

**“EVALUACIÓN OPERACIONAL E HIDRAULICA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUA POTABLE, EMPRESAS PÚBLICAS DE ARMENIA E.S.P”**

**NATALIA ACOSTA PINILLA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PAMPLONA 2016**



*Una universidad **incluyente** y **comprometida** con el desarrollo integral*

**“EVALUACIÓN HIDRÁULICA Y OPERACIONAL EN LA PLANTA DE  
POTABILIZACIÓN DE AGUA, EMPRESAS PÚBLICAS DE ARMENIA E.S.P”**

**NATALIA ACOSTA PINILLA**

**PROYECTO DE GRADO**

**Trabajo presentado para optar al título de Ingeniero Químico**

**Dirigida por:**

**EDWIN GUSTAVO FUENTES**

**Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PAMPLONA 2016**



*Una universidad incluyente y comprometida con el desarrollo integral*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi familia por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos y la motivación constante durante mi carrera.*

*A Daniel Morales por sus buenos consejos, paciencia y apoyo incondicional durante este año.*

*A profesores de la facultad de ingeniería química por la formación académica e íntegra durante el proceso de formación como profesional.*

*A mis amigos por la buena compañía y experiencias que vivimos durante la carrera.*

*A Profesor Edwin por el apoyo y acompañamiento durante la realización del proyecto.*

*A Cristian Tabares por darme la oportunidad a un nuevo camino como profesional.*

*A Personal de la planta Empresas Públicas de Armenia por el apoyo, colaboración y paciencia.*



## TABLA DE CONTENIDO

|   |          |
|---|----------|
| TABLA DE CONTENIDO .....  | III      |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | VIII     |
| INDICE DE FOTOGRAFIAS.....                                      | VIII     |
| INDICE DE GRAFICAS .....  | IX       |
| INDICE DE TABLAS .....  | X        |
| RESUMEN.....  | XII      |
| ABSTRACT.....   | XIII     |
| <b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>                                     | <b>1</b> |
| <b>1.1. Planteamiento del problema y justificación .....</b>    | <b>1</b> |
| <b>1.2. Objetivos .....</b>                                     | <b>2</b> |
| <b>1.2.1. Objetivo principal.....</b>                           | <b>2</b> |
| <b>1.2.2. Objetivo específicos .....</b>                        | <b>2</b> |
| <b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>                                   | <b>4</b> |
| <b>2.1. Planta de tratamiento convencional.....</b>             | <b>4</b> |
| <b>2.1.1. Coagulación – mezcla rápida .....</b>                 | <b>4</b> |
| 2.1.1.1. Parámetros de la Norma Ras 2000.....                   | 5        |
| 2.1.1.2. Parámetros del manual de filtración rápida CEPIS ..... | 6        |
| <b>2.1.2. Floculación .....</b>                                 | <b>6</b> |
| 2.1.2.1. Factores que Influyen en la Floculación .....          | 7        |
| 2.1.2.1.1. Naturaleza del agua.....                             | 7        |
| 2.1.2.1.2. Influencia del Tiempo de Floculación .....           | 7        |
| 2.1.2.1.3. Influencia del Gradiente de Velocidad.....           | 7        |
| 2.1.2.1.4. Influencia de la Variación del Caudal .....          | 8        |
| 2.1.2.2. Clasificación de Floculadores .....                    | 8        |
| 2.1.2.2.1. Floculadores Hidráulicos.....                        | 9        |
| 2.1.2.2.2. Parámetros de diseño según el RAS 2000 .....         | 10       |
| 2.1.2.2.3. Floculadores mecánicos .....                         | 11       |



