del mecanismo de coagulación: [8]

- Cuando predomina la adsorción- neutralización de cargas, el coagulante debe dispersarse en forma instantánea en toda la masa de agua antes que la hidrólisis del coagulante se complete, más aun, cuando se emplean coagulantes inorgánicos como las sales de aluminio o de hierro, por lo que si la unidad no produce un gradiente de velocidad apropiado en un tiempo de retención instantáneo, no se habrá logrado una desestabilización completa.

- Con Coagulación de barrido, solo es necesaria una dispersión homogénea, los tiempos de retención pueden ser mayores (1-7 seg) y el gradiente de velocidad no influye en la eficiencia.

### **3.2.1.7 CONCENTRACIÓN DEL COAGULANTE**

Varios estudios han demostrado que la concentración del coagulante influye en la eficiencia de la mezcla rápida, lo que modifica los resultados del proceso de coagulación [8].

Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escasa, por lo tanto la turbiedad residual es elevada. Por otra parte, alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, aumentando la turbiedad del agua en comparación con la inicial [9].

## **3.2.2 TIPOS DE COAGULANTES**

Los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos; ambos actúan como polímeros.

### **3.2.2.1 LOS POLIELECTROLITOS**

Son sustancias formadas por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeros, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica [5].

De la investigación de Robert B. Taft [5], se desprenden las siguientes conclusiones prácticas de los polielectrolitos:

- Son usados en unión de coagulantes metálicos comunes, producen un floc que sedimenta rápido.
- En ciertas aguas, la dosis de polielectrolitos reducen el gasto de coagulante en pequeñas cantidades.
- Las algas son rápidamente coaguladas por polielectrolitos catiónicos.
- No todos los polielectrolitos son efectivos en todas las aguas.

- Altas dosis de polielectrolitos producen dispersión, en lugar de ayudar a la coagulación los polielectrolitos deben añadirse en forma de solución diluida para asegurar una completa mezcla.

Los polímeros de gran importancia se clasifican según la tabla 4:

**Tabla 4.** Tipos de polímeros

Según su Origen	Según su Carga	Definición
Polímeros Naturales	Iónicos	Son los que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como las proteínas, carbohidratos y polisacáridos (almidón, glucósidos).
Polímeros Sintéticos	No Iónicos	Son compuestos orgánicos producidos por medio de la transformación química de derivados del carbón y del petróleo. Se encuentran en forma de polvo seco y otros son líquidos con concentraciones del 10% al 60 % de polímeros activos.

Fuente. J. Arboleda Valencia [5]

### 3.2.2.2 COAGULANTES METALICOS

Existe una variedad de coagulantes metálicos, siendo los más utilizados las sales de Aluminio y de Hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados [9].

#### - Sales de Aluminio

Las sales de aluminio forman un floc ligeramente pesado. Las más conocidas de estas son el sulfato de aluminio y el cloruro de polialuminio/policloruro de aluminio.

El sulfato de aluminio es una sal inorgánica de fórmula  $Al_2(SO_4)_3$ , obtenida por la reacción entre el ácido sulfúrico y un mineral rico en aluminio. Tradicionalmente el sulfato del aluminio ha sido el coagulante más utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable por su bajo costo y su manejo es relativamente sencillo, este coagulante se encuentra en forma sólida y líquida así como en

diferentes grados de pureza: producto estándar con un alto contenido de hierro residual y producto libre de hierro [11].

El policloruro de aluminio (PAC), es un derivado polimérico del aluminio, se conoce por que tiene mayor costo que el sulfato de aluminio y el cloruro férrico pero esto podría equilibrarse debido a que tiene mayores ventajas en comparación con el sulfato de aluminio, algunas son [5]:

- Una mejor formación del floc.
- Menor generación de lodos.
- El pH óptimo de la coagulación puede ser más alto que cuando se usa el sulfato de aluminio.
- El pH de la coagulación puede ser el mismo de la distribución en aguas con alcalinidad alta.
- Muchas veces es posible usar el PAC sin alcalinización en el proceso de coagulación.
- La remoción de las sustancias orgánicas es mejor con el PAC en comparación con el sulfato de aluminio.
- Poca o ninguna necesidad de usar conjuntamente polielectrolitos.

En la tabla 5 se realiza una comparación entre los coagulantes líquidos sulfato de aluminio y PAC

**Tabla 5.** Ventajas y desventajas de los coagulantes

<b>Sulfato de Aluminio</b>	<b>Policloruro de Aluminio (PAC)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocido, buena disponibilidad.</li> <li>• Plantas normalmente diseñadas para el sulfato de aluminio.</li> <li>• Autoridades no cuestionan el uso del coagulante.</li> <li>• Forma floculo blanco casi invisible.</li> <li>• Se requiere normalmente un control del pH.</li> <li>• El rango de trabajo de pH muy limitado.</li> <li>• La remoción de material orgánica en el proceso limitada.</li> <li>• Problemas con agua de alta turbiedad.</li> <li>• Muchas veces requiere un ayudante de floculación (polímero) para flocular.</li> <li>• Problemas con alto contenido de Aluminio residual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalmente no requiere un ajuste del pH</li> <li>• Rango de trabajo de pH más amplio, aluminio residual más bajo 40</li> <li>• Mejor comportamiento que el sulfato de aluminio: en aguas frías, en la remoción de sustancias orgánicas, en la remoción de turbiedad y color, produce menos lodo</li> <li>• Manejo más fácil de producto líquido y solido</li> <li>• Menor consumo de polímero</li> <li>• Menor dosis de aluminio que con el sulfato de aluminio</li> <li>• Velocidad de reacción muy alta</li> <li>• Ahorro importante en fletes cuando se utiliza un producto seco</li> <li>• El producto solido se disuelve fácil, sin insolubles</li> <li>• Precio más alto por Kg (compensado por una menor dosis)</li> <li>• Un pH demasiado alto para la coagulación puede bajar la remoción de sustancia orgánica.</li> </ul>

Fuente. T. Rinne [27]

#### - Sales de Hierro

Las sales de hierro se diferencian de las sales de aluminio por que forman un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento y pueden trabajar con un rango de pH mucho más amplio. Las más conocidas de las sales de hierro son: cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato ferroso [5].

El cloruro férrico se consigue en tres formas: como cristales hidratados ( $FeCl_3 \times H_2O$ ), como cristales anhidridos ( $FeCl_2$ ), o como solución al 35% y 45%. El Cloruro férrico es un coagulante de bajo costo, alta velocidad de reacción, puede trabajar con pH tan bajo como 4 y tan alto como 11, no tiene problemas con el aluminio residual y muchas veces es eficiente sin ayudante de floculación [11].

El sulfato férrico se encuentra más comúnmente en su forma hidratada  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ . Es un coagulante de bajo costo, alta velocidad de reacción, la adición de un álcali (cal o soda ash) en combinación con el coagulante resulta en un rango más amplio de pH, que puede ir desde 3.5 hasta 11.

El sulfato ferroso es la fuente más barata de hierro como coagulante, este coagulante siempre debe usarse en conjunto con la cal, se usa para aguas turbias, fuertemente alcalinas, con pH superior a 8 y es inadecuado para tratar agua blanda [5].

### 3.2.3 SISTEMA DE DOSIFICACION DE LOS COAGULANTES LIQUIDOS

La aplicación de las sustancias coagulantes en solución o líquidas puede hacerse de muchas formas. Generalmente se clasifica en: sistemas por gravedad y sistemas por bombeo.

#### 3.2.3.1 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN EN SOLUCIÓN POR GRAVEDAD

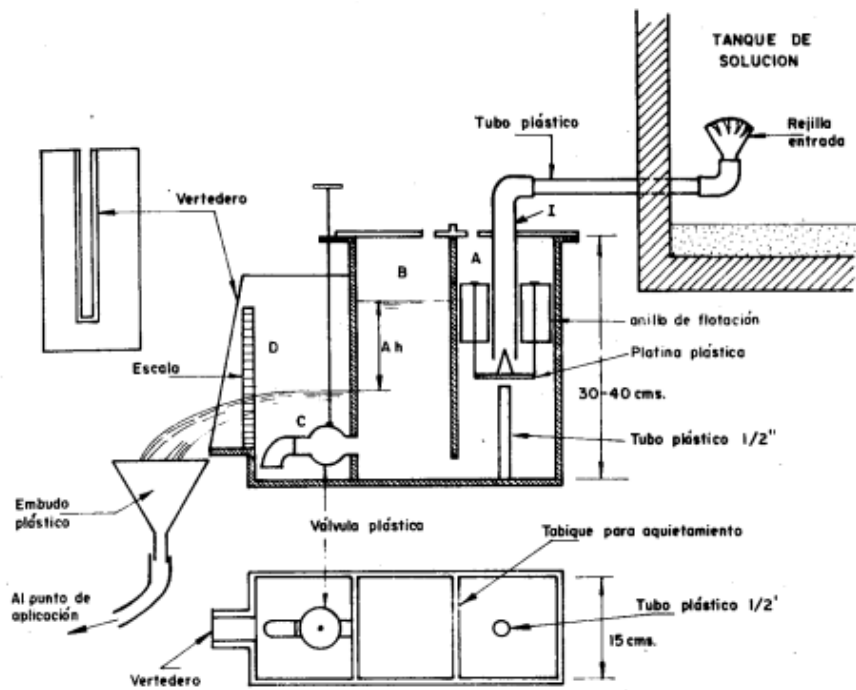
Los sistemas por gravedad constan básicamente de tres partes: tanques de solución, tanque dosificador y elemento hidráulico de medida.

El tanque de solución puede diseñarse para que trabaje con una solución concentrada o con una solución diluida. El material de este depende del coagulante que se emplee en la planta a tratar ya que los coagulantes en solución tienen problema de corrosión.

Los tanques dosificadores más comunes por gravedad son: los de orificio regulable, los de orificio fijo, los proporcionales, las de torre de saturación. [31]

- a. **Los de orificios regulables (modelo integrado):** consisten esencialmente en una llave o válvula de plástico suspendida de un flotador de madera, corcho, caucho o plástico. La válvula se abre o se cierra desde arriba con un vástago de manejo largo.
- b. **Los de orificios regulables (modelo separado):** Este elemento permite conservar el nivel constante en las cámaras centrales "A" y "B" de forma que abriendo o cerrando la válvula plástica de salida "C", se mantenga una pérdida de carga diferencial constante, consta de una válvula que actúa como un orificio sumergido, que evita la cristalización del coagulante en los bordes de la constricción (Ver figura 1).

*Figura 1. Dosificadores con orificios regulables*

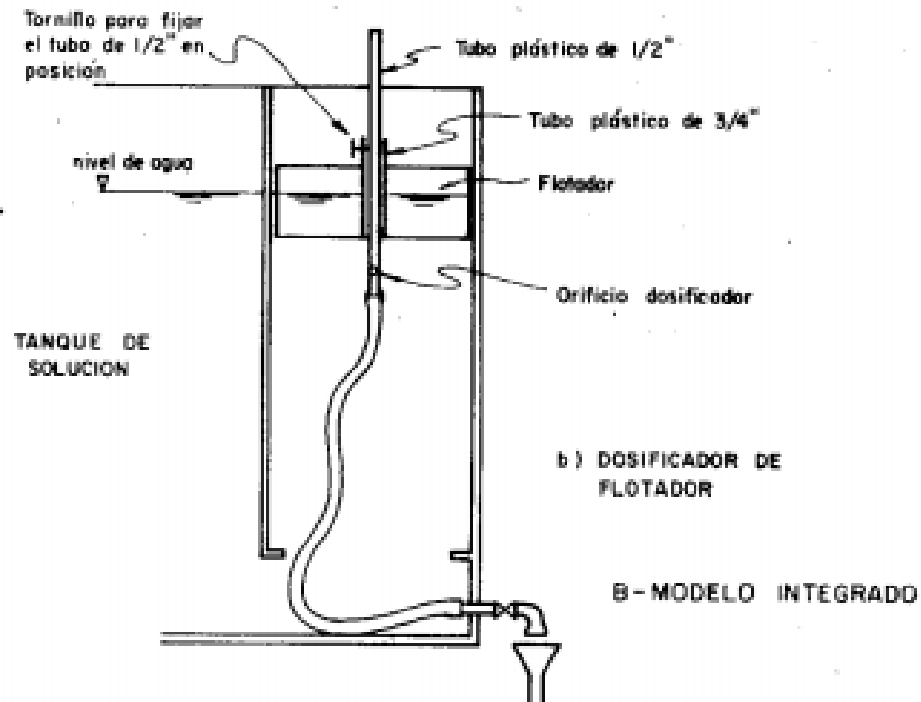


Fuente. J. Arboleda [31]

- c. **Los de orificio fijo (modelo separado):** consiste de una cajilla separada de nivel constante B acoplado por manguera al tanque de solución A. La cajilla B puede subir o bajar a través de una guía adosada a la pared del tanque, de manera que puede cambiársele la carga hidráulica al orificio dosificador.

- d. **Los de orificio fijo (modelo integrado):** consiste de un flotador colocado en el tanque de solución. Dicho flotador va perforado por un tubo de plástico dentro del cual va otro que pueda deslizarse para variar la posición del orificio dosificador con respecto al nivel del agua (Ver figura 2).

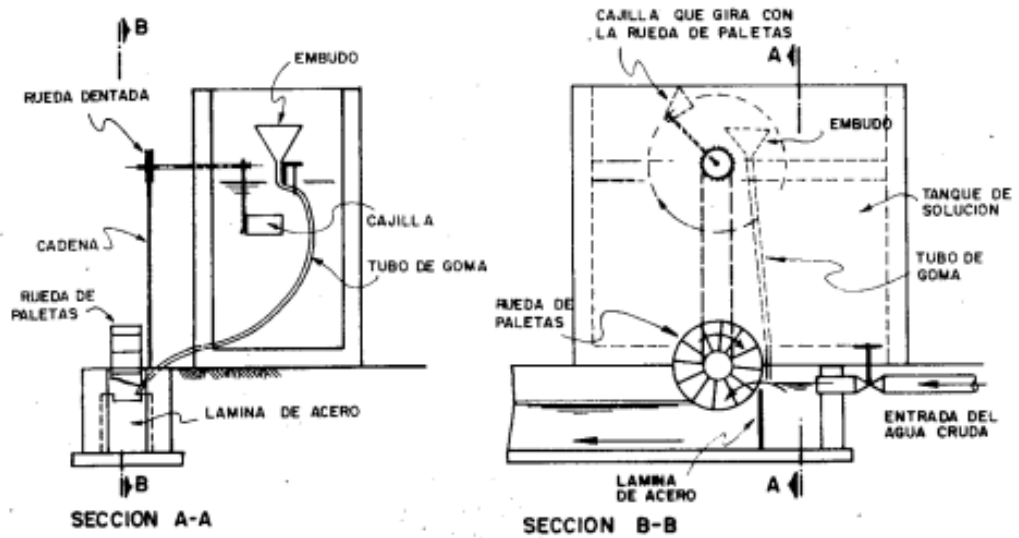
*Figura 2. Dosificadores de orificio fijo*



Fuente. J. Arboleda [31]

- e. **Los proporcionales:** Es un dosificador que aprovecha la energía del agua. Consiste en que el agua pasa por la rueda de paletas A que debe colocarse en un canal con pendiente, hace girar a través de un sistema de cadenas una cajilla dosificadora, la cual recoge cierta cantidad de solución y la vierte en el embudo C. El número de revoluciones es proporcional a la velocidad de flujo. Si el flujo se suspende en la planta, la dosificación también se suspende (Ver figura 3).

Figura 3. Dosificador proporcional



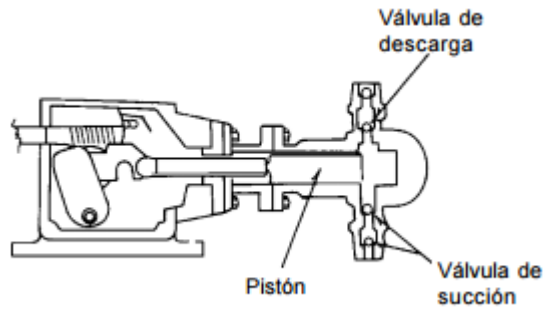
Fuente. J. Arboleda [31]

- f. **Las de torre de saturación:** Se dosifica en bloques producidos localmente a bajo costo, los cuales se colocan en una torre de madera de pared doble.

### 3.2.3.2 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN EN SOLUCIÓN POR BOMBEO

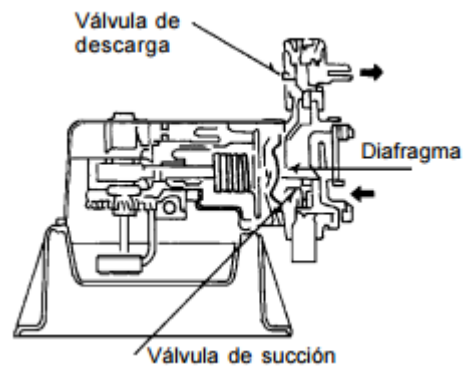
Los sistemas de bombeo constan de tanques de solución y bombas dosificadoras. El uso de este sistema es bastante generalizado, se emplean bombas aspirantes impelentes de diafragma o de pistón, accionadas por un conjunto motor reductor donde el desplazamiento del diafragma o pistón puede ser regulado con una frecuencia de movimientos de desplazamiento alternados, lo que permite ajustar el volumen y, en consecuencia, la dosificación (Ver figuras 4 y 5).

**Figura 4.** Bomba dosificadora de pistón



**Fuente.** L. Canepa [30]

**Figura 5.** Bomba dosificadora de diafragma



**Fuente.** L. Canepa [30]

### 3.2.4 MECANISMOS DE COAGULACION

La desestabilización de las partículas en la mezcla rápida se puede obtener por los siguientes mecanismos:

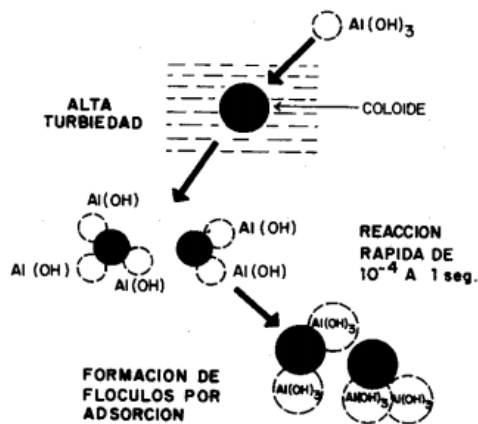
- Coagulación por Adsorción-Neutralización
- Coagulación por Compresión de la Doble Capa
- Coagulación Por Puente Químico
- Coagulación por Incorporación o de Barrido

### 3.2.4.1 COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN-NEUTRALIZACIÓN

Según Mackrle [7], la neutralización de cargas de coloides puede hacerse por cambio de la concentración de los iones que determinan el potencial del coloide y por la adsorción de iones que posean una carga opuesta a las de los iones determinantes de potencial, y que sean capaces de reemplazar a estos en la capa de Stern.

Este mecanismo de coagulación se presenta cuando existe en el agua una alta concentración de partículas en estado coloidal. Cuando se agrega una solución de sulfato de aluminio a un agua muy turbia, con alta concentración de coloides, las especies hidrolíticas solubles son adsorbidas por los coloides formándose los floculos en forma casi instantánea, en un tiempo de  $10^{-4}$  a 1 segundo.

Figura 6. Coagulación por adsorción



Fuente. J.M. Pérez [14]

Por la gran cantidad de coloides presentes, la distancia entre ellos es pequeña, siendo por lo tanto mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización, así como el potencial zeta resultante (Ver figura 6). [14]

### 3.2.4.2 COAGULACIÓN POR COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue solo con los iones del coagulante [9].

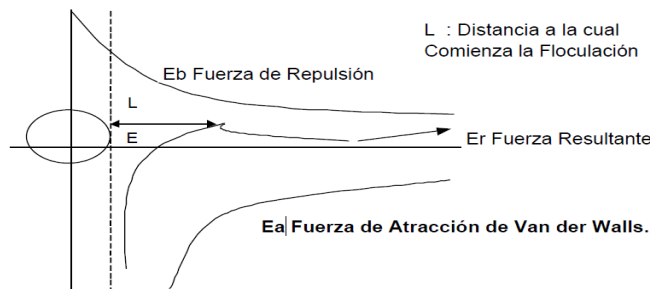
Si la adsorción de contra iones es electrostática, los iones más pequeños podrán acercarse más a la superficie de la partícula, flotarán libremente a su alrededor y no se fijarán a puntos de adsorción determinados [6].

A través de este mecanismo la coagulación se produce cuando el potencial zeta se hace cero. El exceso de coagulante agregado no puede producir estabilización de la suspensión, pues los coloides no pueden adsorber más contra iones de los que su carga primaria lo permite.

Según la ley de Schulze Hardy [6], “La precipitación de un coloide es efectuada por aquel ion del electrolito añadido, que tenga una carga opuesta en signo a la de las partículas coloidales y el efecto de dicho ion se incrementa tanto más cuanto mayor sea el nuero de cargas que posea”.

En la siguiente figura se observa como la curva de Van der Walls es fija mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se incrementa en la solución los iones de carga opuesta. En consecuencia, si se reduce el potencial repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals (Ver figura 7). [7]

**Figura 7.** Fuerza de atracción y repulsión



**Fuente.** A. Londoño [7]

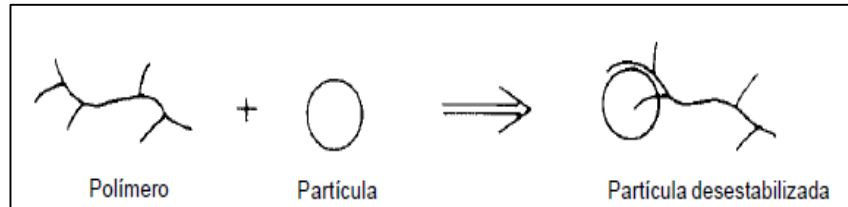
### 3.2.4.3 COAGULACIÓN POR PUENTE QUIMICO

La coagulación por puente químico explica la relación estequiometría que existe entre la cantidad de superficie disponible o cantidad de coloides y la cantidad de coagulante agregado.

Healy, Smelle y La Mer [8], explican cualitativamente la teoría del puente, a través, de cinco reacciones.

- Reacción 1: Un polímero tiene ciertos grupos que interaccionan con la superficie de las partículas coloidales y se deja que el resto de la molécula se extienda hacia la solución (Ver figura 8).

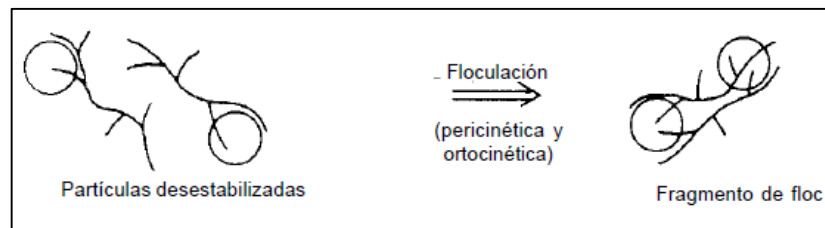
**Figura 8.** Adsorción inicial con la dosis óptima del polímero



**Fuente.** L. Vargas [8]

- Reacción 2: Si una segunda partícula con algunos sitios de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión. El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula (Ver figura 9).

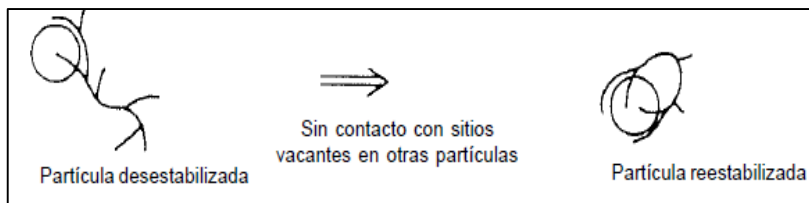
**Figura 9.** Formación del floculo



**Fuente.** L. Vargas [8]

- Reacción 3: Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de las partículas original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la re estabilización de las partículas (Ver figura 10).

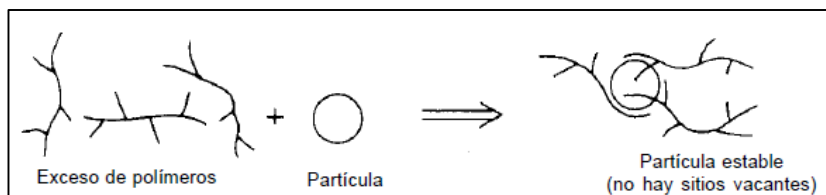
**Figura 10.** Adsorción secundaria de polímero



**Fuente.** L. Vargas [8]

- Reacción 4: El modelo de puente explica cualitativamente la reestabilización como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero, sin dejar lugar para la formación de puentes interparticulares (Ver figura 11).

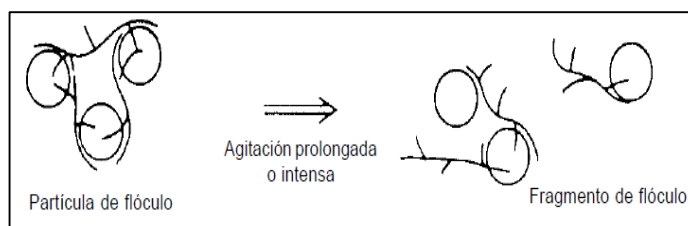
**Figura 11.** Adsorción inicial exceso de dosis del polímero



**Fuente.** L. Vargas [8]

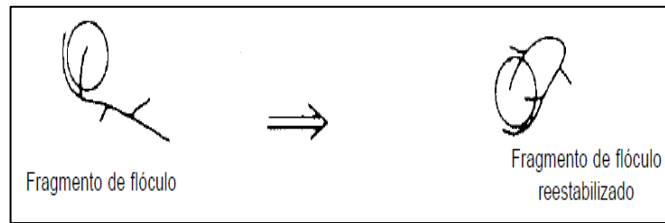
- Reacción 5 y 6: En algunos casos, los sistemas coloidales desestabilizados pueden ser reestabilizados por medio de agitación intensa, debido a que se rompen las uniones polímero-superficie, y ocurre una adsorción secundaria de los fragmentos de los floculos (Ver figura 12).

**Figura 12.** Ruptura del floculo



**Fuente.** L. Vargas [8]

**Figura 13.** Adsorción secundaria de polímeros



**Fuente.** L. Vargas [8]

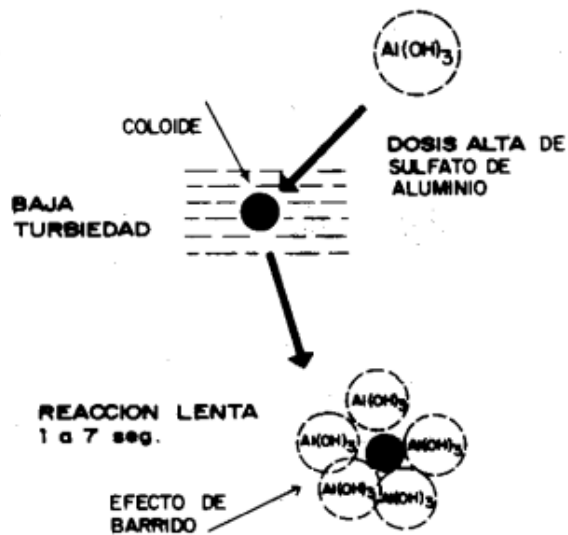
#### **3.2.4.4 COAGULACIÓN POR INCORPORACIÓN O DE BARRIDO**

La causa principal de formación de la coagulación por barrido, es cuando se agrega una concentración de coagulantes tan alta, que se excede el límite de solubilidad de ese compuesto en el agua. Al reaccionar el coagulante con la alcalinidad del agua y el agua misma, se provoca la producción de una masa esponjosa llamada floc de barrido que atrapa en su declive a las partículas coloidales, las cuales se ven forzadas a decantar, incorporadas dentro del precipitado que desciende. [5]

Stumm y O'Melia [8] indican que el mecanismo de barrido es utilizado en las plantas de tratamiento donde la floculación y la sedimentación anteceden a la filtración, pues los floculos resultantes son de mayor tamaño y presentan velocidades de sedimentación relativamente altas, en comparación con los que se obtienen con la coagulación por adsorción-neutralización.

Debido a la distancia entre las partículas, las fuerzas de atracción son menores y se requiere de mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlas, aumentando el potencial zeta y el tiempo de reacción que puede llegar a ser hasta de 7 segundos. [14]

**Figura 14.** Coagulación por Barrido



Fuente. J.M. Pérez [14]

### 3.2.4 ESTRUCTURAS PARA LA MEZCLA RAPIDA

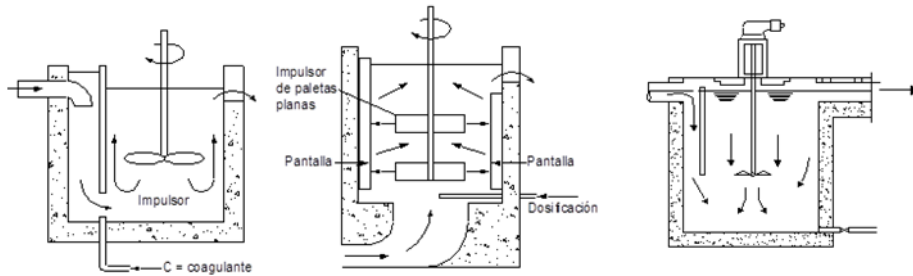
La mezcla rápida puede producirse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos o mecánicos, tales como: resaltos hidráulicos en canales, canaletas Parshall, vertederos rectangulares, tuberías de succión de bombas, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipos de mezcla rápida [3].

#### 3.2.4.1 MEZCLADORES RAPIDOS MECANICOS

Los tanques de mezcla rápida mecánica se proyectan de sección circular o cuadrada. En general consisten en hélices, paletas, turbinas u otros elementos similares acoplados a un eje de rotación impulsado por una fuerza motriz cualquiera. Los ejes giran a un número alto de revoluciones agitando en forma violenta y propicia la mezcla rápida y uniforme del coagulante. [3]

Los mezcladores rápidos mecánicos necesitan de energía eléctrica disponible y demandan mayor cuidado en operación y mantenimiento (Ver figura 15).

**Figura 15. Mezcladores mecánicos**



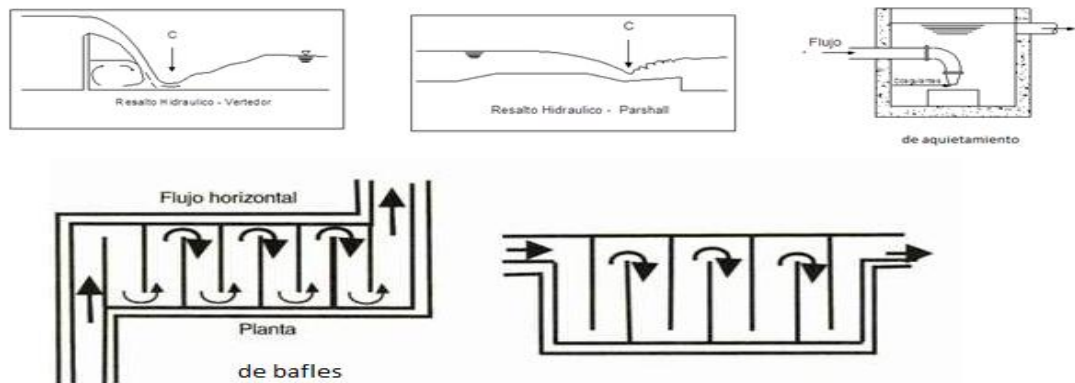
Fuente. J. A. Romero Rojas [3]

### 3.2.4.2. MEZCLADORES RAPIDOS HIDRAULICOS

Los mezcladores rápidos hidráulicos son instalaciones en las cuales la agitación turbulenta del agua se efectúa aprovechando la energía que posee el agua como resultado de la conducción es decir cuando se dispone de suficiente cabeza o energía en el flujo de entrada. [2]

En general se utilizan los resaltos hidráulicos, canaletas Parshall, tubos Venturi, dispersores de tubos perforados y tanques con baffles. Estos tienen la ventaja de no requerir equipo mecánico (Ver figura 16). [4]

**Figura 16. Mezcladores hidráulicos**



Fuente. J. A. Romero Rojas [3].

### 3.2.5 PARAMETROS OPERACIONALES DE LA MEZCLA RAPIDA

La eficiencia del proceso de mezcla rápida depende de:

- Las variables químicas relacionadas con el tipo y la dosis de coagulantes, así como de su concentración, y con características de las aguas.
- Variables físicas, tales como el tiempo e intensidad de la mezcla provocada por la energía disipada, ya sea por medios mecánicos o hidráulicos.

Los parámetros operacionales de la mezcla rápida son la intensidad de agitación que se debe impartir a la masa para dispersar al coagulante, la cual se evalúa mediante el gradiente de velocidad, y el tiempo durante el cual debe aplicarse esta agitación al agua. La magnitud de estos parámetros dependerá del tipo de coagulación que se llevara a cabo: coagulación por adsorción, o coagulación por barrido [8].

#### Gradiente de Velocidad

El gradiente medio de velocidad, comúnmente indicado por la letra G, puede ser fácilmente calculado por la ecuación de Camp y Stein.

Si la unidad es de tipo hidráulico, se requiere determinar:

- La pérdidas (hf)
- El tiempo de mezcla (t)
- La temperatura del agua y seleccionar la viscosidad cinemática del agua (v)
- La gravedad del agua (g)

Reemplazar estos datos en la ecuación del gradiente de velocidad:

$$\sqrt{\frac{g * hf}{v * t}}$$

Ecuación 2

Amirtharajah y Trussler [5] hallaron que la mínima eficiencia de la mezcla se consigue con rangos de gradientes entre 800 y 1000 s<sup>-1</sup> o entre 3000 y 5000 s<sup>-1</sup>. Estos rangos de gradientes no deben usarse. Por tanto, para mezcla por coagulación de barrido podrían seleccionarse gradientes de 400 a 800 s<sup>-1</sup>, tiempos de 30 a 180 segundos y con coagulación por adsorción – desestabilización gradientes entre 1000 y 3000 s<sup>-1</sup> y tiempos de 1 a 5 segundos (los mayores tiempos para los gradientes más bajos).

Otros estudios realizados, indican que la tasa de aglomeración máxima en un reactor depende del rango de gradiente de velocidad y el tiempo de retención en el que está operando; existe un rango óptimo para cada tipo de unidad.

**Tabla 6.** Gradientes óptimos de mezcla

Unidad de Mezcla	Valores de G (s <sup>-1</sup> )
Retromezclador	800 – 1.000
Salto hidráulico	= 1.000
Difusores	800 – 1.000
Mezcladores en línea	3.000 – 5.000

Fuente. L. Vargas [29]

### Tiempo de mezcla

La adecuación de estos parámetros es de especial importancia cuando el mecanismo de coagulación predominante es el de adsorción-neutralización donde el tiempo de mezcla debe ser inferior a un segundo. En este caso, el coagulante debe dispersarse en forma instantánea en toda la masa de agua antes de que la hidrólisis del coagulante se complete, sobre todo cuando se emplean coagulantes inorgánicos como las sales de aluminio o de hierro, por lo que si la unidad de mezcla no produce un gradiente de velocidad apropiado en un tiempo de retención instantáneo, no se habrá logrado una desestabilización completa.

Con coagulación de barrido, en cambio, solo es necesaria una dispersión homogénea, los tiempos de retención pueden ser mayores (1-7 seg) y el gradiente de velocidad no influye en la eficiencia. [8]

$$t = \frac{6(h_2 - h_1)}{\frac{v_1 + v_2}{2}}$$

Ecuación 3

Dónde:

t = tiempo de mezcla

h<sub>1</sub> y h<sub>2</sub> = altura conjugada

v<sub>1</sub> y v<sub>2</sub> = velocidad

### 3.2.6 EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS DE MEZCLA RÁPIDA.

Las pruebas de trazadores son de gran utilidad para conocer el comportamiento hidráulico de los mezcladores, floculadores y sedimentadores. Se basan en determinar la proporción de flujo pistón y flujo mezclado, cortocircuitos y zonas muertas existentes, agregando al flujo sustancias llamadas trazadoras, las cuales se inyectan en el afluente del tanque que se quiere analizar [5].

Una de las grandes desventajas de este sistema es que se requiere utilizar equipo y personal especializado.

#### Sustancias trazadoras

Las sustancias trazadoras pueden ser:

- Colorantes con fluorescencia o rodamina
- Iones con cloruros, fluoruros o nitratos.
- Elementos radiactivos como isotopos.

Antes de elegir una sustancia como trazador se debe considerar aspectos como que su concentración en el agua es consistentemente baja y aproximadamente constante, que no reaccione con los compuestos en el agua y que se detecte fácilmente la medida de agua [12].

Maldonado [28] sugiere que resulta muy común utilizar como sustancia trazadora en las evaluaciones de plantas de tratamiento de agua el ion cloruro obtenido de la aplicación de cloruro de sodio. El cloruro de sodio o sal de mesa o cocina es de fácil obtención y bajo costo. Asimismo, la determinación de la concentración a la salida del reactor es rápida y fácilmente medida a través de la conductividad.

La cantidad de trazador P (kg) que se necesita para añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V * K * C_0}{l \times 10^3} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

P = peso del trazador por añadir al reactor kg

V = volumen útil del reactor m<sup>3</sup>

K = constante de corrección

Co = concentración, mg/l o g/m<sup>3</sup>

l = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

## Procedimiento

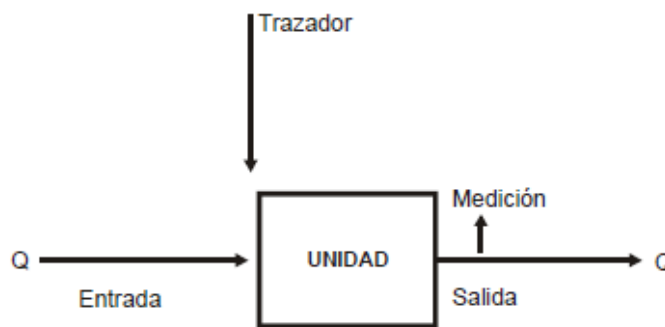
Dependiendo del estudio a ser realizado, la forma de aplicación del trazador puede ser continua o instantánea.

Cuando la aplicación es continua, se puede utilizar un tanque para preparar el trazador con concentración  $C_0$  continuamente. Se efectúan varias pruebas, para cada prueba se asegura un flujo constante de agua, comenzando de mayor a menor caudal. La preparación del trazador se obtiene a partir de un balance de masas y durante cada prueba se dosifica este trazador a cierto caudal por medio de una bomba.

La forma continua tiene la ventaja de permitir establecer comparaciones entre las curvas que se presentan en la entrada del trazador (cuando se inicia la dosificación) y al final (cuando el proceso se paraliza). [28]

En el caso de la aplicación instantánea, el trazador es preparado en un tanque, siendo su contenido introducido en el agua en el menor tiempo posible. Se recolecta las muestras de agua en la entrada y salida de la unidad de tratamiento para medir la concentración, por un período de tiempo para asegurar que todo el trazador añadido pasa a través de puntos de recogida y obtener la velocidad de flujo en la unidad de tratamiento, es decir, la cantidad total de trazador añadido debe ser aproximadamente igual a la cantidad recuperada en los puntos de recogida, en la figura 17 se muestra donde se aplica la sustancia trazadora y donde se toma la medición de la concentración de la sustancia.

**Figura 17.** Aplicación de trazadores



**Fuente.** V. Maldonado [28]

### 3.2.7 DIAGRAMAS DE COAGULACION

Los diagramas de coagulación son herramientas muy efectivas y útiles para predecir las condiciones químicas que gobiernan el proceso. Dichos diagramas se usan para definir las dosis de coagulantes en función de los valores de pH y se desarrollan a partir de los diagramas de estabilidad termodinámica para la fase sólida del hidróxido de aluminio [5].

Para la construcción de los diagramas de coagulación se requiere haber realizado pruebas que determinen los parámetros operacionales óptimos (concentración óptima del coagulante, gradiente y tiempo de mezcla rápida, gradiente y tiempo de retención óptimos para la mezcla lenta y por último el tiempo de sedimentación), es decir, que hayan arrojado mejores resultados en cuanto a la disminución de unidades de turbiedad en el agua que ha sido sometida a ensayo, con el fin de variar únicamente los valores de pH en el agua cruda y observar la remoción de características físicas como color y turbiedad que mediante la coagulación se obtiene a ciertas variaciones de pH.

Vargas [8] indica que los diagramas de coagulación posibilitan la toma de decisiones correctas, tanto para la elección de la tecnología de tratamiento apropiada, como para la optimización de la coagulación, con considerable economía en productos químicos.

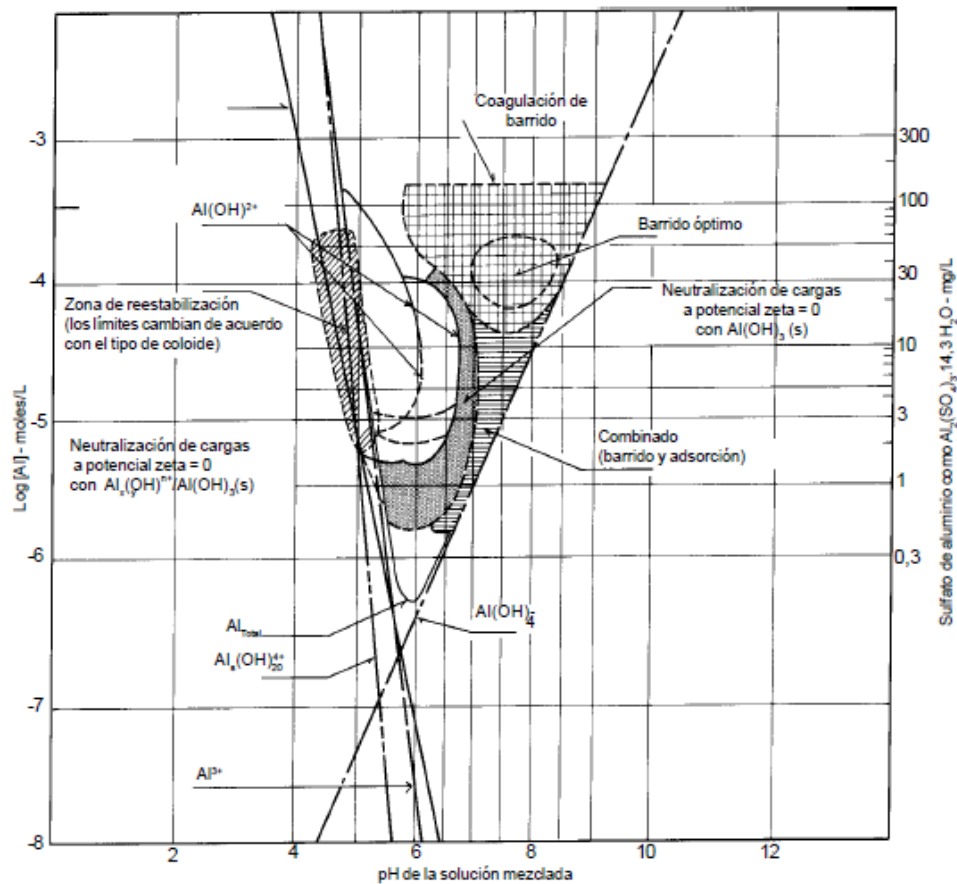
Los diagramas de coagulación de Amirthajah y Mills [8] fueron desarrollados a partir del diagrama de solubilidad de aluminio y de las condiciones de coagulación-dosis del coagulante  $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14,3 \text{ H}_2\text{O}]$  y el pH de la mezcla, en el tratamiento de diferentes tipos de aguas naturales y sintéticas, con turbiedad relativamente comparada a color verdadero. [8]

#### **Diagrama de coagulación para remoción de turbiedad**

El diagrama de la figura (18) está basada en la desarrollada inicialmente por Amirthajah y Mills y muestra con claridad el diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad, la cual es útil para el diseño y operación de plantas de tratamiento que usen esta tecnología.