|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| 2.1.2.2.4.    | Parámetros de diseño RAS 2000.....   | 11        |
| <b>2.1.3.</b> | <b>Sedimentación.....</b>  | <b>11</b> |
| 2.1.3.1.      | Tanque Ideal de Sedimentación .....  | 12        |
| 2.1.3.2.      | Clasificación de Sedimentadores .....  | 13        |
| 2.1.3.3.      | Parámetros de Diseño según el RAS 2000.....  | 15        |
| 2.1.3.3.1.    | Sedimentadores de Flujo Horizontal .....   | 15        |
| 2.1.3.3.2.    | Sedimentadores de Flujo Ascendente o vertical .....  | 15        |
| 2.1.3.3.3.    | Sedimentador De Alta Tasa.....   | 15        |
| 2.1.3.3.4.    | Sedimentador Con Manto de Lodos.....   | 16        |
| <b>2.1.4.</b> | <b>Filtración.....</b>   | <b>16</b> |
| 2.1.4.1.      | Parámetros de Diseño según RAS 2000 .....  | 16        |
| <b>2.2.</b>   | <b>Distribución de Tiempos de Residencia .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>2.3.</b>   | <b>Trazadores .....</b>  | <b>20</b> |
| 2.3.1.        | Sustancias Trazadoras .....  | 21        |
| <b>2.4.</b>   | <b>Modelos de Flujo .....</b>  | <b>21</b> |
| 2.4.1.        | Flujo Intermitente .....   | 21        |
| 2.4.2.        | Flujo Constante .....  | 22        |
| <b>2.5.</b>   | <b>Tipos de Flujo en las Unidades de Tratamiento .....</b>   | <b>22</b> |
| 2.5.1.        | Flujo Pistón.....  | 22        |
| 2.5.2.        | Flujo Mezclado .....   | 23        |
| 2.5.3.        | Flujo No ideal.....  | 23        |
| <b>2.6.</b>   | <b>Modelos Matemáticos De Flujo No Ideal .....</b>   | <b>24</b> |
| 2.6.1.        | Modelos de Dispersión .....  | 24        |
| 2.6.2.        | Modelos de Tanque en Serie .....   | 25        |
| 2.6.3.        | Modelos de Wolf Resnick .....  | 26        |
| <b>3.</b>     | <b>METODOLOGÍA Y MATERIALES.....</b>   | <b>30</b> |
| 3.1.          | Descripción de la planta de tratamiento de agua potable Empresas Públicas de Armenia. ....   | 30        |
| 3.2.          | Ensayos de tratabilidad en el laboratorio para encontrar el gradiente y velocidad optima de mezcla rápida y lenta, dosis óptima, pH óptimo con diferentes calidades de agua..... | 30        |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| 3.3.     | Velocidad media por el método del flotador para la unidad de mezcla rápida .....   | 31 |
| 3.4.     | Evaluación la condiciones hidráulicas de la canaleta Parshall teóricas y reales ante la Norma RAS 2000.....  | 31 |
| 3.5.     | Determinación del Tiempo y gradiente optimo.....   | 36 |
| 3.6.     | Ensayos de trazabilidad para el estudio del comportamiento hidráulico de cada una de las unidades de floculación y sedimentación con NaCl como trazador..... | 37 |
| 3.7.     | Análisis hidráulico por medio de los modelos matemáticos de dispersión, tanques en serie y Wolf Resnick las unidades de floculación .                        | 38 |
| 3.8.     | Calculo de pérdidas de carga atravésó de orificios y gradiente de velocidad para las unidades de floculación hidráulicos .....                               | 39 |
| 3.9.     | Calculo de gradiente de velocidad para las unidades de floculación mecánico.....   | 40 |
| 3.10.    | Calculo de carga en los sedimentadores.....  | 40 |
| 3.11.    | Calculo de carga en la zona de entrada en los sedimentadores.....  | 40 |
| 3.12.    | Calculo de carga en la zona de sedimentación en los sedimentadores .....   | 41 |
| 3.13.    | Perdida de carga y tasa promedio en filtros.....   | 42 |
| 4.       | RESULTADOS .....   | 44 |
| 4.1.     | Descripción de la planta Empresas Publicas de Armenia E.S.P .....  | 44 |
| 4.1.1.   | Tanques desarenadores .....  | 45 |
| 4.1.2.   | Mezcla rápida.....   | 45 |
| 4.1.3.   | Sistemas de floculación – sedimentación .....  | 46 |
| 4.1.3.1. | Unidad Hidráulica .....  | 47 |
| 4.1.3.2. | Unidad Nueva .....   | 48 |
| 4.1.3.3. | Unidad Permutit 1 y 2 .....  | 49 |
| 4.1.4.   | Filtración.....  | 50 |
| 4.1.4.1. | Filtros convencionales .....   | 50 |
| 4.1.4.2. | Filtros autolavados.....   | 52 |
| 4.1.5.   | Desinfección .....   | 53 |
| 4.2.     | Proceso De Coagulación – Mezcla Rápida .....   | 54 |
| 4.2.1.   | Análisis del agua cruda .....  | 54 |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.2.2. Manejo y Almacenamiento De Sustancias Químicas .....</b>  | <b>55</b> |
| <b>4.2.3. Determinación De La Dosis Óptima De Coagulante .....</b>  | <b>56</b> |
| <b>4.2.4. Determinación Del pH Óptimo De Coagulación .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>4.2.5. Mezcla Rápida .....</b>   | <b>60</b> |
| 4.2.5.1. Velocidad Media En La Canaleta Parshall .....  | 60        |
| 4.2.5.2. Condiciones Hidráulicas De La Canaleta Parshall .....  | 61        |
| <b>4.2.6. Proceso De Floculación.....</b>   | <b>63</b> |
| 4.2.6.1. Tiempo Y Gradiente Óptimo De Mezcla Lenta .....  | 63        |
| 4.2.6.2. Análisis Hidráulico .....  | 65        |
| 4.2.6.2.1. Método de la Curva de Tendencia de la Concentración del Trazador                                   | 65        |
| 4.2.6.2.2. Modelo de dispersión axial.....  | 69        |
| 4.2.6.2.3. Modelo de tanques en serie.....  | 70        |
| 4.2.6.2.4. Método de Wolf Resnick .....   | 72        |
| 4.2.6.3. Perdidas de carga a través de orificios y gradientes de velocidad para floculadores hidráulicos..... | 72        |
| 4.2.6.3.1. Unidad Hidráulica .....  | 72        |
| 4.2.6.3.2. Unidad Nueva .....   | 73        |
| 4.2.6.3.3. Gradiente de velocidad en las Unidades Permutit 1 y 2 .....  | 74        |
| <b>4.2.7. Proceso de sedimentación .....</b>  | <b>75</b> |
| 4.2.7.1. Determinación de la eficiencia .....   | 75        |
| 4.2.7.1.1. En función de la calidad del agua cruda.....   | 75        |
| 4.2.7.1.2. En función de la calidad de agua sedimentada .....   | 77        |
| 4.2.7.1.3. En función de la carga superficial .....   | 79        |
| 4.2.7.2. Características Hidráulicas de los sedimentadores.....   | 80        |
| 4.2.7.2.1. Método de la Curva de Tendencia de la Concentración del Trazador                                   | 80        |
| 4.2.7.2.2. Modelo de dispersión axial.....  | 84        |
| 4.2.7.2.3. Modelo de tanques en serie.....  | 87        |
| 4.2.7.2.4. Método de Wolf Resnick .....   | 89        |
| 4.2.7.3. Zona de entrada .....  | 90        |
| 4.2.7.3.1. Unidad Permutit 1 y 2 .....  | 90        |