Se puede ver que con dosis superiores a 15 mg/l de sulfato de aluminio y pH comprendido entre 5.5 y 9.0 se consigue coagulación de barrido, con un óptimo entre 6.7 y 8.3 para dosis entre 30 y 60 mg/l. La coagulación por adsorción – neutralización, en cambio, se logra con pH entre 15 y 30 mg/l. A pH menores de 5.0 puede llegarse también a producir adsorción – neutralización con dosis mayores, hasta 60 mg/l. [5]

**Figura 18.** Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad



Fuente: Y. Vargas [8]

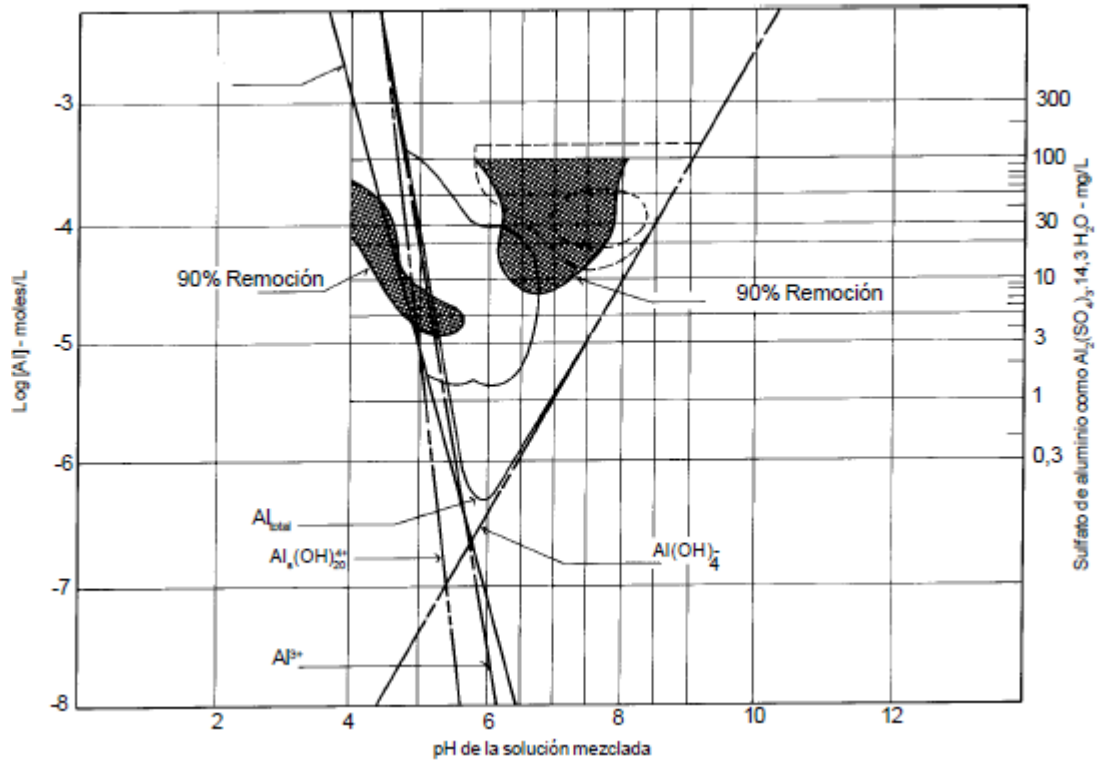
### Diagrama de coagulación para remoción de color

A pH altos, el color puede ser removido por adsorción química en los precipitados poliméricos de los productos de hidrólisis de los coagulantes, produciendo una interacción entre estos y los grupos carboxílicos de las moléculas orgánicas pesadas de las sustancias productoras de color.

A pH bajos, en cambio, las sustancias húmicas interaccionan con los compuestos de aluminio positivamente cargados para formar un precipitado de fulvato de aluminio. [5]

En el diagrama de la figura 19 se evidencia que cuando simultáneamente con el color está presente la turbiedad, la superficie de los coloides se hace mayor y esto estimula la adsorción de las moléculas de color, lo que se traduce en menor dosis de coagulantes.

Figura 19. Dominios de remoción de color con presencia de turbiedad



Fuente: Y. Vargas [8]

## 4. METODOLOGÍA

Para la elaboración de la valoración técnica – económica del proceso de coagulación en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca, se realizaron 4 etapas.

### 4.1. ETAPA 1: ELABORACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN.

Las muestras de agua cruda fueron recolectadas en la PTAP de Floridablanca, aguas arriba de la canaleta Parshall y posteriormente transportadas al laboratorio de agua potable de la UPB. En la ilustración 2 se puede observar cómo se realizó la recolección y almacenamiento del agua cruda.

*Ilustración 2. Recolección y almacenamiento de agua cruda*



**Fuente:** Autor

Cada una de las muestras de agua fue evaluada con los parámetros que se encuentran en la tabla 7.

*Tabla 7. Parámetros y equipos de medición*

Parámetro	Equipo	Unidad	Características
-----------	--------	--------	-----------------

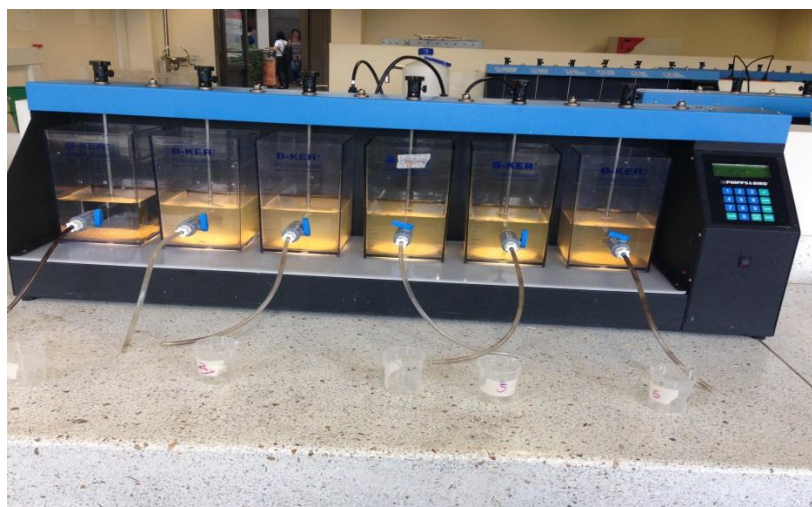
pH	Multiparametro marca HACH HQ 40 d – multi.	Unidades	El equipo es propiedad de la UPB.
Color	Colorímetro marca BYK	UPC	El equipo es propiedad del acueducto de Floridablanca, y esta calibrado a 568 (UPC).
Turbiedad	Turbidímetro marca HACH 2100 Q.	UNT	El equipo es propiedad de la UPB y esta calibrado hasta 800 UNT, con sensibilidad de hasta 0.2 UNT.
Alcalinidad	Se utilizó el Multiparametro marca HACH HQ 40 d – multi y agitador magnético.	mg/l CaCO <sub>3</sub>	La alcalinidad del agua se determinó de acuerdo al método estándar potenciométrico.

Fuente. Autor

Mediante ensayos de pruebas de jarras se simuló el proceso de coagulación-floculación-sedimentación (Ver ilustración 3). Para tal fin se efectuaron los ensayos bajo las siguientes condiciones:

- Velocidad de mezcla rápida / tiempo de mezcla rápida de 300 RPM / 1 minuto
- Velocidad de mezcla lenta / tiempo de mezcla lenta 30 RPM / 20 minutos
- Tiempo de sedimentación: 15 minutos

*Ilustración 3. Prueba de jarras*



Fuente. Autor

Se trabajaron los coagulantes utilizados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca: sulfato de aluminio tipo B líquido  $Al_3(SO_4)$  y el policloruro de aluminio (PAC)  $Al(OH)_mCl_{3-m}$ . Los coagulantes se prepararon con base en el porcentaje de alúmina ( $Al_2O_3$ ) que se encuentran en la tabla 8, presentes en el

Alumbre y el PAC. Para cada ensayo de dosis óptima se prepararon 100 ml de coagulante al 1%.

**Tabla 8.** Concentración de los reactivos

Coagulantes Líquidos	Concentración de Alúmina en los Coagulantes [%]	Densidad del Coagulante (g/ml)
Sulfato de aluminio	7,3	1,34
Policloruro de aluminio (PAC)	19	1,3

Fuente. Autor

Se evaluaron seis diferentes calidades de agua, teniendo en cuenta la variación de la turbiedad y se modificó el pH con cal hidrata tipo N, como alcalinizante, y como acidificante el ácido clorhídrico HCl 0,1 N.

En general, a cada muestra de agua se le determinó la dosis óptima de cada uno de los coagulantes, y se le modificó el pH en rangos de 5 a 10 unidades. Además se les determinaron parámetros fisicoquímicos, manejando los métodos estándares de la Asociación Publica Americana para la Salud de la tabla 7 mencionada anteriormente [32].

#### **4.1.1. COAGULACIÓN SIN AJUSTE DE PH – PRUEBA DE JARRAS.**

El procedimiento general para determinar la dosis óptima de coagulante sin modificación del pH es el siguiente:

- a. Se determinó la turbiedad, pH, alcalinidad y color aparente del agua cruda.
- c. Se midió en cada una de las jeringas la cantidad de coagulante que se va aplicar a cada una de las jarras, de acuerdo a las dosis seleccionadas.
- d. Se mezcló muy bien el agua cruda y se agregó 1 litro de agua cruda a cada una de las 6 jarras.
- e. Se colocaron las jarras en el equipo con las paletas dentro de las jarras, posteriormente se programó el equipo de jarras con las velocidades y los tiempos mencionados anteriormente para la mezcla rápida.
- f. Se encendió el equipo y se aplicó en forma simultánea e instantánea el coagulante a todas las jarras.
- g. Transcurrido los 60 segundos de la mezcla rápida, se tomó una muestra de 30 ml a cada una de las jarras para medir el pH después de coagulación.

**h.** Una vez que el equipo ha concluido los tiempos de mezcla rápida, floculación y sedimentación, se toman 50 ml de cada una de las jarras para medir turbiedad y color residual.

#### **4.1.2. COAGULACIÓN CON AJUSTE DE PH – PRUEBA DE JARRAS.**

El procedimiento general para determinar la dosis óptima de coagulante con modificación del pH es siguiente:

**a.** Se determinó turbiedad, pH, color y alcalinidad del agua cruda.

**b.** Se midió en cada una de las jeringas la cantidad de coagulante que se va aplicar a cada una de las jarras.

**c.** Se colocó un litro de agua cruda a cada una de las jarras, se ubican en el equipo y a cada una de ellas se agregó ácido clorhídrico al 0,1 N para acidificar el agua o cal hidratada para alcalinizarla. Esto se agrega gota a gota hasta obtener una igualdad en cada una de las jarras.

**e.** Se puso en funcionamiento el equipo y se aplicó en forma simultánea e instantánea el coagulante a todas las jarras.

**f.** Transcurrido los 60 segundos de la mezcla rápida, se toma una muestra de 30 ml a cada una de las jarras para medir el pH después de coagulación.

**g.** Una vez que el equipo ha concluido los tiempos de mezcla rápida, floculación y sedimentación, se toman 50 ml de cada una de las jarras para medir turbiedad y color residual. Esta prueba se repite dependiendo de los ajustes de pH que se le hagan a la muestra de agua ya sea acidificándolo o alcalinizando.

#### **4.1.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN**

Con los datos obtenidos de las pruebas de jarras se construyen los diagramas de coagulación para determinar la dosis óptima de los coagulantes en función de la variación de los valores de pH.

Los diagramas de coagulación se graficaron en el programa SURFER 6, a partir de los porcentajes de remoción de turbiedad y color real del agua obtenidos en las pruebas de dosis optima de coagulante con modificación del pH.

Para la construcción de los diagramas de coagulación fue necesario:

**a.** La ubicación en el plano (X, Y, Z) de las variables pH, Log de la dosis del coagulante y porcentaje de remoción de turbiedad o de color.

**b.** Identificación en el plano de la curva sin modificador de pH.

- c. Se construyeron las mallas de puntos de remoción de turbiedad pero modificando el pH con la utilización de acidificante o alcalinizante.
- d. Luego de haber identificado los puntos de pH y dosis del coagulante, se analizaron las zonas de mayor remoción de turbiedad y a que cantidades va a trabajar mejor la planta según la dosificación del coagulante y calidad del agua.

## **4.2. ETAPA 2: EVALUACION TECNICA Y ECONOMICA DEL SISTEMA DE DOSIFICACION DEL PROCESO DE COAGULACION.**

Se realizó una inspección y evaluación técnico - operacional del sistema de almacenamiento y dosificación de los coagulantes líquidos utilizados en la planta, así como de los equipos, dispositivos e infraestructura que se utiliza para este propósito.

Para la evaluación económica se realizó un estudio de los costos mensuales que tienen en la planta con el uso de los coagulantes líquidos sulfato de aluminio y PAC, y se comparan con los costos que generan los resultados de las pruebas de dosis óptima que se determinaron en el laboratorio.

## **4.3. ETAPA 3: EVALUACION HIDRAULICA DE LA MEZCLA RAPIDA-CANALETA PARSHALL.**

### **4.3.1. PRUEBA DE TRAZADORES**

Para determinar el comportamiento hidráulico de la canaleta Parshall, utilizada como unidad de mezcla rápida en la PTAP de Floridablanca, se realizó un estudio de trazadores. Se llevó a cabo una dosificación continua de trazador para la calibración del dispositivo, por medio de la obtención de una ecuación que finalmente se compara con la ecuación de diseño inicial de la canaleta Parshall de la planta.

Se utilizó como trazador el cloruro de sodio (NaCl), sal común o de cocina. Se efectuó inicialmente una prueba en laboratorio para obtener una curva de correlación entre la conductividad del agua y la concentración del trazador (Ver gráfica 1). La ecuación 5 muestra la correlación obtenida entre la conductividad del agua y la concentración de sal.

$$C = \frac{(b-83.5)}{2061.8}$$

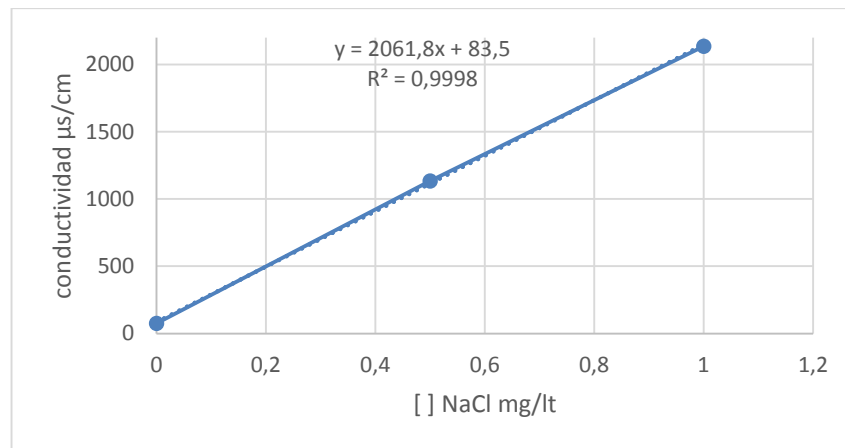
Ecuación 5

Donde:

C = Concentración de sal, mg/L

b = Conductividad,

**Grafica 1. Curva de calibración**



Fuente. Autor

Para la dosificación del trazador se empleó una motobomba eléctrica, la cual fue conectada al tanque donde se preparó la solución trazadora (Ver ilustración 5). La preparación del trazador se hizo teniendo en cuenta el rango de caudal de trabajo de la motobomba a utilizar ( $q = 0.0083 - 0.58\text{l/s}$ ). La prueba se realizó para 4 valores de caudal de entrada a la canaleta Parshall ( $Q_e$ ). El tiempo en el que se realizó la prueba fue de aproximadamente 30 minutos. La tabla 9 presenta los valores de caudal de entrada a la planta utilizados en la prueba, así como la concentración de sal ( $C_o$ ) en la solución trazadora a aplicar.

**Tabla 9. Caudales utilizados prueba de trazador**

Prueba	$Q_e$ (l/s)		$q$ (l/s)	$C_o$ (mg/L)
	Rango	Promedio		
1	305 - 319	303	0,32	23.7
2	251 - 267	250	0,26	24.6
3	178 - 189	178	0,25	24.2
4	135 - 157	137	0,35	24.3

Fuente. Autor

Teniendo en cuenta la concentración de la solución trazadora a aplicar ( $C_o$ ), el caudal de dosificación ( $q$ ), la concentración de sal en el afluente ( $C_a$ ) y la concentración de sal en la salida de la canaleta Parshall ( $C_s$ ), se puede determinar, a partir de un balance de masas, el caudal de agua afluente al dispositivo ( $Q_a$ ), como se muestra en la ecuación 6, el cual se comparará con el valor de caudal suministrado por los operarios de la planta

$$Q_a = \frac{q(C_o - C_s)}{(C_s - C_a)} \quad \text{Ecuación 6}$$

**Ilustración 4.** Prueba de trazadores en canaleta Parshall



Fuente. Autor

#### 4.3.2. VERIFICACIÓN DEL GRADIENTE Y TIEMPO DE MEZCLA DE LA CANALETA PARSHALL.

Para verificar el gradiente y tiempo de mezcla en la canaleta Parshall se tomaron las profundidades del resalto de la canaleta a diferentes caudales con el fin de aplicar las ecuaciones que se encuentran en la tabla 10, las cuales permitieron el cálculo del gradiente de mezcla rápida y tiempo de mezcla para comparar cada uno de los resultados con las recomendaciones de la literatura.

**Tabla 10.** Ecuaciones para verificación de gradiente de mezcla en canaleta Parshall

Parámetro	Ecuación
-----------	----------

<b>Caudal por Unidad de Ancho</b>	$\frac{Q}{b}$
<b>Altura critica</b>	$\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$
<b>Profundidad lámina de agua</b>	$p - h_c$
<b>Altura conjugada 1</b>	$\frac{h_c \sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{\frac{y}{h_c} + \frac{3}{2}}}$
<b>Altura conjugada 2</b>	$\frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8Nf^2} - 1)$
<b>Velocidad 1</b>	$\frac{q}{h_1}$
<b>Velocidad 2</b>	$\frac{q}{h_2}$
<b>Vm</b>	$\frac{v_1 + v_2}{2}$
<b>Numero de Froude</b>	$\frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}$
<b>Perdida de Carga</b>	$\left[ h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right] - \left[ h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right]$
<b>Longitud del Resalto</b>	$6(h_2 - h_1)$
<b>Tiempo de Mezcla</b>	$\frac{x_r}{v_m}$
<b>Gradiente de Mezcla</b>	$\sqrt{\frac{g * hf}{v * t}}$

Fuente: Autor

#### **4.4 ETAPA 4: FORMULACION DE ALTERNATIVAS.**

Según los resultados obtenidos del comportamiento del sistema de coagulación de la planta, se elaboraron alternativas con el fin de optimizar la condiciones del proceso de la mezcla rápida en la PATP De Floridablanca. La propuesta se elaboró a partir de los datos obtenidos, análisis de resultados de las etapas anteriores del proyecto con lo que actualmente manejan en la planta.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se encuentran los resultados experimentales, acompañados de la evaluación técnica-económica y las alternativas de mejora para la planta de acueducto de Floridablanca.

### 5.1. ETAPA 1: DOSIS ÓPTIMAS DE COAGULANTES - DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN.

A continuación se muestran los diagramas de coagulación de remoción de turbiedad y remoción de color, generadas para las turbiedades bajas y altas, utilizando el coagulante sulfato de aluminio líquido tipo B y PAC. En los anexos 1 a 6 se encuentran los resultados de las pruebas de jarras.

*Tabla 11. Características de las muestras de agua cruda*

Sulfato de Aluminio					Policloruro de Aluminio (PAC)				
Muestra	pH	Color (UPC)	Turbidez (UNT)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Muestra	pH	Color (UPC)	Turbidez (UNT)	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
1	7,26	53	16	32	1	7,22	60	33,1	32
2	7,18	1929	488	32	2	7,16	1154	373	34
3	7,65	2479	846	30	3	7,13	1544	876	32

Fuente. Autor

#### 5.1.1. Dosificación con Sulfato de Aluminio Líquido Tipo B –Turbiedad Baja

A continuación se muestran los diagramas de coagulación generados para muestras de agua cruda con turbiedades y color bajos, empleando como coagulante el Sulfato de Aluminio tipo B.

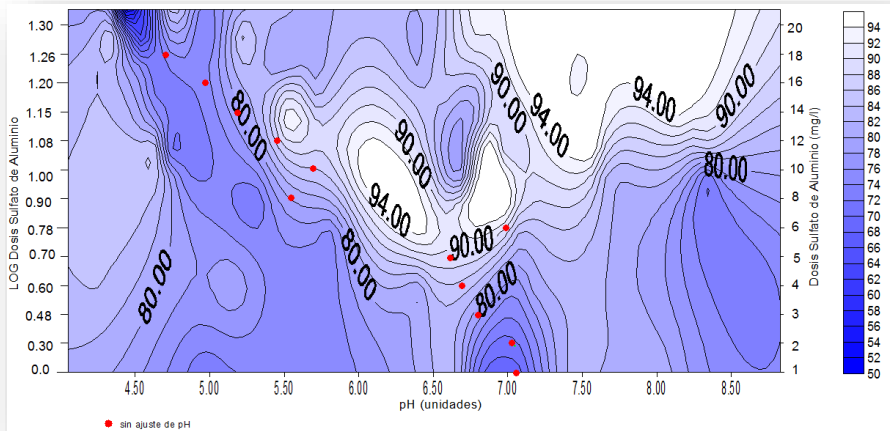
*Tabla 12. Parámetros iniciales muestra de agua cruda*

PARAMETRO	MEDICION
pH	7,26 unidades
Turbiedad	16 UNT
Color	53 mg/l PT-Co

<b>Alcalinidad</b>	32 mg/CaCO <sub>3</sub>
--------------------	-------------------------

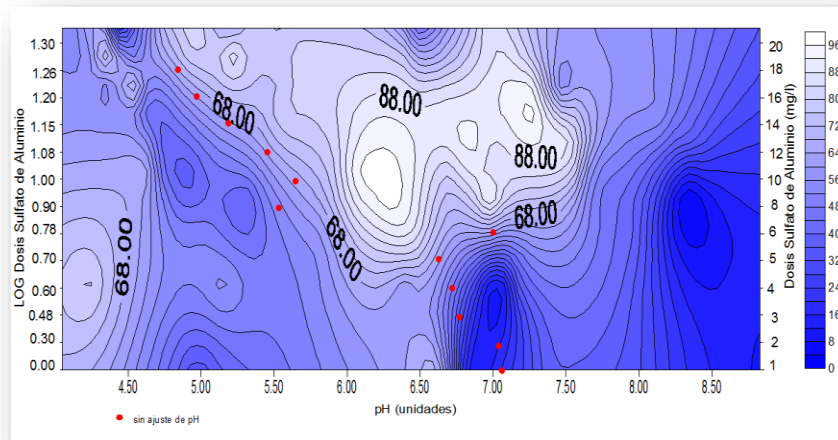
**Fuente:** Autor

**Grafica 2.** Diagrama de coagulación con turbiedad baja



**Fuente:** Autor

**Grafica 3.** Diagrama de coagulación con color bajo



**Fuente:** Autor

De la gráfica 2, se puede deducir la existencia de dos regiones distintas donde fueron conseguidos los resultados satisfactorios, como una remoción de turbidez del 94% para valores de pH entre 7 y 8.5 y dosis de sulfato de aluminio entre 12 y 20 mg/l, se presentó coagulación por barrido. Y con una remoción de turbidez del 94%, para valores de pH entre 6 y 7 y dosis de sulfato de aluminio entre 5.5 y 12 mg/ l se presenta una coagulación por adsorción neutralización. La curva sin modificación de pH se encuentra óptima en un punto con altas remociones de turbiedad con pH por debajo de 7.2 y dosis de sulfato de aluminio de 6 mg/l.

En la gráfica 3, fue posible deducir que al adicionar una dosis de coagulante de sulfato de aluminio entre 6 y 18 mg/l, y con pH entre 6 y 7.5 se obtiene una remoción de color del 96%.

### 5.1.2. Dosificación con Sulfato de Aluminio Liquido Tipo B –Turbiedad Alta.

Para el periodo lluvioso y manejando como coagulante el sulfato de aluminio, se construyeron diagramas de coagulación para dos calidades de agua con turbiedades y color altos, representados en las gráficas 4 a 7.

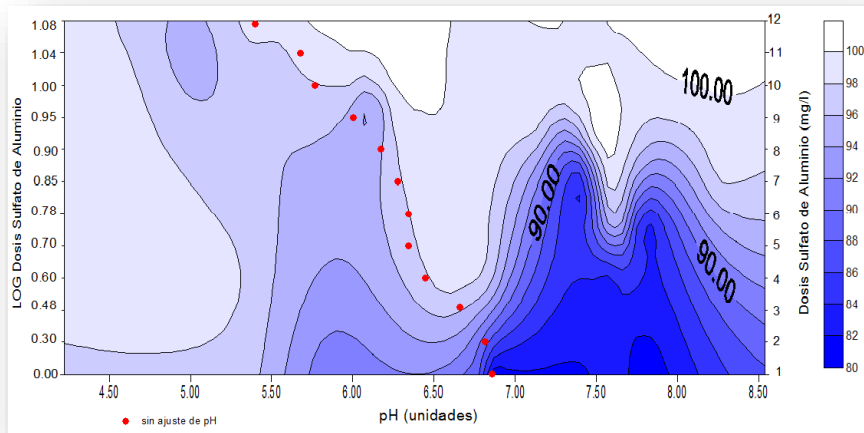
La curva roja sin modificación de pH, para las turbiedades más altas estuvo comprendida en su mayoría en pH ácidos.

*Tabla 13. Parámetros iniciales muestra de agua*

PARAMETRO	MEDICION
pH	7,18 unidades
Turbiedad	488 UNT
Color	1929 mg/l PT-Co
Alcalinidad	32 mg/CaCO <sub>3</sub>

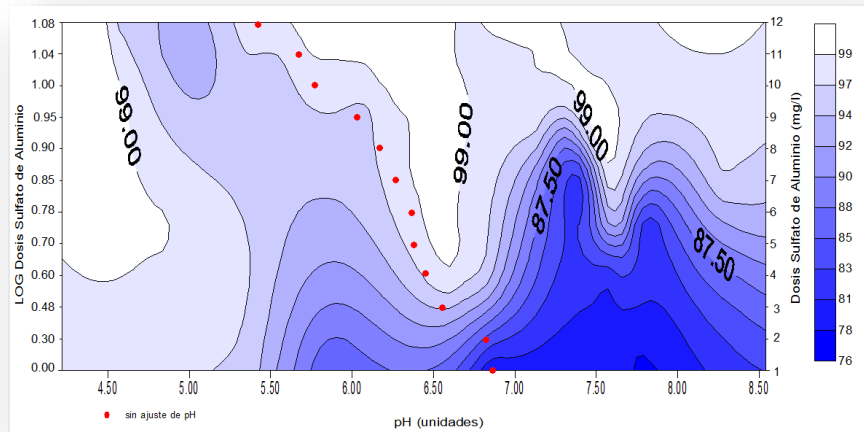
Fuente: Autor

**Grafica 4. Diagrama de coagulación con turbiedad alta**



**Fuente. Autor**

**Grafica 5. Diagrama de coagulación con color alto**



**Fuente: Autor**

En la gráfica 4, se trabajó la primera muestra de agua cruda de turbiedad alta, adicionando como coagulante el sulfato de aluminio, presentando una total remoción de turbiedad la gráfica 4, a través del mecanismo de barrido para pH

por debajo de 6.8, con dosis de coagulante entre 4 y 12 mg/l y para pH de 7.5 para dosis entre 7 y 12 mg/l de coagulante, y por último y no menos importante se presentó también una región de adsorción neutralización para pH entre 7.5 y 7.8 y dosis de coagulante entre 8 y 10 mg/l.

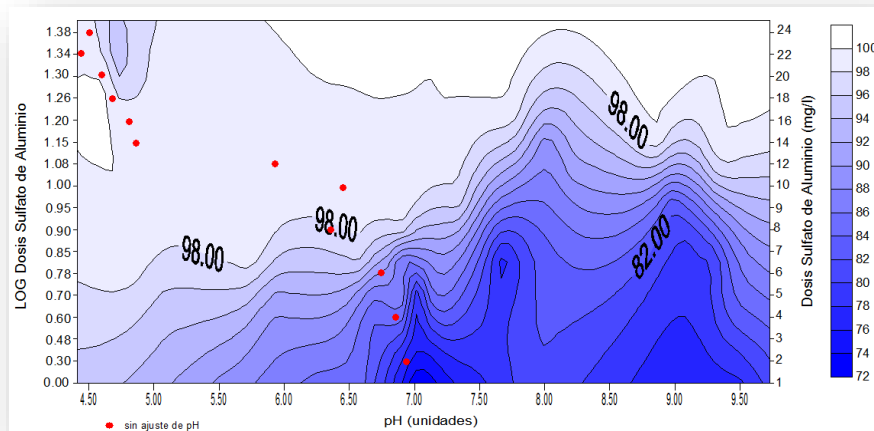
La grafica 5 presento alta remoción de color del 99%, para la curva sin ajuste de pH con una dosis de coagulante entre 4 y 12 mg/l con pH inferiores a 6.8. Lo que demuestra que cuando simultáneamente con el color se presenta la turbiedad la superficie de los coloides se hace mayor y esto estimula la adsorción de las moléculas de color.

**Tabla 14.** Parámetros iniciales muestra de agua

PARAMETRO	MEDICION
pH	7,65 unidades
Turbiedad	846 UNT
Color	2479 mg/l PT-Co
Alcalinidad	30 mg/CaCO <sub>3</sub>

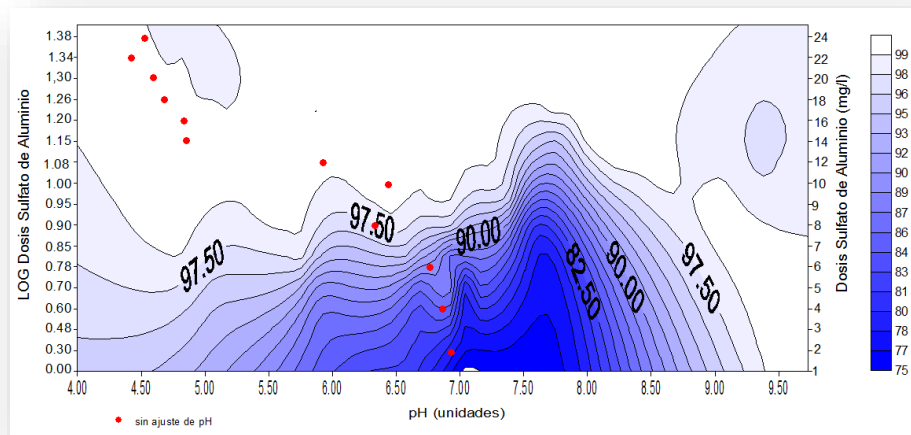
Fuente: Autor

**Grafica 6.** Diagrama de coagulación con turbiedad + alta



Fuente: Autor

**Grafica 7. Diagrama de coagulación con color + alto**



**Fuente:** Autor

La influencia efectiva del sulfato de aluminio en las turbiedades más altas de las muestras de agua recolectadas, fueron muy evidentes presentando un remoción de turbiedad superior al 90% para los rangos de pH entre 6 y 9.5 y dosis altas de coagulantes a partir altas de 18 mg/l en adelante lo que demuestra el predominio del mecanismo de barrido. En la gráfica 6 también se puede observar que con dosis entre 8 a 24 mg/l sin realizar ajuste de pH, se puede alcanzar remoción de turbiedad del 98%.

En la gráfica 7 se observa como a dosis de coagulante de sulfato de aluminio líquido de 8 a 24 mg/l sin ajustar el pH se obtiene una remoción de color del 97% y luego de corregir el pH superior a 9 se vuelve a presentar el mismo porcentaje de remoción de color, evidenciándose el uso de mayor cantidad de coagulante a un pH alcalino para remover el color en calidades de agua en periodos lluviosos donde se genere agua con alto color y alta turbiedad.

### 5.1.3. Dosificación con PAC –Turbiedad Baja.

El comportamiento del coagulante PAC, con parámetros de turbiedad y color del agua bajos se presentan en las gráficas 8 y 9. La curva punteada de color rojo muestra el comportamiento de la dosificación, sin modificadores de Ph, manteniéndose neutro.

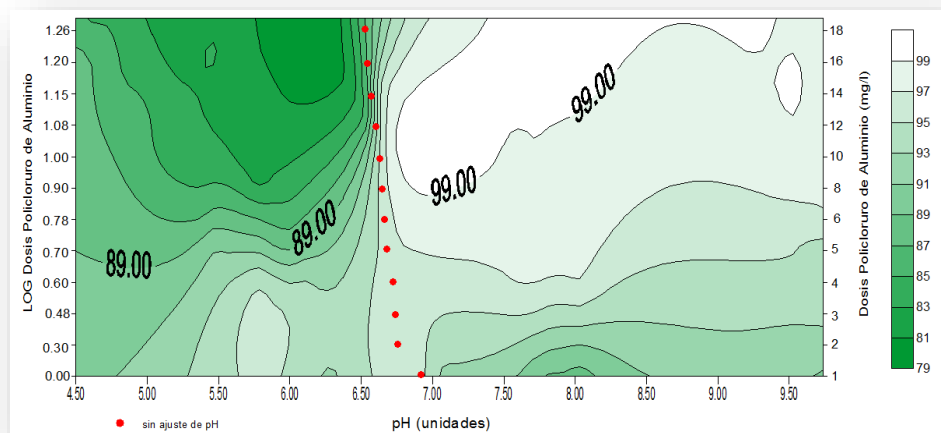
**Tabla 15. Parámetros iniciales muestra de agua**

PARAMETRO	MEDICION
-----------	----------

<b>pH</b>	7,22 unidades
<b>Turbiedad</b>	33,1 UNT
<b>Color</b>	60 mg/l PT-Co
<b>Alcalinidad</b>	32 mg/CaCO <sub>3</sub>

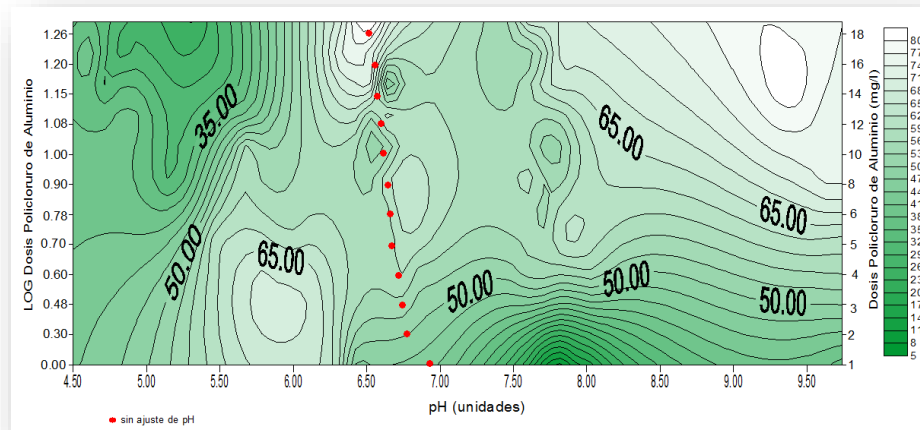
Fuente: Autor

**Grafica 8.** Diagrama de coagulación con turbiedad baja



Fuente: Autor

**Grafica 9.** Diagrama de coagulación con color bajo



Fuente: Autor

Es indiscutible que en la gráfica 8 la presencia de una región con remoción de turbiedad en un 99% para valores de pH entre 6.8 y 9.5, con dosis de coagulante PAC a partir de 10 mg/l, de igual manera se puede observar que al adicionar PAC con pH óptimos comprendidos entre 6.5 y 7 se alcanzan remociones de turbiedad en un 90% para dosis bajas entre 1 y 6 mg/l.

En la gráfica 9 se evidencia una remoción de color en un 80% para dosis altas de 18 mg/l, con pH de 9.5 presentando un mecanismo de barrido, de igual manera en la línea punteada color rojo sin modificadores de pH, se puede observar la presencia del igual mecanismo pero en la zona de pH alcalino de 6.5.

#### 5.1.4. Dosificación con PAC –Turbiedad Alta.

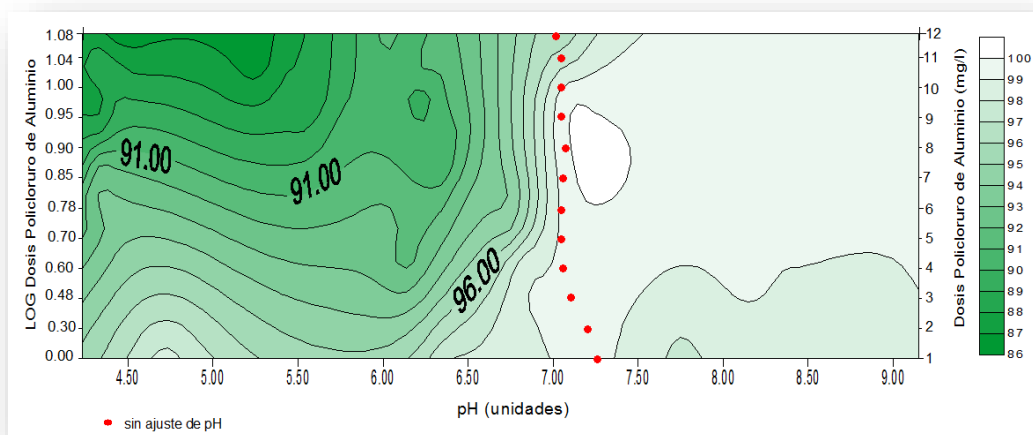
En el periodo lluvioso, se logró tratar de igual manera calidades de agua con turbiedad y color altos empleando como coagulante el PAC, y así obtener el comportamiento que se evidencia en las gráficas de la 10 a la 13 donde se trataron dos calidades de agua. La curva sin modificación de pH, muestra que el comportamiento del pH tiene tendencia a valores básicos.

**Tabla 16.** Parámetros iniciales muestra de agua

PARAMETRO	MEDICION
pH	7,16 unidades
Turbiedad	373 UNT
Color	1152 mg/l PT-Co
Alcalinidad	34 mg/CaCO <sub>3</sub>

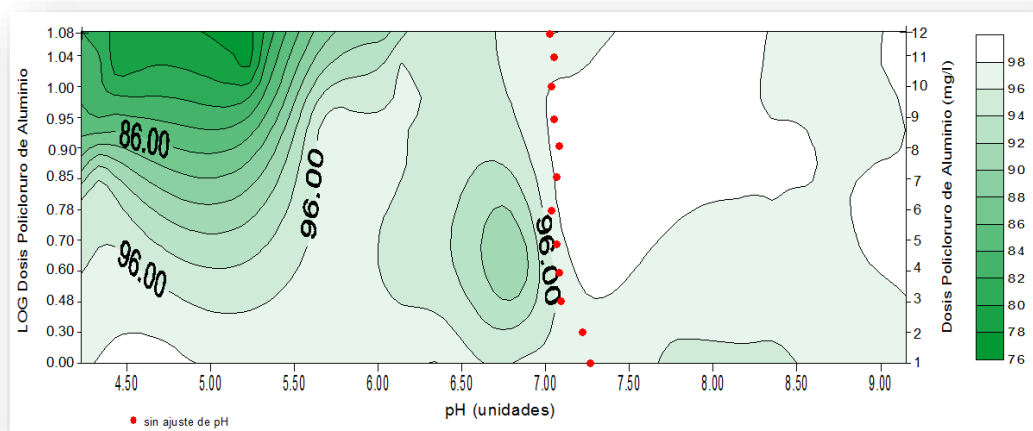
Fuente: Autor

**Grafica 10. Diagrama de coagulación con turbiedad alta**



**Fuente: Autor**

**Grafica 11. Diagrama de coagulación con color alto**



**Fuente: Autor**

A partir de estos diagramas de coagulación de turbiedad altas, se observa que al adicionar PAC en la gráfica 10, se obtiene una remoción de turbiedad en un 100% para pH entre 7 y 7.5 y dosis del coagulante entre 6 y 9 mg/l, observándose la obtención de una región de coagulación por adsorción-neutralización.

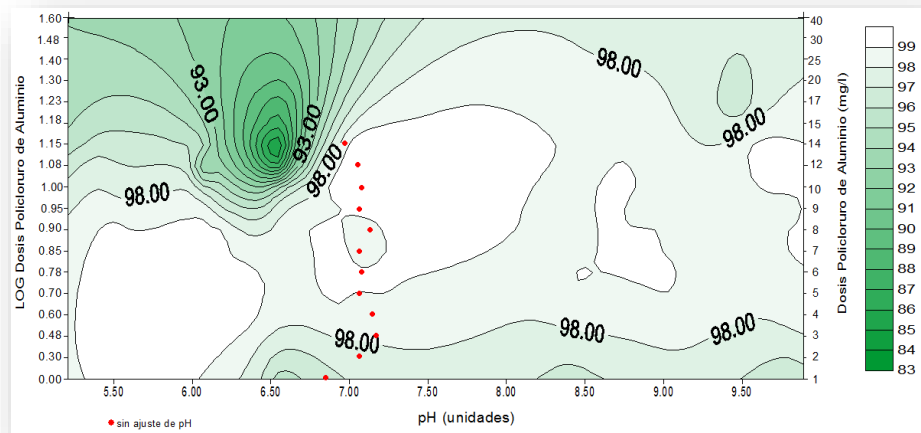
En la gráfica 11 se obtuvo una remoción de color superior al 98% para valores de pH entre 7 y 8.5 y dosificación de PAC entre 3 y 12 mg/l, esta zona descrita pertenece al mecanismo de barrido.