|   |            |
|---|------------|
| 4.2.7.3.2. Unidad Hidráulica .....                          | 91         |
| 4.2.7.3.3. Unidad Nueva .....                               | 91         |
| 4.2.7.4. Zona de sedimentación.....                         | 92         |
| 4.2.7.4.1. Carga unitaria en vertedero .....                | 92         |
| 4.2.7.4.2. Volumen perdido en la zona de sedimentación..... | 92         |
| <b>4.2.8. Proceso de filtración.....</b>                    | <b>93</b>  |
| <b>4.2.9. Proceso de Desinfección.....</b>                  | <b>94</b>  |
| 4.2.9.1. Demanda de cloro .....                             | 94         |
| <b>5. CONCLUSIONES .....</b>                                | <b>97</b>  |
| <b>6. RECOMENDACIONES .....</b>                             | <b>100</b> |
| <b>7. NOMENCLATURA.....</b>                                 | <b>101</b> |
| <b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                  | <b>105</b> |
| <b>9. ANEXOS.....</b>                                       | <b>107</b> |
| <b>a. Planos de cada proceso de la planta.....</b>          | <b>107</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1.PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. ....                            | 4  |
| FIGURA 2.FLOCULADORES HIDRÁULICOS DE TABIQUES .....                                    | 10 |
| FIGURA 3.TANQUE IDEAL DE SEDIMENTACIÓN .....   | 12 |
| FIGURA 4.TRAYECTORIA DE PARTÍCULA DISCRETA EN ZONA DE SEDIMENTACIÓN, TANQUE IDEAL..... | 13 |
| FIGURA 5.CONCENTRACION DEL TRAZADOR EN EL EFLUENTE DE UN REACTOR.....                  | 19 |
| FIGURA 6.ESQUEMA DE LA PRUEBA CON TRAZADORES CON TRAZADORES .....                      | 20 |
| FIGURA 7.REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE FLUJO PISTÓN .....                                  | 22 |
| FIGURA 8.REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE FLUJO MEZCLADO .....                                | 23 |
| FIGURA 9.REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL FLUJO NO IDEAL .....                               | 24 |
| FIGURA 10.DIMENSIONES DE LA CANALETA PARSHALL.....                                     | 33 |