**Tabla 17. Parámetros iniciales muestra de agua**

PARAMETRO	MEDICION
pH	7,13 unidades
Turbiedad	876 UNT
Color	1544 mg/l PT-Co
Alcalinidad	32 mg/CaCO <sub>3</sub>

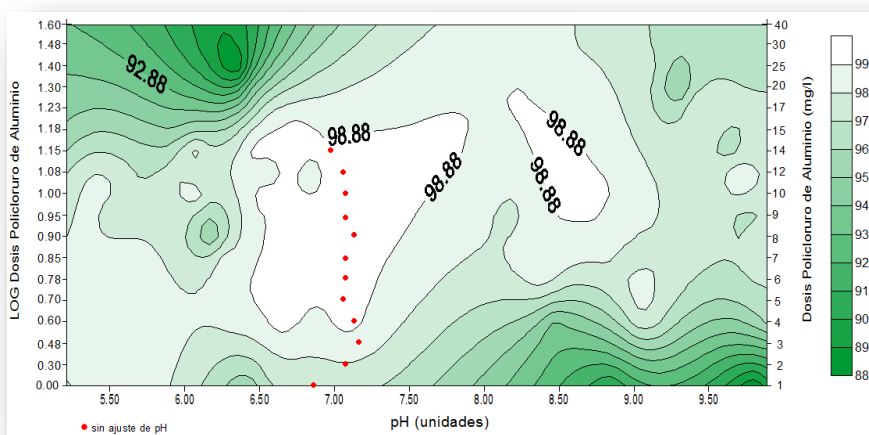
Fuente: Autor

**Gráfica 12. Diagrama de coagulación con turbiedad + alta**



Fuente: Autor

**Grafica 13. Diagrama de coagulación con color + alto**



**Fuente:** Autor

Para turbiedades más altas como se observa en el diagrama de coagulación de la gráfica 12, se evidencia la formación del mecanismo de adsorción neutralización, con un porcentaje de remoción del 98% en zonas para pH ácidos con dosis de coagulante baja (1 a 8 mg/l) y con dosis que van de 1 a 40 mg/l para pH de 5.5 a 9.5.

En el diagrama de la gráfica 13 se obtiene una remoción de color del 98.8%, en dos zonas, la primera para valores de pH entre 6.5 y 7.5 y dosis de coagulante entre 3 y 14 mg/l, cabe resaltar que en esta zona se evidencia la línea punteada en rojo que indica que no se ajustó el pH del agua, la segunda zona va de pH 8.5 a 9 y dosis de 9 a 17 mg/l.

## **ANALISIS**

Haciendo un análisis general del comportamiento de cada uno de los coagulantes utilizado y de la calidad de cada una de las muestras de agua cruda para las pruebas y generar los diagramas de coagulación, se puede decir:

Que tanto el sulfato de aluminio como el PAC, son coagulantes igualmente efectivos para las diferentes calidad de agua que son captadas en la PTAP DE Floridablanca, pero si se quiere detallar el comportamiento del agua frente a los mecanismos de coagulación se observó que las pruebas trabajadas con el sulfato de aluminio presentaban zonas tanto de barrido como de adsorción-

neutralización; y las aguas tratadas con el PAC presentaron total influencia de barrido.

En los diagramas de turbiedades altas, el PAC presenta mayor remoción de color y turbiedad a dosis bajas lo que indica que este coagulante a pesar de ser más costoso requiere menor gasto de dosificación, sin llegar a impactar en el pH del agua. Sin embargo el Sulfato de Aluminio se comportó bien para ambas turbiedades siempre y cuando el agua no traiga color alto ya que la dosificación alta del coagulante puede alterar el pH.

## **5.2. ETAPA 2: EVALUACION TECNICA-ECONOMICA DEL SISTEMA DE DOSIFICACION- COAGULACION.**

### **5.2.1. Evaluación Técnica del Sistema de Dosificación.**

La planta cuenta con un novedoso sistema de dosificación de productos químicos, este consiste en la dosificación de los mismos en forma totalmente líquida concentrada, sin la necesidad de que el operario tenga que disolver ninguno de ellos, evitando así riesgos por errada manipulación que pueden causar quemaduras químicas y eliminando del todo los tiempos requeridos para la preparación de químicos.

Los coagulantes líquidos que se utilizan en la planta antigua y nueva son el Sulfato de Aluminio líquido tipo B y el PAC.

El sistema que conforma el proceso de coagulación de la planta de tratamiento está compuesto por tanques de almacenamiento para la provisión de los productos, tanques aforadores y bombas de desplazamiento:

#### **5.2.1.1. Sistema de Almacenamiento.**

El sistema de almacenamiento cuenta con tres tanques cilíndricos de 30 m<sup>3</sup> verticales de fondo plano y cabezal superior abombado, para almacenamiento estático. Cada uno de los tanques tiene una base plana y uniforme usado como medida de seguridad ante algún derrame, fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio para contrarrestar la corrosión (Ver ilustración 6).

En dos de los tanques es almacenado el sulfato de aluminio líquido tipo B y en el tercer tanque el policloruro de aluminio, PAC. Junto a los tanques de almacenamiento se encuentran dos bombas de trasvase para suministrar el insumo químico a los tanques dosificadores.

Los tanques de almacenamiento están ubicados en el exterior, en forma triangular, se encuentran contiguos al floculador hidráulico de la planta nueva y las bombas de trasvase fronterizas al taller mecánico de la planta. (Ver anexo 7 planos de ubicación de la PTAP)

**Ilustración 5.** Tanques de almacenamiento



**Fuente:** Autor

Los dos tanques aforadores o dosificadores, son rectangulares de fondo y paredes planas con reborde superior estructural, tapa removible, diseñados para almacenamiento estático y fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio; están ubicados en la terraza (Ver ilustración 7).

**Ilustración 6.** Tanques aforadores



Fuente: Autor

### 5.2.1.2. Sistema de Dosificación.

El sistema de dosificación de químicos es completamente automatizado de tal forma que cuando ingresa agua cruda a la planta, se inicia automáticamente la dosificación de los químicos e igualmente cuando se suspende el ingreso de agua se deja de dosificar los químicos.

La determinación de la dosis a aplicar de coagulante. Se realiza a partir de la dosis óptima obtenida.

La dosis óptima se calcula:

$$\text{Descarga en ml/ min} = (DO * Q * 60/1000)$$

Dónde:

Do = Dosis optima en ppm

Q = caudal de entrada en l/s que registra el caudalímetro

60/1000 = descarga en ml/m

La dosificación de coagulantes líquidos, cuenta con cuatro bombas, dos para turbiedades altas y dos para turbiedades bajas, estas se encuentran ubicadas adyacentes a la bodega de aseo (Ver ilustración 8).

*Ilustración 7. Bombas dosificadoras de coagulantes*



**Fuente:** Autor

La aplicación de los coagulantes son impulsados por las bombas y transportados a través de tuberías que llegan directamente a la canaleta Parshall de la planta nueva y el Retromezclador de la planta antigua, aquí por medio de diferentes flautas (Ver ilustración 9), se aplica la solución de sulfato de aluminio líquido (tubería color café) y de PAC (tubería color naranja).

**Ilustración 8.** Flautas de aplicación del coagulante

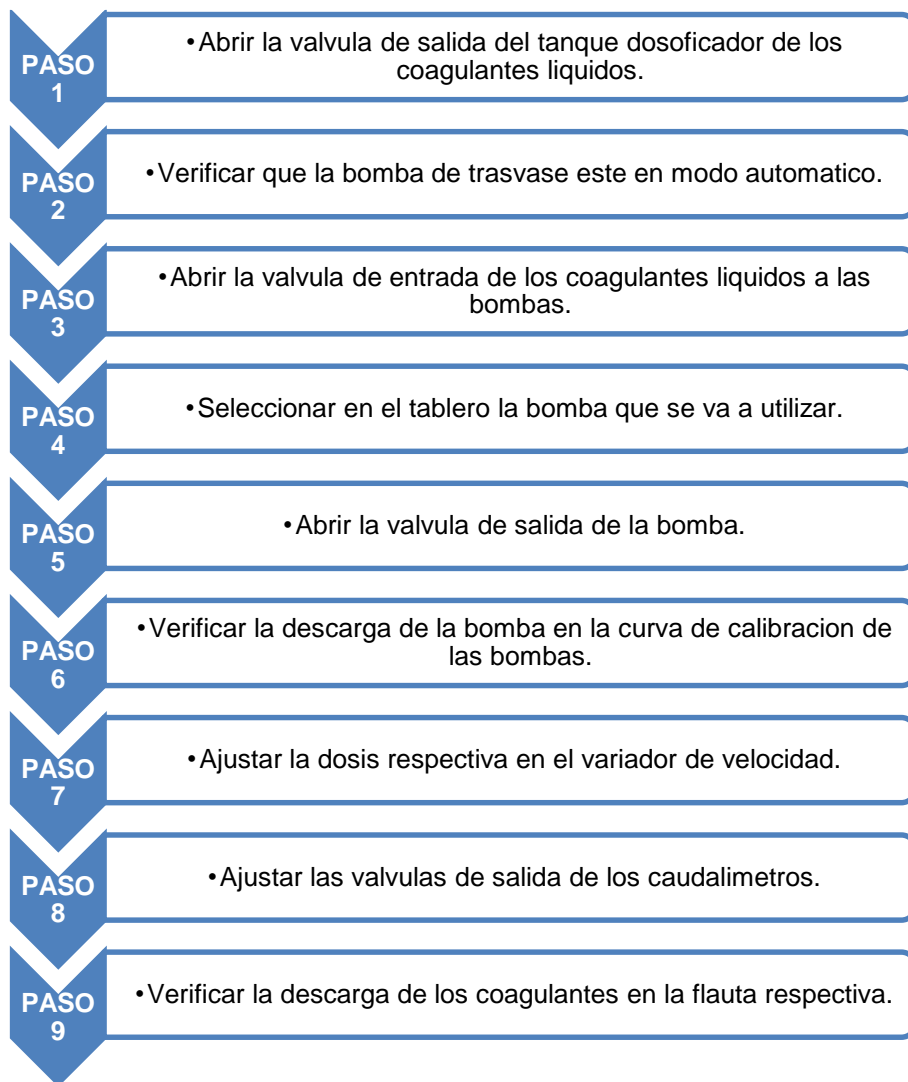


**Fuente:** Autor

La flauta, es una tubería con diámetro de 3/4 de pulgada, que miden aproximadamente 90 cm y cuenta con 12 orificios que se separan entre si cada 7 cm. Vale aclarar que esta forma de dosificación no afecta en ningún sentido la aplicación del coagulante.

La PTAP de Floridablanca, cuenta con un instructivo de dosificación de insumos químicos el cual opera de la siguiente manera [33].

**Figura 20.** Operación de la dosificación de coagulantes líquidos

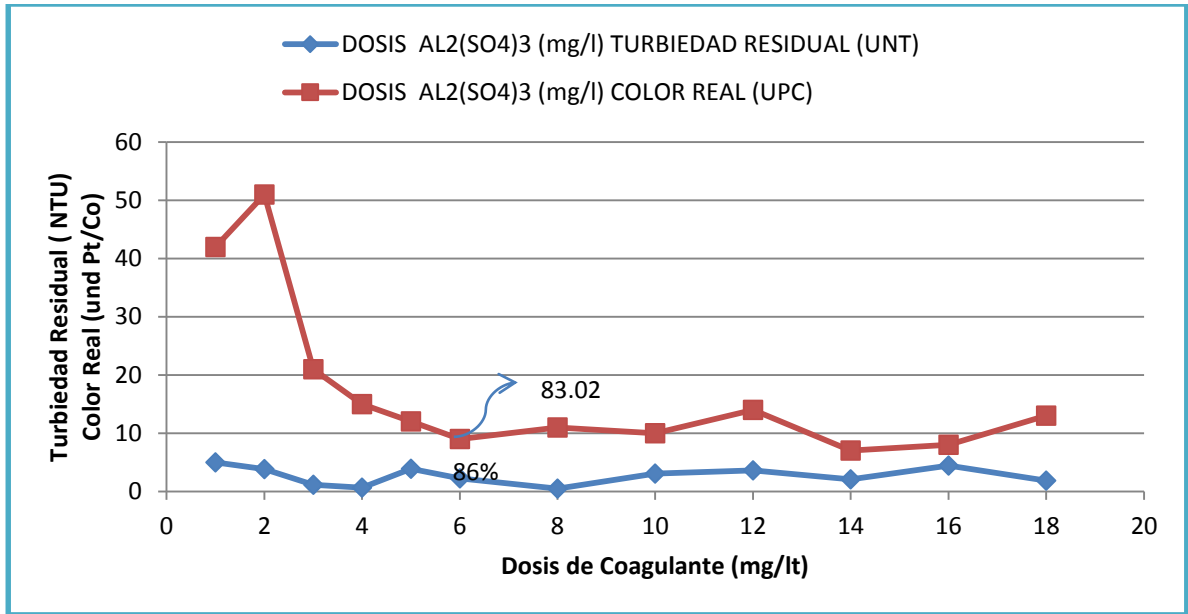


Fuente: Autor

### 5.2.2. Evaluación Económica del Sistema de Dosificación.

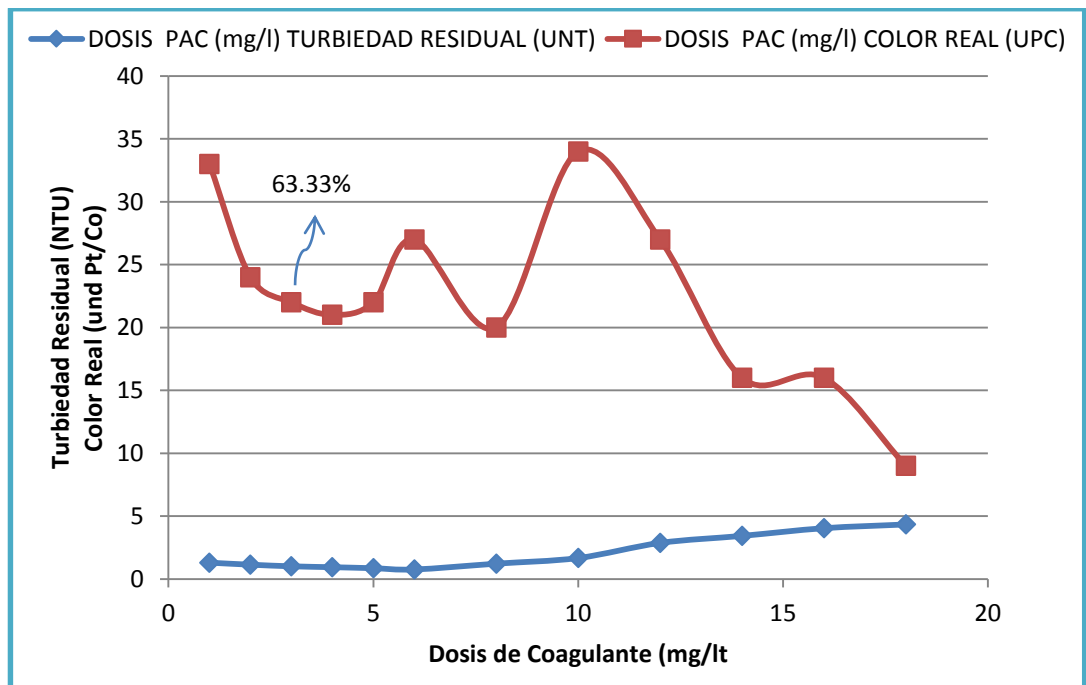
El análisis se realizó con base a los costos de los coagulantes y en los resultados obtenidos a nivel del laboratorio de las dosis óptimas para cada coagulante en condiciones de turbiedades bajas (condiciones normales en la PTAP).

**Grafica 14. Dosis de coagulante SALB**



Fuente: Autor

**Grafica 15. Dosis de coagulante PAC**



Fuente: Autor

En la planta de Floridablanca los coagulantes son suministrados por la empresa sulfoquímica S.A, los costos de estos reactivos se muestran en la tabla 22.

**Tabla 18.** Costo de SALB y PAC por kilogramos año 2014

	<b>SULFATO DE ALUMINIO LIQUIDO TIPO B</b>	<b>POLICLORURO DE ALUMINIO - PAC</b>
<b>COSTO (\$/Kg)</b>	400	1000
<b>IVA 16%</b>	64	160
<b>VALOR TOTAL</b>	464	1160

Fuente: Autor

### **Costo Mensual Para el Sulfato de Aluminio Liquido Tipo B.**

$$\left[ \frac{\$464}{Kg} \right] \left[ \frac{620 l}{Seg} \right] \left[ 6 \frac{mg}{l} \right] \left[ \frac{1 Kg}{10^6 mg} \right] \left[ \frac{86400 S}{dias} \right] \left[ \frac{30 dias}{1 mes} \right] = \$4.473.999 \text{ al mes}$$

### **Calculo de la Masa del Sulfato de Aluminio Liquido Tipo B Mensual.**

Masa SALB= 9.642 Kg al mes

### **Costo Mensual Para el PAC.**

$$\left[ \frac{\$1160}{Kg} \right] \left[ \frac{620 l}{Seg} \right] \left[ 3 \frac{mg}{l} \right] \left[ \frac{1 Kg}{10^6 mg} \right] \left[ \frac{86400 S}{dias} \right] \left[ \frac{30 dias}{1 mes} \right] = \$5.592.499 \text{ al mes}$$

### **Calculo de la Masa del PAC Mensual.**

Masa PAC= 4.821 Kg al mes

Estos datos muestran con total claridad que el costo más bajo lo obtiene el Sulfato de Aluminio liquido tipo B con un gasto mensual de aproximadamente 9.642 Kg en comparación que con el PAC que gastaría 4.821 Kg, dejando claro que esto sería para agua con turbiedades bajas.

Desde punto de vista económico resultaría más favorable el utilizar en la planta el Sulfato de Aluminio líquido tipo B ya que mensualmente genera un costo más reducido que el PAC, pero cabe resaltar por los resultados obtenidos de los diagramas de coagulación que el Policloruro de Aluminio se ajusta más para trabajar en las turbiedades altas de agua cruda (Ver tabla 23).

**Tabla 19.** Gasto de coagulante según presupuesto PTAP y evaluación económica

	<b>GASTO MENSUAL DE COAGULANTE SEGÚN PRESUPUESTO 2014</b>	<b>GASTO MENSUAL DE COAGULANTE SEGUN EVALUACION ECONOMICA</b>
<b>SULFATO DE ALUMINIO LIQUIDO TIPO B</b>	50.000 Kilos	9.642 kilos
<b>POLICLORURO DE ALUMINIO - PAC</b>	12.500 kilos	4.821 kilos

Fuente: Autor

En la tabla N° 10, se muestra el gasto de coagulante según el presupuesto de la planta de Floridablanca y según la evaluación económica que se realizó, que lo presupuestado está muy por encima de lo evaluado pero hay que dejar claro que la evaluación se hizo para un agua con características de turbiedad baja y que el presupuesto que hace la PTAP contempla el gasto de coagulante para cualquier calidad de agua cruda que ingrese a la planta para ser tratada.

### **5.3. ETAPA 3: EVALUACION HIDRAULICA DE LA MEZCLA RAPIDA.**

#### **5.3.1. Descripción de los Mezcladores de la PTAP de Floridablanca.**

La planta de Floridablanca realiza la mezcla rápida en dos formas, la sección antigua que trabaja con un Retromezclador y la sección de ampliación o planta nueva que trabaja con un mezclador de flujo pistón que es la canaleta Parshall.

Los mezcladores cumplen con la función de dispersar los coagulantes en toda la masa de agua a tratar lo más homogéneamente, mediante la agitación turbulenta por la energía cinética disipada en el resalto hidráulico de la canaleta Parshall y el

flujo de entrada del retro mezclador hidráulico, con el objetivo de desestabilizar las partículas presentes en el agua.

**Ilustración 9.** Retro mezclador sección antigua



**Fuente.** Autor

La canaleta Parshall construida en fibra de vidrio se empleo a partir del año 2009, para la seccion de ampliacion de la PTAP de Floridablanca, con un largo de aproximadamente 151 cm , el ancho de la entrada y salida tienen 84 cm y 61 cm respectivamente y una garganta de 30 cm de ancho.

**Ilustración 10.** Canaleta Parshall sección de ampliación



Fuente. Autor

### 5.3.2. Prueba de Trazadores- Canaleta Parshall.

En la tabla 18 se presentan los datos de la altura medida en la canaleta Parshall para cada caudal evaluado ( $H_a$ ), caudal de dosificación de trazador ( $q$ ), concentración de la solución trazadora ( $C_o$ ), concentración de sal a la salida de la canaleta ( $C_s$ ), caudal evaluado promedio suministrado por la planta ( $Q_e$ ) y caudal calculado a partir del balance de masas ( $Q_a$ ).

**Tabla 20.** Resultados obtenidos prueba de trazadores

Prueba	Qe (l/s)	Ha (m)	q (l/s)	C <sub>o</sub> (mg/L)	C <sub>s</sub> (mg/L)	Qa (l/s)
1	303	0.67	0,32	23.7	0.026	291
2	250	0.62	0,26	24.6	0.025	255
3	178	0.55	0,25	24.2	0.033	183
4	137	0.51	0,35	24.3	0.061	139

Fuente. Autor

La ecuación de la canaleta Parshall utilizada en la planta de tratamiento es la siguiente:

$$Qa = 2,2 b H_a^{3/2} \quad \text{o} \quad Qa = 0.67H_a^{3/2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Q = Caudal, m<sup>3</sup>/s

b = Ancho de garganta, 0.305 m.

Tomando los logaritmos de ambos miembros de la ecuación, se obtiene [12]:

$$\log Q = \log 0.67 + 1.5 \log H_a \quad \text{Ecuación 8}$$

La ecuación anterior tiene la siguiente forma:

$$\log Q_A = \log k_v + y \log H_a \quad \text{o} \quad y = A + Bx \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

$$y = \text{Log } Q_a$$

$$A = \text{Log } K_v$$

$$x = \text{Log } H_a$$

$$B = y$$

Aplicando la teoría de los mínimos cuadrados para los datos de log Ha y log Qa, se obtiene la siguiente ecuación:

$$y = 2,6946 x - 0.0509 \quad \text{ó} \quad \log Q_A = 2,6946 \log H_a - 0.0509 \quad \text{Ecuación 10}$$

De acuerdo a lo anterior, la ecuación de la canaleta Parshall que se obtiene a partir de la prueba de trazadores es:

$$Q_a = 0,89 H_a^{2,7} \quad \text{Ecuación 11}$$

En la siguiente tabla se presenta una comparación de los valores de caudal obtenidos con la ecuación de diseño de la canaleta y con la ecuación derivada del estudio de trazadores, para las diferentes alturas de nivel de agua medidas en la prueba.

**Tabla 21.** Caudales obtenidos de las ecuaciones

Ha (m)	Qa (ecuación 11) (l/s)	Qa (ecuación 7) (l/s)	Q (sistema electrónico) (l/s)
<b>0,67</b>	301,9	367,4	303
<b>0,62</b>	244,8	327,1	250
<b>0,55</b>	177,2	273,3	178
<b>0,509</b>	143,7	243,3	137

Fuente. Autor

A partir de los resultados obtenidos de la prueba de trazadores se evidencio que la ecuación que se obtuvo, comparada con la ecuación del diseño de la canaleta Parshall no coinciden, lo que nos lleva a deducir que el error puede estar en las modificaciones que se le han hecho a la canaleta o las variaciones que ha tenido con el transcurrir del tiempo.

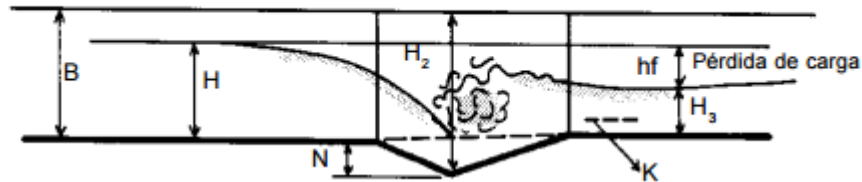
Sin embargo cabe resaltar que los valores obtenidos del caudal evaluado promedio suministrado por la planta ( $Q_e$ ) y los caudales obtenidos del balance de masas ( $Q_a$ ), coinciden en sus valores. De los resultados de la prueba de trazador se demuestra que la canaleta Parshall necesita modificar la ecuación de diseño.

### 5.3.3. Verificación del Gradiente y Tiempo de Mezcla – Canaleta Parshall.

El análisis hidráulico para la canaleta Parshall, localizada en la sección de ampliación de la planta. Se realizó a partir de la verificación teórica del Gradiente y

Tiempo de mezcla, a tres diferentes caudales utilizados en la planta, se midió las alturas para cada zona de la unidad con tres diferentes caudales

**Figura 21.** Canaleta Parshall



Fuente. L. Vargas [8]

En la tabla 20 se indica los resultados obtenidos para cada uno de los caudales que se modificaron para la mezcla rápida en la Canaleta Parshall.

**Tabla 22.** Verificación del funcionamiento de la canaleta Parshall

PARAMETROS	Q1	Q2	Q3
<b>Caudal Afluyente</b> Q (m <sup>3</sup> /s)	<b>0,15</b>	<b>0,246</b>	<b>0,307</b>
<b>Ancho Canal</b> b (m)	0,9	0,9	0,9
<b>Temperatura del Agua T</b> (°C)	20	20	20
<b>Viscosidad Cinemática v</b> (m <sup>2</sup> /s)	1,003 · 10 <sup>-6</sup>	1,003 · 10 <sup>-6</sup>	1,003 · 10 <sup>-6</sup>
<b>Profundidad Antes de la Caída P</b> (m)	0,36	0,395	0,43
<b>Caudal por Unidad de Ancho q</b> (m <sup>3</sup> /s/m)	0,166	0,273	0,341
<b>Altura crítica hc</b>	0,1411	0,196	0,228
<b>profundidad Lámina de agua y</b> (m)	0,218	0,199	0,202
<b>Altura conjugada h1</b>	0,071	0,104	0,123
<b>Altura conjugada h2</b>	0,248	0,333	0,381
<b>Velocidad V1</b>	2,338	2,625	2,772

<b>Velocidad V2</b>	0,669	0,819	0,895
<b>Velocidad Vm</b>	1,503	1,722	1,831
<b>Numero de Froude Nf</b>	2,8	2,59	2,52
<b>Perdida de Carga hf</b>	0,078	0,088	0,093
<b>Longitud del Resalto Xr</b>	1,062	1,374	1,548

Fuente: Autor

Desde el punto de vista de la literatura para conseguir un resalto estable el número de Froude debe estar comprendido entre estos dos rangos 1.7 a 2.5 o 4.5 a 9.0, [5]. Experimentalmente se obtuvo valores de Nf entre 2,5 y 2,8 para los diferentes caudales, lo que nos lleva a inducir que la canaleta Parshall está produciendo un resalto inestable el cual no permanece en su posición acarreado dificultad en la aplicación del coagulante.

**Tabla 23.** Tiempo de mezcla y gradiente de velocidad canaleta Parshall

<b>PARAMETROS</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>
<b>Tiempo de Mezcla t (s)</b>	0,706	0,795	0,845
<b>Gradiente de Velocidad G (s<sup>-1</sup>)</b>	1039,5	1039,1	1039,1

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos de la verificación experimental del tiempo de mezcla y gradiente de velocidad, en la canaleta Parshall para caudales de 150, 246 y 300 l/s se genera un gradiente de aproximadamente 1039 s<sup>-1</sup>, en un tiempo de mezcla entre 0,7 s y 0,84 s. Según Amirtharajah y Trussler (1986), hallaron que para mezcla por coagulación de barrido podrían seleccionarse gradientes de 400 a 800 s<sup>-1</sup>, tiempos de 30 a 180 s, y con coagulación por adsorción-desestabilización gradientes entre 1000 y 3000 s<sup>-1</sup> y tiempo de 1 a 5 s. Comparando los resultados con la literatura se evidencia que en la PTAP de Floridablanca la canaleta Parshall cumple con el gradiente de mezcla para el mecanismo de coagulación por adsorción neutralización, a diferencia del tiempo de mezcla que no está cumpliendo con los parámetros.

#### **5.4. ETAPA 4: ALTERNATIVAS.**

En general el proceso de coagulación de la Planta de Floridablanca está muy completo tanto en su sistema de mezcla rápida, como en la dosificación y en el almacenamiento de los coagulantes; ya que los resultados del estudio lo demuestran, se deben tener en cuenta que para mantener optimo este proceso en la PTAP de Floridablanca se deben tener constantemente en revisión las siguiente condiciones:

- Debe verificarse que la estructura de control de entrada permita el acceso del agua a la canaleta Parshall.
- Debe verificarse que la dosificación del coagulante se esté efectuando y esté realizándose por la flauta.
- Debe constatarse que la solución esté aplicándose uniformemente en el punto de máxima turbulencia.
- Debe evitarse que se produzcan grandes turbulencias, caídas y restricciones luego del punto de aplicación de la sustancia química.

De la eficiencia de este proceso dependen los rendimientos de todos los tratamientos posteriores al agua, como la sedimentación, la filtración y la desinfección.

ALTERNATIVA 1: A partir de los resultados de la pruebas de laboratorio se notó que la preparación de los reactivos debe realizarse en base del contenido de alúmina  $Al_2O_3$  que se encuentra presente en los dos coagulantes empleados sulfato de aluminio y PAC. Al preparar estos productos al 1% logra mejores resultados con una mejor dispersión, remoción de color y remoción de turbiedad del agua cruda que si se adicionan puros.

ALTERNATIVA 2: Se comprobó la alta eficiencia del alumbre para calidades de agua cruda con turbiedades y color bajos, que se trataron en la práctica del proyecto, el cual logra capturar la gran mayoría de los coloides y el color presente

en el agua. El sulfato logra alcanzar remoción de turbiedad y color superior al 90%, Sin embargo cabe resaltar que el sulfato de aluminio aporta color al agua.

ALTERNATIVA 3: Para calidades de agua con turbiedades y color altos, el PAC es la alternativa más viable para emplear en el proceso de coagulación, ya que según los resultados obtenidos demuestran la eficiencia y la calidad de agua que se logra obtener al ser tratada por este coagulante y la reducción de la dosis en comparación con el sulfato de aluminio y cabe resaltar que el policloruro de aluminio no aporta color al agua tratada lo que es beneficioso para este tipo de circunstancias.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales para determinar la dosis óptima de los coagulantes líquidos empleados en la planta de Floridablanca determinan que:

- Para turbiedades bajas la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio es de 6 mg/lit obteniendo una calidad aceptable del agua y para el PAC se obtuvo una dosis óptima de 18 mg/lit pero obteniendo un agua con turbiedad regular y color aceptable dentro de los parámetros establecidos según la Resolución 2115 de 2007.
- Para calidad de agua cruda con turbiedad alta, se obtuvo una dosis óptima empleando sulfato de aluminio de 8 mg/lit obteniendo un agua regular y para el PAC se obtuvo un agua aceptable con dosis óptima de 9 mg/lit.

La mayor parte de tiempo en la planta de Floridablanca se está tratando agua cruda con turbiedades bajas. Solo en épocas de invierno se encuentran turbiedades altas, lo que nos lleva a expresar que el Sulfato de Aluminio líquido tipo B se emplea con mayor frecuencia para calidades de agua poco turbia ya que los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio, indican que este se comporta muy bien en las turbiedades bajas a diferencia del PAC que obtuvo mejores resultados a partir de turbiedades muy altas.

El mecanismo de coagulación mediante canaleta Parshall, con el cual cuenta la planta, genera un gradiente de mezcla que se halla en el rango sugerido para el mecanismo de coagulación por adsorción- neutralización, y que no interfiere en el mecanismo de barrido mientras las condiciones químicas sean las adecuadas; a diferencia del tiempo de mezcla generado por la canaleta no es el indicado para eficiencia de los mecanismos de coagulación.

De la prueba de trazadores se deduce que la unidad de mezcla rápida – canaleta Parshall no está trabajando correctamente ya que la ecuación de verificación que se obtuvo a partir de los resultados de la prueba de trazadores no concuerda con la ecuación de diseño de la unidad.

En la Evaluación técnica-Económica del sistema de mezcla rápida y de los coagulantes se evidencio que las estructuras utilizadas permiten satisfacer las necesidades y cumplen con lo exigido según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000; Y en cuanto al estudio económico se ratificó que el costo de ambos coagulantes varia notablemente, y que el costo por litro de agua es más bajo cuando se utiliza para la potabilización el sulfato de aluminio liquido en turbiedades bajas y el PAC para turbiedades altas, pero esto se hace necesario ya que cada uno de ellos refleja su efectividad para diferentes calidades de agua que ingresan a la planta.

## **7. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar una inspección a la canaleta Parshall ya que por los resultados obtenidos de la parte experimental del trazador y obtención de la ecuación se obtuvo que esta no está funcionando adecuadamente.

Se recomienda calibrar la regleta que mide el caudal de entrada en la planta, ya que al momento de medir los caudales estos no coincidían con los que emitían en la cabina de control.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Plan de desarrollo del municipio de Piedecuesta 2012-2015
- [2] Departamento de Sanidad del Estado, Nueva York, *Manual de Tratamiento de Aguas*. Version Autorizada en Español. Mexico: Noriega, 2005. p.
- [3] ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. purificación del agua. 1 ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. p. 49
- [4] ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuípurificación. 1 ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, 1993. p. 31
- [5] J. Arboleda Valencia, Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. 3 ed. Bogotá: McGraw-Hill, 2000. P. 25,
- [6] A. Londoño, “Línea de profundización ambiental – I.Universidad Nacional de Colombia”. [En línea]. Disponible: [http://www.virtual.unal.edu.co/ccursos/sedes/manizales/4090020/files/pdf/ca\\_p\\_1+pdf](http://www.virtual.unal.edu.co/ccursos/sedes/manizales/4090020/files/pdf/ca_p_1+pdf).
- [7] Ministerio de Vivienda, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico: Título c, Sistema de Potabilización. Colombia, 2014-2018.
- [8] L. Vargas, V. Maldonado, A. Barrenechea, and M. Aurazo, *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Tomo I: Teoría*. lima: CEPIS, 2004.
- [9] Y. Cardenas, “Tratamiento de agua: Coagulación y floculación,” 2000. [en línea]. Disponible: [http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n y Floculaci%C3%B3n del Agua Potable.pdf](http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf). [Fecha de consulta:]
- [10] J. Perez, “Manual de tratamiento de aguas,” 1981. [En línea]. Disponible: [http://www.bdigital.unal.edu.co/70/2/45\\_-\\_1\\_Prel\\_1.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/70/2/45_-_1_Prel_1.pdf). [Fecha de consulta:].
- [11] Potabilización con Diferentes Coagulantes de Aluminio y Hierro. Congreso de Centroamérica y Panamá de Ingeniería Sanitaria y Ambiental “Superación Sanitaria y Ambiental: El Reto”. [En línea]. Disponible: <file:///C:/Users/TEMP.Usuario-PC/Downloads/Coagulacion.pdf>. [Fecha de consulta:]
- [12] L. Di Bernardo, A. Di Bernardo, “Métodos e Técnicas de Tratamiento de Agua. 2 ed. São Carlos, SP: Rima, 2005.

- [13] Potabilización con diferentes coagulantes de Aluminio y Hierro, XXII Congreso de Centroamérica y Panamá de ingeniería Sanitaria y Ambiental “El Reto”. [En línea]. Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia18.pdf>
- [14] Ings. Pérez, J.M.; Canepa de Varga , L.M & Richter., “COAGULACION I”. [En línea]. Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/016322/016322-01.pdf>
- [15] MINISTERIO DE SALUD. Decreto numero 475 de 1998. Republica de Colombia . Capítulos I y II.
- [16] TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE, Ciclo Integral del Agua . Canal de Isabel II Gestion. [En línea]. Disponible: <http://www.canaleduca.com/documents/10157/19805/Tratamiento+de+agua+potable>
- [17] ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. Instructivo de operación del sistema de captación y suministro de agua cruda del sistema de captación y suministro de agua cruda del sistema Río Frio a las plantas de Floridablanca. IPT 702-001. Procesos para la potabilización del agua.
- [18] PEREZ, Jorge Arturo. Manual de Potabilización del Agua en Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1990.
- [19] PEREZ MANCIPE, Daisy Johana. (2012). Evaluación técnica, económica y ambiental de coagulantes líquidos para la implementación de una nueva dosificación en la planta floridablanca del A.M.B. S.A. E.S.P.
- [20] SALCEDO SARMIENTO, María Consuelo. (2012). Estudio de aplicabilidad e implementación de coagulantes líquidos en la planta de tratamiento de agua de floridablanca del acueducto metropolitano de Bucaramanga a.m.b. S.A. E.S.P.
- [21] CAPACHO GUTIERREZ, Ariel.; URIBE JAIMES, Edinson Javier. (2005). Evaluación, diagnóstico y optimización de los procesos de la planta de tratamiento de agua potable de floridablanca ( Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.).
- [22] MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO. Planta de potabilización de agua superficial corregimiento “El Dos”. Turbo Antioquia, 2007.

- [23] ALVAREZ SANTOS, Maria Mercedes.(2014). Regulacion del sistema de tratamiento y suministro de agua potable de la planta de potabilizacion del municipio de Betuli- Acuabe.
- [24] CERON VIVAS, Alexandra, (2007). Manual de laboratorio de tratamiento de agua potable. Universidad pontificia BOLIVARIANA . Edicion 1.
- [25] PICO CRISTANCHO, Astrid.; SANCHEZ MORENO, Erika. (2015). Analisis tecnico – economico en la implementacion del sulfato de aluminio liquido tipo B en los procesos de coagulacion y floculacion, caso estudio: planta Morrónico.
- [26] MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Resolución 2115 de 2007. República de Colombia. Capitulo II.
- [27] RINNE, Tuomas. Memorias de XXII Congreso de Centroamerica y Panama de Ingenieria Sanitaria y Ambiental- “superacion sanitaria y ambiental: el reto”.
- [28] MALDONADO, V. (2000). Análisis De Flujos Y Factores Que Determinan Los Periodos De Retención. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-ms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualIII/capitulo2.pdf>
- [29] L. Vargas, V. Maldonado, A. Barrenechea, and M. Aurazo, *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Tomo III: Evaluacion de plantas de tecnologia apropiada*. lima: CEPIS, 2004.
- [30] Canepa de Varga , L.M & Richter., “COAGULACION I”. [En linea]. Disponible:<http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual4/cap2.pdf>
- [31] ARBOLEDA VALENCIA, Jorge A. Teoria, diseño y control de los procesos de clarificacion del agua.Tomo III: Conceptos modernos sobre el diseño de mezcladores y floculadores. [En linea]. Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-03a.pdf>
- [32] ASOCIACION AMERICANA DE SALUD PUBLICA. Metodos estandar para examen de agua y aguas residuales.
- [33] Instructivo de dosificacion de insumos quimicos en el tratamiento de planta de Floridablanca amb.

## ANEXOS

## ANEXO 1.

### RESULTADOS PRUEBAS DE JARRAS SULFATO DE ALUMINIO TURBIEDAD BAJA

parámetros iniciales del agua	VOLUMEN AL <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (ml)	DOSIS AL <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	pH después de coagulación	LOG DOSI S	TURBIEDAD CLARIFICADA (UNT)	%REMOCI ON TURBIDEZ	COLOR VERDADER O (UPC)	%REMO CION COLOR
pH del agua cruda	0.1	1	7.06	0.00	5	68.75	42	20.75
Turbiedad agua cruda UNT	0.2	2	7.03	0.30	3.82	76.13	51	3.77
16	0.3	3	6.81	0.48	1.15	92.81	21	60.38
color aparente UPC	0.4	4	6.74	0.60	0.64	96.00	15	71.70
53	0.5	5	6.67	0.70	3.91	75.56	12	77.36
Alcalinidad (mg/CaCO <sub>3</sub> )	0.6	6	7.01	0.78	2.24	86.00	9	83.02
32	0.8	8	5.55	0.90	0.49	96.94	11	79.25
	1	10	5.69	1.00	3.06	80.88	10	81.13
	1.2	12	5.47	1.08	3.63	77.31	14	73.58
	1.4	14	5.21	1.15	2.09	86.94	7	86.79
	1.5	16	4.96	1.20	4.45	72.19	8	84.91
	1.8	18	4.76	1.26	1.88	88.25	13	75.47
0.91	0.1	1	6.83	0.00	4.95	69.06	47	11.32
0.91	0.2	2	4.23	0.30	2.53	84.19	10	81.13
0.91	0.3	3	6.44	0.48	0.72	95.50	6	88.68
0.91	0.4	4	6.31	0.60	0.36	97.75	1	98.11
0.91	0.5	5	6.06	0.70	0.47	97.06	2	96.23
0.91	0.6	6	5.91	0.78	1.3	91.88	11	79.25
0.91	0.8	8	4.61	0.90	3.97	75.19	27	49.06
0.91	1	10	4.66	1.00	4.51	71.81	29	45.28
0.91	1.2	12	4.53	1.08	4.02	74.88	11	79.25
0.91	1.4	14	4.52	1.15	5.82	63.63	27	49.06
0.91	1.5	16	4.41	1.20	3.63	77.31	20	62.26
0.91	1.8	18	4.41	1.26	8.4	47.50	42	20.75
4.16	0.1	1	6.63	0.00	2.53	84.19	15	71.70
4.16	0.2	2	6.38	0.30	3.18	80.13	21	60.38
4.16	0.3	3	5.83	0.48	3.98	75.13	22	58.49
4.16	0.4	4	5.3	0.60	4.55	71.56	33	37.74

4.16	0.5	5	4.89	0.70	4.3	73.13	34	35.85
4.16	0.6	6	4.72	0.78	4.51	71.81	30	43.40
4.16	0.8	8	4.66	0.90	3.71	76.81	30	43.40
4.16	1	10	4.5	1.00	3.19	80.06	21	60.38
4.16	1.2	12	4.42	1.08	3.28	79.50	19	64.15
4.16	1.4	14	4.37	1.15	2.71	83.06	17	67.92
4.16	1.5	16	4.34	1.20	2.14	86.63	13	75.47
4.16	1.8	18	4.26	1.26	3.11	80.56	17	67.92
4.48	0.1	1	4.97	0.00	4.48	72.00	36	32.08
4.48	0.2	2	5.16	0.30	3.16	80.25	22	58.49
4.48	0.3	3	4.99	0.48	3.69	76.94	25	52.83
4.48	0.4	4	4.63	0.60	2.66	83.38	20	62.26
4.48	0.5	5	4.68	0.70	2.53	84.19	23	56.60
4.48	0.6	6	4.63	0.78	2.34	85.38	17	67.92
4.48	0.8	8	4.05	0.90	2.74	82.88	22	58.49
4.48	1	10	4.42	1.00	3.06	80.88	23	56.60
4.48	1.2	12	4.36	1.08	2.81	82.44	25	52.83
4.48	1.4	14	4.31	1.15	2.22	86.13	10	81.13
4.48	1.5	16	4.25	1.20	3.14	80.38	27	49.06
4.48	1.8	18	4.3	1.26	2.11	86.81	13	75.47
1	0.1	1	7.4	0.00	2.77	82.69	32	39.62
1	0.2	2	7.19	0.30	2.97	81.44	33	37.74
1	0.3	3	7.09	0.48	2.72	83.00	26	50.94
1	0.4	4	6.98	0.60	0.34	97.88	4	92.45
1	0.5	5	6.9	0.70	0.53	96.69	7	86.79
1	0.6	6	6.85	0.78	0.44	97.25	3	94.34
1	0.8	8	6.75	0.90	3.54	77.88	4	92.45
1	1	10	6.62	1.00	2.07	87.06	6	88.68
1	1.2	12	6.39	1.08	2.97	81.44	9	83.02
1	1.4	14	6.37	1.15	2.95	81.56	11	79.25
1	1.5	16	5.48	1.20	2.73	82.94	10	81.13
1	1.8	18	5.18	1.26	3.16	80.25	17	67.92
2	0.1	1	8.02	0.00	2.97	81.44	36	32.08
2	0.2	2	7.84	0.30	3.17	80.19	31	41.51
2	0.3	3	7.98	0.48	3.25	79.69	32	39.62
2	0.4	4	7.88	0.60	3.07	80.81	30	43.40
2	0.5	5	7.69	0.70	2.83	82.31	27	49.06
2	0.6	6	7.56	0.78	0.57	96.44	8	84.91
2	0.8	8	7.48	0.90	0.26	98.38	5	90.57
2	1	10	7.34	1.00	0.37	97.69	1	98.11

2	1.2	12	7.14	1.08	0.49	96.94	4	92.45
2	1.4	14	6.94	1.15	1.3	91.88	8	84.91
2	1.5	16	6.76	1.20	1.03	93.56	15	71.70
2	1.8	18	6.51	1.26	2.76	82.75	29	45.28
4	0.1	1	8.83	0.00	4.12	74.25	47	11.32
4	0.2	2	8.66	0.30	4.4	72.50	46	13.21
4	0.3	3	8.28	0.48	4.23	73.56	48	9.43
4	0.4	4	8.29	0.60	4.35	72.81	51	3.77
4	0.5	5	8.35	0.70	4.3	73.13	49	7.55
4	0.6	6	8.37	0.78	1.81	88.69	36	32.08
4	0.8	8	8.13	0.90	0.7	95.63	24	54.72
4	1	10	7.42	1.00	1.71	89.31	25	52.83
4	1.2	12	7.36	1.08	0.5	96.88	15	71.70
4	1.4	14	7.22	1.15	0.32	98.00	10	81.13
4	1.5	16	7.11	1.20	0.28	98.25	8	84.91
4	1.8	18	6.99	1.26	0.92	94.25	6	88.68

Fuente. Autor

## ANEXO 2.

### RESULTADOS PRUEBAS DE JARRAS SULFATO DE ALUMINIO TURBIEDAD ALTA

parámetros iniciales del agua								
pH del agua cruda	VOLUMEN AL <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (ml)	DOSIS AL <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	pH después de coagulación	LOG DOS IS	TURBIEDAD CLARIFICADA (UNT)	%REMO CION TURBIDEZ	COLOR VERDADER O (UPC)	%REMO CION COLOR
7.18	0.1	1	6.85	0.00	94.7	80.59	416	78.43
Turbiedad agua cruda UNT	0.2	2	6.82	0.30	9.24	98.11	68	96.47
488	0.3	3	6.56	0.48	2.08	99.57	21	98.91
color aparente UPC	0.4	4	6.46	0.60	3.7	99.24	20	98.96
1929	0.5	5	6.37	0.70	1.43	99.71	15	99.22
Alcalinidad (mg/CaCO <sub>3</sub> )	0.6	6	6.37	0.78	2.22	99.55	25	98.70
32	0.7	7	6.28	0.85	1.27	99.74	15	99.22
	0.8	8	6.18	0.90	2.86	99.41	14	99.27
	0.9	9	6.02	0.95	2.34	99.52	17	99.12
	1	10	5.79	1.00	2.99	99.39	14	99.27
	1.1	11	5.69	1.04	2.6	99.47	16	99.17
	1.2	12	5.41	1.08	3.71	99.24	21	98.91
2.08	0.1	1	6.8	0.00	61.5	87.40	383	80.15
2.08	0.2	2	6.58	0.30	3.3	99.32	14	99.27
2.08	0.3	3	6.52	0.48	2.5	99.49	5	99.74
2.08	0.4	4	6.45	0.60	3.97	99.19	10	99.48
2.08	0.5	5	6.38	0.70	2.58	99.47	3	99.84
2.08	0.6	6	6.29	0.78	4.55	99.07	22	98.86
2.08	0.7	7	6.12	0.85	36.2	92.58	67	96.53
2.08	0.8	8	6.02	0.90	9.98	97.95	52	97.30
2.08	0.9	9	5.5	0.95	18.5	96.21	95	95.08
2.08	1	10	5.04	1.00	25.4	94.80	143	92.59
2.08	1.1	11	4.85	1.04	20	95.90	117	93.93
2.08	1.2	12	4.57	1.08	14.4	97.05	79	95.90
5.83	0.1	1	5.86	0.00	47.1	90.35	289	85.02
5.83	0.2	2	5.26	0.30	7.28	98.51	34	98.24
5.83	0.3	3	4.85	0.48	3.9	99.20	16	99.17
5.83	0.4	4	4.59	0.60	3.08	99.37	12	99.38

AJUSTE DE pH (4.52) ACIDO	5.83	0.5	5	4.58	0.70	3.25	99.33	10	99.48
	5.83	0.6	6	4.55	0.78	2.45	99.50	6	99.69
	5.83	0.7	7	4.57	0.85	3.02	99.38	7	99.64
	5.83	0.8	8	4.49	0.90	2.4	99.51	6	99.69
	5.83	0.9	9	4.48	0.95	2.36	99.52	8	99.59
	5.83	1	10	4.52	1.00	2.28	99.53	7	99.64
	5.83	1.1	11	4.48	1.04	2.41	99.51	9	99.53
	5.83	1.2	12	4.5	1.08	2.73	99.44	9	99.53
	7.5	0.1	1	5.37	0.00	16	96.72	85	95.59
	7.5	0.2	2	4.76	0.30	6.15	98.74	24	98.76
	7.5	0.3	3	4.45	0.48	4.82	99.01	5	99.74
	7.5	0.4	4	4.31	0.60	5.02	98.97	14	99.27
	7.5	0.5	5	4.32	0.70	4.14	99.15	8	99.59
7.5	0.6	6	4.32	0.78	3.99	99.18	22	98.86	
7.5	0.7	7	4.31	0.85	2.41	99.51	9	99.53	
7.5	0.8	8	4.24	0.90	1.63	99.67	6	99.69	
7.5	0.9	9	4.3	0.95	1.97	99.60	1	99.95	
7.5	1.9	10	4.31	1.00	1.62	99.67	0	100.00	
7.5	1.1	11	4.22	1.04	1.93	99.60	2	99.90	
7.5	1.2	12	4.25	1.08	2.61	99.47	6	99.69	
AJUSTE DE pH (9.97) ALCALINO	4.5	0.1	1	8.54	0.00	60.4	87.62	328	83.00
	4.5	0.2	2	8.39	0.30	40.6	91.68	238	87.66
	4.5	0.3	3	8.5	0.48	19	96.11	122	93.68
	4.5	0.4	4	8.26	0.60	7.55	98.45	65	96.63
	4.5	0.5	5	8.27	0.70	4.75	99.03	56	97.10
	4.5	0.6	6	8.36	0.78	2.93	99.40	46	97.62
	4.5	0.7	7	7.96	0.85	3.52	99.28	46	97.62
	4.5	0.8	8	7.81	0.90	2.51	99.49	41	97.87
	4.5	0.9	9	7.67	0.95	2.35	99.52	44	97.72
	4.5	1	10	7.48	1.00	1.38	99.72	35	98.19
	4.5	1.1	11	7.45	1.04	1.92	99.61	34	98.24
	4.5	1.2	12	7.43	1.08	2.41	99.51	41	97.87
AJUSTE DE pH (8.95) ALCALINO	2.3	0.1	1	7.72	0.00	97.2	80.08	435	77.45
	2.3	0.2	2	7.62	0.30	87.1	82.15	380	80.30
	2.3	0.3	3	7.79	0.48	84.8	82.62	369	80.87
	2.3	0.4	4	7.43	0.60	85.9	82.40	380	80.30
	2.3	0.5	5	7.3	0.70	49.7	89.82	269	86.05
	2.3	0.6	6	7.14	0.78	4.77	99.02	36	98.13
	2.3	0.7	7	7.04	0.85	1.05	99.78	24	98.76
	2.3	0.8	8	6.99	0.90	2.56	99.48	21	98.91

AJUSTE DE pH (8,10) ALCALINO	2.3	0.9	9	7	0.95	1.22	99.75	25	98.70
	2.3	1	10	6.96	1.00	4.06	99.17	22	98.86
	2.3	1.1	11	6.88	1.04	4.07	99.17	22	98.86
	2.3	1.2	12	6.7	1.08	3.44	99.30	27	98.60
	1.21	0.1	1	7.68	0.00	79.6	83.69	372	80.72
	1.21	0.2	2	7.64	0.30	69.1	85.84	315	83.67
	1.21	0.3	3	7.62	0.48	12.1	97.52	84	95.65
	1.21	0.4	4	7.56	0.60	3.68	99.25	29	98.50
	1.21	0.5	5	7.49	0.70	2.47	99.49	28	98.55
	1.21	0.6	6	7.45	0.78	3.48	99.29	28	98.55
	1.21	0.7	7	7.38	0.85	2.88	99.41	21	98.91
	1.21	0.8	8	7.32	0.90	1.92	99.61	19	99.02
	1.21	0.9	9	7.23	0.95	1.63	99.67	15	99.22
	1.21	1	10	7.16	1.00	1.36	99.72	20	98.96
	1.21	1.1	11	6.91	1.04	1.58	99.68	18	99.07
	1.21	1.2	12	6.82	1.08	1.04	99.79	18	99.07

Fuente. Autor

### ANEXO 3.

## RESULTADOS PRUEBAS DE JARRAS SULFATO DE ALUMINIO TURBIEDAD + ALTA

parámetros iniciales del agua								
pH del agua cruda	VOLUME N PAC (ml)	DOSIS PAC (mg/l)	pH después de coagulación	LOG DOSI S	TURBIEDAD CLARIFICADA (UNT)	%REMOCI ON TURBIDEZ	COLOR VERDADER O (UPC)	%REMOC ION COLOR
7.65	0.2	2	6.92	0.30	96.1	88.64	254	89.75
<b>Turbiedad agua cruda UNT</b>	0.4	4	6.89	0.60	31.9	96.23	59	97.62
846	0.6	6	6.74	0.78	4.08	99.52	22	99.11
<b>color aparente UPC</b>	0.8	8	6.32	0.90	3.54	99.58	14	99.44
2479	1	10	6.45	1.00	4.11	99.51	15	99.39
<b>Alcalinidad (mg/CaCO3)</b>	1.2	12	5.91	1.08	7.91	99.07	30	98.79
30	1.4	14	4.88	1.15	8	99.05	16	99.35
	1.6	16	4.81	1.20	7.48	99.12	15	99.39
	1.8	18	4.69	1.26	6.4	99.24	24	99.03
	2	20	4.6	1.30	15.4	98.18	19	99.23
	2.2	22	4.41	1.34	7.13	99.16	13	99.48
	2.4	24	4.51	1.38	9.7	98.85	15	99.39
	0.2	2	7.13	0.30	111	86.88	404	83.70
0.66	0.4	4	6.87	0.60	7.85	99.07	50	97.98
0.66	0.6	6	6.13	0.78	3.81	99.55	13	99.48
0.66	0.8	8	5.96	0.90	5.28	99.38	12	99.52
0.66	1	10	5.58	1.00	5.79	99.32	22	99.11
0.66	1.2	12	5.15	1.08	10.5	98.76	30	98.79
0.66	1.4	14	4.88	1.15	27.3	96.77	26	98.95
0.66	1.6	16	4.76	1.20	64.8	92.34	27	98.91
0.66	1.8	18	4.71	1.26	44	94.80	33	98.67
0.66	2	20	4.62	1.30	51.2	93.95	48	98.06
0.66	2.2	22	4.55	1.34	11.7	98.62	23	99.07
0.66	2.4	24	4.54	1.38	16.4	98.06	26	98.95
	7.33	0.1	6.27	0.00	125	85.22	437	82.37
	7.33	0.2	5.9	0.30	80.2	90.52	306	87.66
	7.33	0.3	5.76	0.48	5.1	99.40	34	98.63
	7.33	0.4	5.46	0.60	4.49	99.47	18	99.27

AJUSTE DE pH (6.42) ACIDO	7.33	0.5	5	5.31	0.70	5.33	99.37	20	99.19
	7.33	0.6	6	5.04	0.78	4.67	99.45	12	99.52
	2.5	0.1	1	6.59	0.00	127	84.99	445	82.05
	2.5	0.2	2	6.67	0.30	132	84.40	407	83.58
	2.5	0.3	3	6.57	0.48	26.4	96.88	111	95.52
	2.5	0.4	4	6.45	0.60	15.2	98.20	27	98.91
	2.5	0.5	5	6.28	0.70	10.3	98.78	17	99.31
	2.5	0.6	6	6.1	0.78	2.18	99.74	24	99.03
	2.5	0.7	7	5.54	0.85	7.48	99.12	14	99.44
	2.5	0.8	8	5.28	0.90	6.03	99.29	13	99.48
	2.5	0.9	9	4.9	0.95	3.87	99.54	10	99.60
	2.5	1	10	5.01	1.00	7.91	99.07	17	99.31
	2.5	1.2	12	4.69	1.08	4.77	99.44	10	99.60
	2.5	1.4	14	4.64	1.15	3.22	99.62	5	99.80
AJUSTE DE pH (7.24) ACIDO	5.5	0.1	1	5.51	0.00	88.5	89.54	275	88.91
	5.5	0.2	2	5.08	0.30	40.5	95.21	127	94.88
	5.5	0.3	3	4.8	0.48	4.03	99.52	18	99.27
	5.5	0.4	4	4.62	0.60	2.18	99.74	9	99.64
	5.5	0.5	5	4.53	0.70	4.24	99.50	7	99.72
	5.5	0.6	6	4.46	0.78	1.68	99.80	11	99.56
AJUSTE DE pH (8.03) ALCALINO	0.41	0.1	1	7.04	0.00	240	71.63	630	74.59
	0.41	0.2	2	7.04	0.30	225	73.40	603	75.68
	0.41	0.3	3	6.91	0.48	118	86.05	324	86.93
	0.41	0.4	4	6.9	0.60	5.39	99.36	28	98.87
	0.41	0.5	5	6.79	0.70	5.87	99.31	18	99.27
	0.41	0.6	6	6.64	0.78	2.08	99.75	17	99.31
	0.41	0.7	7	6.39	0.85	5.47	99.35	16	99.35
	0.41	0.8	8	6.07	0.90	8.55	98.99	15	99.39
	0.41	0.9	9	6.03	0.95	5.59	99.34	13	99.48
	0.41	1	10	5.04	1.00	6.43	99.24	13	99.48
	0.41	1.2	12	5.52	1.08	6.88	99.19	22	99.11
	0.41	1.4	14	5	1.15	10.7	98.74	33	98.67
AJUSTE DE pH (9.03) ALCALINO	1.66	0.1	1	7.92	0.00	152	82.03	557	77.53
	1.66	0.2	2	7.86	0.30	154	81.80	532	78.54
	1.66	0.3	3	7.68	0.48	194	77.07	559	77.45
	1.66	0.4	4	7.56	0.60	120	85.82	466	81.20
	1.66	0.5	5	7.36	0.70	25.8	96.95	69	97.22
	1.66	0.6	6	7.24	0.78	13.6	98.39	33	98.67
	1.66	0.7	7	7.03	0.85	5	99.41	19	99.23
	1.66	0.8	8	6.87	0.90	6.16	99.27	17	99.31

	1.66	0.9	9	6.77	0.95	3.17	99.63	18	99.27	
	1.66	1	10	6.6	1.00	2.62	99.69	16	99.35	
	1.66	1.2	12	6.05	1.08	4	99.53	13	99.48	
	1.66	1.4	14	5.94	1.15	4.68	99.45	13	99.48	
AJUSTE DE pH (9,9) ALCALINO	4.16	0.1	1	9.49	0.00	191	77.42	5.52	99.78	
	4.16	0.2	2	9.44	0.30	136	83.92	5.43	99.78	
	4.16	0.3	3	9.3	0.48	164	80.61	5.46	99.78	
	4.16	0.4	4	9.1	0.60	160	81.09	5.67	99.77	
	4.16	0.5	5	8.97	0.70	138	83.69	4.43	99.82	
	4.16	0.6	6	8.63	0.78	68.5	91.90	3.43	99.86	
	4.16	0.7	7	8.2	0.85	70.9	91.62	2.71	99.89	
	4.16	0.8	8	8.02	0.90	97.5	88.48	3.72	99.85	
	4.16	0.9	9	7.77	0.95	26.4	96.88	120	95.16	
	4.16	1	10	7.75	1.00	8.14	99.04	33	98.67	
	4.16	1.2	12	7.36	1.08	1.31	99.85	14	99.44	
	4.16	1.4	14	7.1	1.15	1.14	99.87	10	99.60	
	AJUSTE DE pH (9,9) ACIDIFICACION	10	0.7	7	9.34	0.85	7.33	99.13	78	96.85
		10	0.8	8	8.84	0.90	6.35	99.25	72	97.10
10		0.9	9	9.71	0.95	4.78	99.43	55	97.78	
10		1	10	9.73	1.00	3.08	99.64	53	97.86	
10		1.2	12	9.2	1.08	7.36	99.13	52	97.90	
10		1.4	14	9.26	1.15	3.61	99.57	56	97.74	

Fuente. Autor

## ANEXO 4.

### RESULTADOS PRUEBAS DE JARRAS PAC TURBIEDAD BAJA

parámetros iniciales del agua									
	pH del agua cruda	VOLUME N PAC (ml)	DOSIS PAC (mg/l)	pH después de coagulación	LOG DOSI S	TURBIEDAD CLARIFICADA (UNT)	%REMOCI ON TURBIDEZ	COLOR VERDADER O (UPC)	%REMOC ION COLOR
SIN AJUSTE DE Ph	7.22	0.1	1	6.92	0.00	1.3	96.07	33	45.00
	Turbiedad agua cruda UNT	0.2	2	6.78	0.30	1.14	96.56	24	60.00
	33.1	0.3	3	6.74	0.48	1.01	96.95	22	63.33
	color aparente UPC	0.4	4	6.71	0.60	0.94	97.16	21	65.00
	60	0.5	5	6.69	0.70	0.86	97.40	22	63.33
	Alcalinidad (mg/CaCO3)	0.6	6	6.67	0.78	0.76	97.70	27	55.00
	32	0.8	8	6.65	0.90	1.22	96.31	20	66.67
		1	10	6.62	1.00	1.67	94.95	34	43.33
		1.2	12	6.6	1.08	2.87	91.33	27	55.00
		1.4	14	6.57	1.15	3.43	89.64	16	73.33
		1.5	16	6.55	1.20	4.04	87.79	16	73.33
		1.8	18	6.52	1.26	4.34	86.89	9	85.00
AJUSTE DE pH (6.58) ACIDO	0.42	0.1	1	7.03	0.00	2.44	92.63	34	43.33
	0.42	0.2	2	6.8	0.30	1.68	94.92	28	53.33
	0.42	0.3	3	6.73	0.48	1.27	96.16	26	56.67
	0.42	0.4	4	6.64	0.60	1.49	95.50	25	58.33
	0.42	0.5	5	6.62	0.70	1.68	94.92	24	60.00
	0.42	0.6	6	6.59	0.78	2.35	92.90	31	48.33
	0.42	0.8	8	6.56	0.90	4.57	86.19	29	51.67
	0.42	1	10	6.53	1.00	4.45	86.56	14	76.67
	0.42	1.2	12	6.5	1.08	5.88	82.24	20	66.67
	0.42	1.4	14	6.45	1.15	5.59	83.11	15	75.00
	0.42	1.5	16	6.37	1.20	6.22	81.21	11	81.67
	0.42	1.8	18	6.34	1.26	6.55	80.21	18	70.00
(5.95) ACIDO	4.16	0.1	1	6.29	0.00	2.54	92.33	22	63.33
	4.16	0.2	2	6.08	0.30	1.93	94.17	19	68.33
	4.16	0.3	3	5.96	0.48	4.21	87.28	25	58.33
	4.16	0.4	4	5.83	0.60	4.82	85.44	26	56.67
	4.16	0.5	5	5.79	0.70	5.92	82.11	27	55.00

	4.16	0.6	6	5.69	0.78	5.94	82.05	24	60.00
	4.16	0.8	8	5.72	0.90	5.61	83.05	35	41.67
	4.16	1	10	5.61	1.00	6.19	81.30	39	35.00
	4.16	1.2	12	5.53	1.08	5.79	82.51	42	30.00
	4.16	1.4	14	5.46	1.15	5.56	83.20	43	28.33
	4.16	1.5	16	5.41	1.20	5.54	83.26	43	28.33
	4.16	1.8	18	5.33	1.26	6.39	80.69	47	21.67
AJUSTE DE pH (5,04) ACIDO	6.35	0.1	1	6.39	0.00	1.9	94.26	32	46.67
	6.35	0.2	2	5.8	0.30	1.37	95.86	18	70.00
	6.35	0.3	3	5.46	0.48	3.18	90.39	24	60.00
	6.35	0.4	4	5.35	0.60	4.78	85.56	34	43.33
	6.35	0.5	5	5.18	0.70	4.98	84.95	42	30.00
	6.35	0.6	6	5.09	0.78	5.11	84.56	40	33.33
	6.35	0.8	8	4.96	0.90	4.71	85.77	37	38.33
	6.35	1	10	4.83	1.00	4.9	85.20	37	38.33
	6.35	1.2	12	4.76	1.08	4.81	85.47	46	23.33
	6.35	1.4	14	4.65	1.15	4.36	86.83	35	41.67
	6.35	1.5	16	4.5	1.20	4.35	86.86	39	35.00
	6.35	1.8	18	4.57	1.26	5.12	84.53	39	35.00
	AJUSTE DE pH (8) ALCALINO	1	0.1	1	7.78	0.00	3.74	88.70	57
1		0.2	2	7.66	0.30	0.98	97.04	27	55.00
1		0.3	3	7.76	0.48	0.59	98.22	26	56.67
1		0.4	4	7.75	0.60	0.43	98.70	26	56.67
1		0.5	5	7.79	0.70	0.63	98.10	28	53.33
1		0.6	6	7.75	0.78	0.35	98.94	31	48.33
1		0.8	8	7.73	0.90	0.3	99.09	27	55.00
1		1	10	7.7	1.00	0.23	99.31	24	60.00
1		1.2	12	7.65	1.08	0.4	98.79	29	51.67
1		1.4	14	7.59	1.15	0.2	99.40	27	55.00
1		1.5	16	7.49	1.20	0.25	99.24	26	56.67
1		1.8	18	7.44	1.26	0.27	99.18	28	53.33
AJUSTE DE pH (8,70) ALCALINO	2	0.1	1	8.05	0.00	4	87.92	50	16.67
	2	0.2	2	8.04	0.30	1.12	96.62	28	53.33
	2	0.3	3	7.85	0.48	0.49	98.52	21	65.00
	2	0.4	4	7.73	0.60	0.38	98.85	28	53.33
	2	0.5	5	7.65	0.70	0.4	98.79	23	61.67
	2	0.6	6	7.6	0.78	0.47	98.58	26	56.67
	2	0.8	8	7.59	0.90	0.27	99.18	26	56.67
	2	1	10	7.68	1.00	0.17	99.49	17	71.67
	2	1.2	12	7.75	1.08	0.22	99.34	17	71.67

AJUSTE DE pH (9.89) ALCALINO	2	1.4	14	7.71	1.15	0.32	99.03	24	60.00
	2	1.5	16	7.7	1.20	0.16	99.52	25	58.33
	2	1.8	18	7.65	1.26	0.14	99.58	17	71.67
	4.5	0.1	1	9.74	0.00	3.08	90.69	38	36.67
	4.5	0.2	2	9.72	0.30	1.79	94.59	27	55.00
	4.5	0.3	3	9.7	0.48	1.95	94.11	23	61.67
	4.5	0.4	4	9.71	0.60	0.63	98.10	17	71.67
	4.5	0.5	5	9.7	0.70	1.07	96.77	14	76.67
	4.5	0.6	6	9.64	0.78	0.4	98.79	14	76.67
	4.5	0.8	8	9.71	0.90	0.53	98.40	15	75.00
	4.5	1	10	9.49	1.00	0.26	99.21	13	78.33
	4.5	1.2	12	9.42	1.08	0.34	98.97	8	86.67
	4.5	1.4	14	9.44	1.15	0.35	98.94	12	80.00
	4.5	1.5	16	9.4	1.20	0.35	98.94	13	78.33
	4.5	1.8	18	9.26	1.26	0.27	99.18	12	80.00

Fuente. Autor

## ANEXO 5.

### RESULTADOS PRUEBAS DE JARRAS PAC TURBIEDAD ALTA

	parámetros iniciales del agua						
	pH del agua cruda	VOLUMEN PAC (ml)	DOSIS PAC (mg/l)	pH después de coagulación	LOG DOSIS	TURBIEDAD CLARIFICADA (UNT)	%REMOCION TURBIDEZ
SIN AJUSTE DE Ph	7.16	0.1	1	7.28	0.00	3.03	99.19
	<b>Turbiedad agua cruda UNT</b>	0.2	2	7.21	0.30	2.54	99.32
	373	0.3	3	7.1	0.48	1.21	99.68
	<b>color aparente UPC</b>	0.4	4	7.09	0.60	0.89	99.76
	1154	0.5	5	7.06	0.70	0.92	99.75
	<b>Alcalinidad (mg/CaCO3)</b>	0.6	6	7.05	0.78	1.18	99.68
	34	0.7	7	7.06	0.85	0.75	99.80
		0.8	8	7.09	0.90	1.17	99.69
		0.9	9	7.07	0.95	9.81	97.37
		1	10	7.04	1.00	6.89	98.15
		1.1	11	7.03	1.04	20.7	94.45
		1.2	12	7.01	1.08	11.7	96.86
AJUSTE DE pH (6,34) ACIDO	4.16	0.1	1	6.88	0.00	4.69	98.74
	4.16	0.2	2	6.81	0.30	4.2	98.87
	4.16	0.3	3	6.77	0.48	22.7	93.91
	4.16	0.4	4	6.47	0.60	27.4	92.65
	4.16	0.5	5	6.37	0.70	40.1	89.25
	4.16	0.6	6	6.33	0.78	32.8	91.21
	4.16	0.7	7	6.29	0.85	36.5	90.21
	4.16	0.8	8	6.25	0.90	39.9	89.30
	4.16	0.9	9	6.24	0.95	32.7	91.23
	4.16	1	10	6.19	1.00	35.6	90.46
	4.16	1.1	11	6.15	1.04	37.5	89.95
	4.16	1.2	12	6.05	1.08	31.5	91.55
AJUSTE DE pH (5,30) ACIDO	6.25	0.1	1	6.37	0.00	7.31	98.04
	6.25	0.2	2	6.14	0.30	31	91.69
	6.25	0.3	3	6.03	0.48	28.5	92.36
	6.25	0.4	4	5.91	0.60	31.7	91.50
	6.25	0.5	5	5.85	0.70	34.2	90.83
	6.25	0.6	6	5.7	0.78	37.2	90.03
	6.25	0.7	7	5.56	0.85	45.1	87.91
	6.25	0.8	8	5.44	0.90	42.8	88.53

AJUSTE DE pH (4,14) ACIDO	6.25	0.9	9	5.34	0.95	47.6	87.24
	6.25	1	10	5.27	1.00	51.8	86.11
	6.25	1.1	11	5.26	1.04	49.7	86.68
	6.25	1.2	12	5.24	1.08	50.1	86.57
	7.5	0.1	1	4.71	0.00	5.56	98.51
	7.5	0.2	2	4.48	0.30	20.1	94.61
	7.5	0.3	3	4.26	0.48	32	91.42
	7.5	0.4	4	4.3	0.60	23.2	93.78
	7.5	0.5	5	4.24	0.70	46.2	87.61
	7.5	0.6	6	4.23	0.78	40.2	89.22
	7.5	0.7	7	4.29	0.85	52.1	86.03
	7.5	0.8	8	4.35	0.90	40.8	89.06
	7.5	0.9	9	4.31	0.95	41.8	88.79
	7.5	1	10	4.45	1.00	45.4	87.83
	7.5	1.1	11	4.46	1.04	50.8	86.38
	7.5	1.2	12	4.47	1.08	51.5	86.19
AJUSTE DE pH (9.93) ALCALINO	5	0.1	1	8.67	0.00	5.4	98.55
	5	0.2	2	8.88	0.30	3.96	98.94
	5	0.3	3	9.03	0.48	3.28	99.12
	5	0.4	4	9.02	0.60	1.96	99.47
	5	0.5	5	9.04	0.70	3.9	98.95
	5	0.6	6	9.08	0.78	3.3	99.12
	5	0.7	7	9.09	0.85	1.58	99.58
	5	0.8	8	9.08	0.90	1.6	99.57
	5	0.9	9	9.15	0.95	1.84	99.51
	5	1	10	9.08	1.00	2.79	99.25
	5	1.1	11	9.07	1.04	3.39	99.09
	5	1.2	12	9.03	1.08	1.79	99.52
AJUSTE DE pH (8.96) ALCALINO	2.5	0.1	1	7.75	0.00	8.83	97.63
	2.5	0.2	2	8.14	0.30	2.07	99.45
	2.5	0.3	3	8.29	0.48	2.84	99.24
	2.5	0.4	4	8.39	0.60	1.69	99.55
	2.5	0.5	5	8.45	0.70	1.93	99.48
	2.5	0.6	6	8.46	0.78	2.8	99.25
	2.5	0.7	7	8.43	0.85	1.76	99.53
	2.5	0.8	8	8.39	0.90	1.34	99.64
	2.5	0.9	9	8.34	0.95	1.36	99.64
	2.5	1	10	8.3	1.00	1.05	99.72
	2.5	1.1	11	8.25	1.04	1	99.73
	2.5	1.2	12	8.23	1.08	0.84	99.77

AJUSTE DE pH (8,16) ALCALINO	1.66	0.1	1	8.37	0.00	5.51	98.52
	1.66	0.2	2	8.32	0.30	3.68	99.01
	1.66	0.3	3	8.31	0.48	2.14	99.43
	1.66	0.4	4	8.27	0.60	1.61	99.57
	1.66	0.5	5	8.21	0.70	1.81	99.51
	1.66	0.6	6	8.18	0.78	1.7	99.54
	1.66	0.7	7	8.13	0.85	1.27	99.66
	1.66	0.8	8	8.09	0.90	1.77	99.53
	1.66	0.9	9	8.07	0.95	1.34	99.64
	1.66	1	10	7.99	1.00	1.62	99.57
	1.66	1.1	11	7.92	1.04	0.91	99.76
	1.66	1.2	12	7.89	1.08	1.34	99.64

Fuente. Autor

## ANEXO 6.

### RESULTADOS PRUEBAS DE JARRAS PAC TURBIEDAD + ALTA

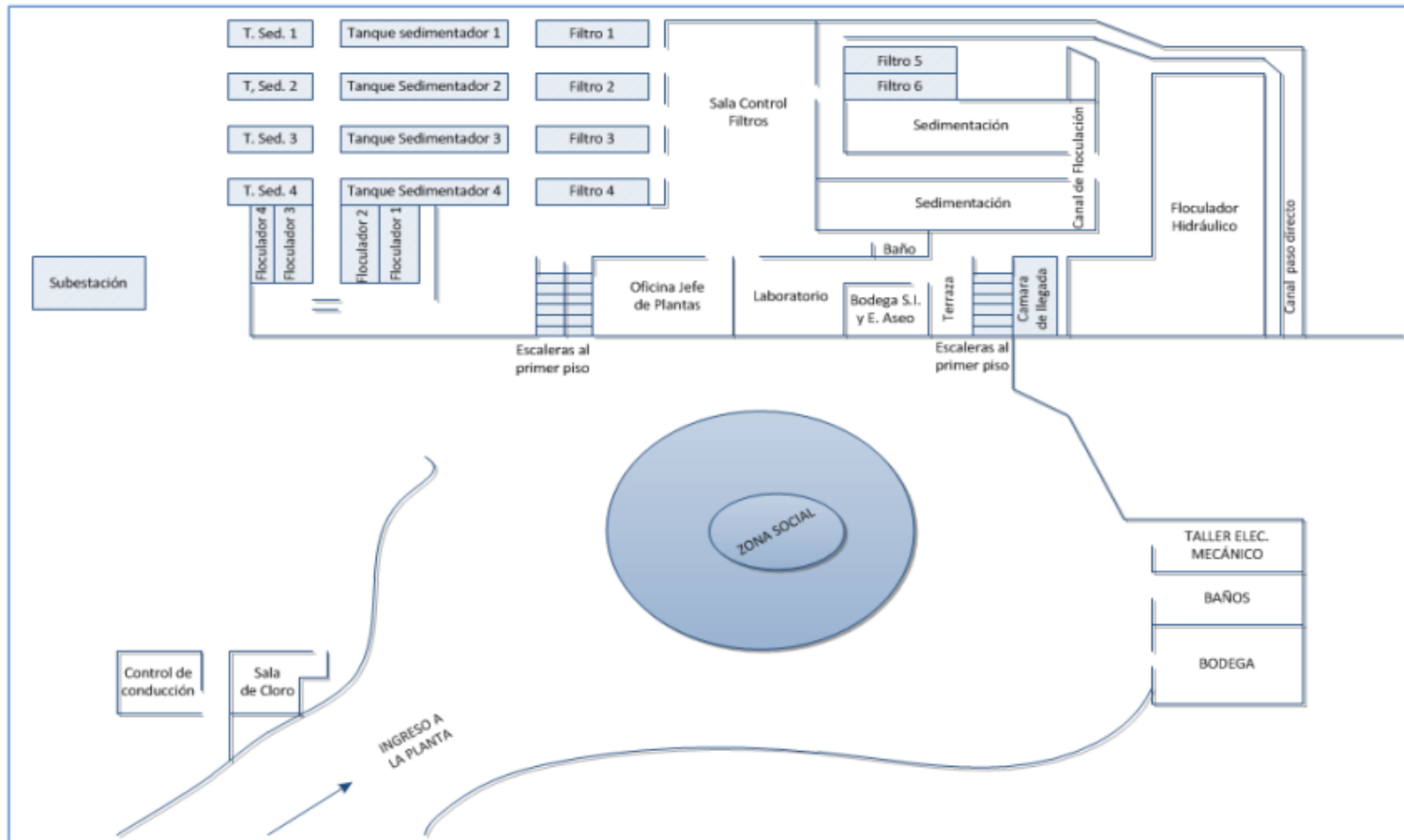
	parámetros iniciales del agua									
	pH del agua cruda	VOLUME N PAC (ml)	DOSIS PAC (mg/l)	pH después de coagulación	LOG DOSI S	TURBIEDAD CLARIFICADA (UNT)	%REMOCI ON TURBIDEZ	COLOR VERDADER O (UPC)	%REMO CION COLOR	
SIN AJUSTE DE Ph	7.13	0.1	1	6.85	0.00	29.8	96.60	48	96.89	
	Turbiedad agua cruda UNT	0.2	2	7.08	0.30	13.4	98.47	11	99.29	
	876	0.3	3	7.17	0.48	5.89	99.33	14	99.09	
	color aparente UPC	0.4	4	7.13	0.60	12.3	98.60	13	99.16	
	1544	0.5	5	7.06	0.70	15.4	98.24	10	99.35	
	Alcalinidad (mg/CaCO3)	0.6	6	7.09	0.78	6.91	99.21	14	99.09	
	32	0.7	7	7.08	0.85	2.26	99.74	19	98.77	
		0.8	8	7.12	0.90	3	99.66	8	99.48	
		0.9	9	7.08	0.95	1.34	99.85	7	99.55	
		1.9	10	7.09	1.00	0.77	99.91	12	99.22	
		1.2	12	7.05	1.08	0.88	99.90	13	99.16	
		1.4	14	6.98	1.15	16.9	98.07	17	98.90	
	AJUSTE DE pH (6.32) ACIDO	3.33	0.1	1	6.57	0.00	40.5	95.38	48	96.89
		3.33	0.2	2	6.64	0.30	14.5	98.34	11	99.29
3.33		0.3	3	6.71	0.48	11.7	98.66	11	99.29	
3.33		0.4	4	6.74	0.60	10.1	98.85	14	99.09	
3.33		0.5	5	6.73	0.70	9.05	98.97	8	99.48	
3.33		0.6	6	6.66	0.78	18.3	97.91	13	99.16	
3.33		0.7	7	6.61	0.85	11.9	98.64	19	98.77	
3.33		0.8	8	6.56	0.90	46.3	94.71	4	99.74	
3.33		0.9	9	6.55	0.95	62.2	92.90	14	99.09	
3.33		1	10	6.54	1.00	118	86.53	34	97.80	
3.33		1.2	12	6.51	1.08	142	83.79	7	99.55	
3.33		1.4	14	6.45	1.15	104	88.13	19	98.77	
AJUSTE DE pH (6.01) ACIDO	2.08	0.1	1	6.85	0.00	25.5	97.09	74	95.21	
	2.08	0.2	2	6.91	0.30	10.1	98.85	21	98.64	
	2.08	0.3	3	6.87	0.48	5.49	99.37	16	98.96	
	2.08	0.4	4	6.91	0.60	5.43	99.38	1	99.94	
	2.08	0.5	5	6.9	0.70	5.32	99.39	14	99.09	

	2.08	0.6	6	6.89	0.78	12	98.63	17	98.90
	2.08	0.8	8	6.87	0.90	6.67	99.24	17	98.90
	2.08	1	10	6.83	1.00	21.5	97.55	21	98.64
	2.08	1.5	15	6.75	1.18	62	92.92	9	99.42
	2.08	2	20	6.59	1.30	99.1	88.69	34	97.80
	2.08	2.5	25	6.46	1.40	85.2	90.27	91	94.11
	2.08	3	30	6.34	1.48	77.9	91.11	187	87.89
AJUSTE DE pH (5.53) ACIDO	6	0.1	1	6.41	0.00	23.5	97.32	77	95.01
	6	0.2	2	6.33	0.30	4.31	99.51	26	98.32
	6	0.3	3	6.29	0.48	5.31	99.39	22	98.58
	6	0.4	4	6.24	0.60	9.65	98.90	29	98.12
	6	0.5	5	6.19	0.70	6.95	99.21	79	94.88
	6	0.6	6	6.14	0.78	20.9	97.61	65	95.79
	6	0.7	7	6.09	0.85	13.1	98.50	42	97.28
	6	0.8	8	6.07	0.90	35.2	95.98	24	98.45
	6	0.9	9	6.05	0.95	22.1	97.48	24	98.45
	6	1	10	6.06	1.00	63.1	92.80	46	97.02
	6	1.2	12	6.04	1.08	33.8	96.14	19	98.77
	6	1.4	14	5.95	1.15	39.9	95.45	69	95.53
AJUSTE DE pH (5.06) ACIDO	7.5	0.1	1	5.86	0.00	5.14	99.41	30	98.06
	7.5	0.2	2	5.66	0.30	4.13	99.53	20	98.70
	7.5	0.3	3	5.69	0.48	4.43	99.49	20	98.70
	7.5	0.4	4	5.58	0.60	5.53	99.37	20	98.70
	7.5	0.5	5	5.49	0.70	5.67	99.35	33	97.86
	7.5	0.6	6	5.51	0.78	13.6	98.45	48	96.89
	7.5	0.7	7	5.45	0.85	15.5	98.23	26	98.32
	7.5	0.8	8	5.62	0.90	22.1	97.48	47	96.96
	7.5	0.9	9	5.55	0.95	24	97.26	33	97.86
	7.5	1	10	5.36	1.00	21.6	97.53	33	97.86
	7.5	1.2	12	5.27	1.08	35.6	95.94	54	96.50
	7.5	1.4	14	5.21	1.15	43.8	95.00	73	95.27
AJUSTE DE pH (8.5) ALCALINO	0.5	0.1	1	8.41	0.00	30.4	96.53	116	92.49
	0.5	0.2	2	8.47	0.30	13.3	98.48	96	93.78
	0.5	0.3	3	8.4	0.48	7.44	99.15	27	98.25
	0.5	0.4	4	8.31	0.60	19.3	97.80	19	98.77
	0.5	0.5	5	8.24	0.70	7.1	99.19	28	98.19
	0.5	0.6	6	8.2	0.78	12.2	98.61	37	97.60
	0.5	0.7	7	8.13	0.85	9.35	98.93	37	97.60
	0.5	0.8	8	8.03	0.90	2.58	99.71	22	98.58
	0.5	0.9	9	7.96	0.95	5.4	99.38	24	98.45

	0.5	1	10	7.88	1.00	3.8	99.57	23	98.51	
	0.5	1.2	12	7.79	1.08	4.53	99.48	15	99.03	
	0.5	1.4	14	7.72	1.15	5.41	99.38	15	99.03	
AJUSTE DE pH (9.3) ALCALINO	1.66	0.1	1	8.85	0.00	24.8	97.17	156	89.90	
	1.66	0.2	2	9.07	0.30	10.4	98.81	33	97.86	
	1.66	0.3	3	9	0.48	7.66	99.13	27	98.25	
	1.66	0.4	4	8.97	0.60	8.97	98.98	43	97.22	
	1.66	0.5	5	8.88	0.70	5.78	99.34	21	98.64	
	1.66	0.6	6	8.86	0.78	17.3	98.03	25	98.38	
	1.66	0.7	7	8.81	0.85	8.39	99.04	15	99.03	
	1.66	0.8	8	8.73	0.90	4.96	99.43	13	99.16	
	1.66	0.9	9	8.65	0.95	8.72	99.00	16	98.96	
	1.66	1	10	8.54	1.00	10.3	98.82	13	99.16	
	1.66	1.2	12	8.43	1.08	9.08	98.96	14	99.09	
	1.66	1.4	14	8.48	1.15	8.65	99.01	15	99.03	
	AJUSTE DE pH (10.01) ALCALINO	3.83	0.1	1	9.79	0.00	33	96.23	185	88.02
		3.83	0.2	2	9.89	0.30	11.8	98.65	60	96.11
3.83		0.3	3	9.86	0.48	10.3	98.82	46	97.02	
3.83		0.4	4	9.87	0.60	7.26	99.17	44	97.15	
3.83		0.5	5	9.82	0.70	6.39	99.27	36	97.67	
3.83		0.6	6	9.76	0.78	18.2	97.92	60	96.11	
3.83		0.7	7	9.78	0.85	9.23	98.95	42	97.28	
3.83		0.8	8	9.74	0.90	4.86	99.45	33	97.86	
3.83		0.9	9	9.73	0.95	4.71	99.46	20	98.70	
3.83		1	10	9.67	1.00	6.4	99.27	22	98.58	
3.83		1.2	12	9.65	1.08	5.33	99.39	56	96.37	
3.83		1.4	14	9.53	1.15	11.4	98.70	47	96.96	
AJUSTE DE pH (10,07) ALCALINO		3.33	1.7	17	9.5	1.23	29.4	96.64	37	97.60
	3.33	2	20	9.43	1.30	30.6	96.51	31	97.99	
	3.33	2.5	25	9.29	1.40	23.5	97.32	81	94.75	
	3.33	3	30	9.12	1.48	19.7	97.75	44	97.15	
	3.33	4	40	8.59	1.60	19.8	97.74	33	97.86	
	3.33	4.9	49	8.36	1.69	19.3	97.80	18	98.83	

Fuente. Autor

## ANEXO 7. ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA



Fuente. Acueducto metropolitano de Bucaramanga s.a. E.S.P.

## ANEXO 8.

### PARÁMETROS INTERNOS DE LA CALIDAD DE AGUA



#### PARÁMETROS INTERNOS DE CALIDAD

Turbiedad  $\leq 2$  NTU

Color  $\leq 10$  UPC

7 Unid  $\leq$  pH  $\leq 8$  Unid

0,9 mg/l  $\leq$  Cloro Residual  $\leq 1,2$  mg/l

Aluminio Residual  $\leq 0,2$  mg/l

**Fuente.** Acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.