## INDICE DE FOTOGRAFÍAS

|   |    |
|---|----|
| FOTOGRAFÍA 1. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EMPRESAS PÚBLICAS DE ARMENIA E.S.P. ... | 44 |
| FOTOGRAFÍA 2. DESARENADORES .....   | 45 |
| FOTOGRAFÍA 3.CANALETA PARSHALL .....  | 46 |
| FOTOGRAFÍA 4.UNIDADES DE FLOCULACIÓN- SEDIMENTACIÓN .....                                   | 47 |
| FOTOGRAFÍA 5.FILTROS CONVENCIONALES .....   | 52 |
| FOTOGRAFÍA 6. FILTROS AUTOLAVADOS .....   | 53 |
| FOTOGRAFÍA 7.SALA DE DOSIFICACIÓN DE CLORO .....  | 54 |



## INDICE DE GRAFICAS

|  |    |
|--|----|
| GRÁFICA. 1 MODELO TANQUES EN SERIE .....   | 39 |
| GRÁFICA. 2 ANÁLISIS DE TURBIEDAD DURANTE EL AÑO 2016.....  | 55 |
| GRÁFICA. 3 COMPORTAMIENTO DE LA TURBIEDAD A DIFERENTES DOSIS DE PAC .....  | 58 |
| GRÁFICA. 4 RELACIÓN DE PH ÓPTIMO PARA EL PRETRATAMIENTO PARA DIFERENTES VALORES DE<br>TURBIEDAD DE AGUA CRUDA..... | 59 |
| GRÁFICA. 5 RESULTADOS DE TURBIEDAD REMANENTE A 20 RPM CON DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE<br>AGUA CRUDA. ....        | 63 |
| GRÁFICA. 6 RESULTADOS DE TURBIEDAD REMANENTE A 30 RPM CON DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE<br>AGUA CRUDA. ....        | 64 |
| GRÁFICA. 7 RESULTADOS DE TURBIEDAD REMANENTE A 40 RPM CON DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE<br>AGUA CRUDA. ....        | 64 |
| GRÁFICA. 8 RESULTADOS DE TURBIEDAD REMANENTE A 60 RPM CON DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE<br>AGUA CRUDA. ....        | 65 |
| GRÁFICA. 9 CURVA DE CONCENTRACIÓN DE TRAZADOR VS TIEMPO PARA LA UNIDAD HIDRÁULICA.....                             | 66 |
| GRÁFICA. 10 CURVA DE CONCENTRACIÓN TRAZADOR VS TIEMPO PARA LA UNIDAD NUEVA.....                                    | 66 |
| GRÁFICA. 11 MODELO DE DISPERSIÓN UNIDAD HIDRÁULICA.....  | 69 |
| GRÁFICA. 12 MODELO DE DISPERSIÓN UNIDAD NUEVA.....   | 69 |
| GRÁFICA. 13 MODELO DE TANQUES EN SERIE UNIDAD HIDRÁULICA .....   | 71 |
| GRÁFICA. 14 MODELO DE TANQUES EN SERIE UNIDAD NUEVA LADO DERECHO E IZQUIERDO.....                                  | 71 |
| GRÁFICA. 15 EFICIENCIA DE LOS SEDIMENTADORES EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA CRUDA. ....                          | 76 |
| GRÁFICA. 16 FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA UNIDAD PERMUTIT. ....  | 77 |
| GRÁFICA. 17 FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA UNIDAD HIDRÁULICA. ....  | 78 |
| GRÁFICA. 18 FRECUENCIA ACUMULADA RELATIVA UNIDAD NUEVA. ....   | 78 |
| GRÁFICA. 19 EFICIENCIA DE CADA UNIDAD A PARTIR DE LA CALIDAD DE AGUA CLARIFICADA .....                             | 79 |
| GRÁFICA. 20 CURVA DE CONCENTRACIÓN DE TRAZADOR VS TIEMPO PARA EL SEDIMENTADOR DE LA<br>UNIDAD HIDRÁULICA.....      | 81 |
| GRÁFICA. 21 CURVA DE CONCENTRACIÓN DE TRAZADOR VS TIEMPO PARA LA UNIDAD PERMUTIT 1 .....                           | 81 |
| GRÁFICA. 22 CURVA DE CONCENTRACIÓN DE TRAZADOR VS TIEMPO PARA LA UNIDAD PERMUTIT 2 .....                           | 82 |
| GRÁFICA. 23 CURVA DE CONCENTRACIÓN DE TRAZADOR VS TIEMPO PARA EL SEDIMENTADOR DE LA<br>UNIDAD NUEVA.....           | 82 |
| GRÁFICA. 24 MODELO DE DISPERSIÓN UNIDAD HIDRÁULICA.....  | 84 |
| GRÁFICA. 25 MODELO DE DISPERSIÓN UNIDAD NUEVA.....   | 85 |
| GRÁFICA. 26 MODELO DE DISPERSIÓN UNIDAD PERMUTIT 1.....  | 85 |
| GRÁFICA. 27 MODELO DE DISPERSIÓN UNIDAD PERMUTIT 2.....  | 86 |
| GRÁFICA. 28 MODELO DE TANQUES EN SERIE UNIDAD HIDRÁULICA .....   | 87 |
| GRÁFICA. 29 MODELO DE TANQUES EN SERIE UNIDAD NUEVA.....   | 88 |
| GRÁFICA. 30 MODELO DE TANQUES EN SERIE UNIDAD PERMUTIT 1.....  | 88 |
| GRÁFICA. 31 MODELO DE TANQUES EN SERIE UNIDAD PERMUTIT 2.....  | 89 |
| GRÁFICA. 32 DEMANDA DE CLORO POR FILTRACIÓN DIRECTA.....   | 95 |
| GRÁFICA. 33 DEMANDA DE CLORO EN MOMENTO COAGULACIÓN .....  | 95 |



## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MEZCLA RÁPIDA .....  | 5  |
| TABLA 2. PARÁMETRO DE LA CANALETA PARSHALL .....   | 5  |
| TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS FLOCULADORES .....   | 9  |
| TABLA 4. DIFERENTES MODELOS DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN POR SEDIMENTACIÓN .....                     | 14 |
| TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN SEGÚN EL SENTIDO DEL FLUJO .....             | 14 |
| TABLA 6. RELACIONES EN LOS TIEMPOS EXPERIMENTALES Y TIEMPOS TEÓRICOS .....                           | 19 |
| TABLA 7. RESULTADOS DE LAS UNIDADES CON LA PRUEBA DE TRAZADORES .....                                | 28 |
| TABLA 8. RESULTADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LAS UNIDADES .....                                       | 29 |
| TABLA 9. VALORES DE K Y N .....  | 32 |
| TABLA 10. DIMENSIONES TÍPICAS DE CANALETAS PARSHALL (CM) .....                                       | 32 |
| TABLA 11. RELACIÓN DE $v$ (Γ/M) PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DEL AGUA .....                          | 36 |
| TABLA 12. SECUENCIA DE ENSAYOS EN EL JART TEST .....   | 37 |
| TABLA 13. RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA PARA TURBIEDAD INICIAL DE 5,22 NTU .....                         | 56 |
| TABLA 14. RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA PARA TURBIEDAD INICIAL DE 12,3 NTU .....                         | 57 |
| TABLA 15. RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA PARA TURBIEDAD INICIAL DE 15,4 NTU .....                         | 57 |
| TABLA 16. RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA PARA TURBIEDAD INICIAL DE 20,8 NTU .....                         | 57 |
| TABLA 17. RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA PARA TURBIEDAD INICIAL DE 120 NTU .....                          | 58 |
| TABLA 18. DOSIS ÓPTIMA CORRESPONDIENTE A DIFERENTES TURBIEDADES INICIALES DE AGUA CRUDA. ...         | 59 |
| TABLA 19. RESULTADOS DE ENSAYO PH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN .....  | 60 |
| TABLA 20. RESULTADOS DEL MÉTODO DEL FLOTADOR .....   | 61 |
| TABLA 21. MEDIDAS DE LA CANALETA PARSHALL. ....  | 61 |
| TABLA 22. CONDICIONES HIDRÁULICAS REALES Y TEÓRICAS DE LA CANALETA PARSHALL .....                    | 62 |
| TABLA 23. EVALUACIÓN DEL DISEÑO CANALETA PARSHALL .....  | 62 |
| TABLA 24. PARÁMETROS DEL MÉTODO DE CURVA DE TENDENCIA .....  | 66 |
| TABLA 25. ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DEL TRAZADOR .....                                     | 68 |
| TABLA 26. RESULTADOS DEL MODELO DE DISPERSIÓN .....  | 70 |
| TABLA 27. RESULTADOS DEL MODELO DE WOLF RESNICK .....  | 72 |
| TABLA 28. PERDIDAS DE CARGA Y GRADIENTES EN EL FLOCULADOR DE LA UNIDAD HIDRÁULICA .....              | 73 |
| TABLA 29. PERDIDAS DE CARGA Y GRADIENTES DE VELOCIDAD EN EL FLOCULADOR DE LA UNIDAD NUEVA            | 73 |
| TABLA 30. EVALUACIÓN DEL GRADIENTE DE LAS UNIDADES DE FLOCULACIÓN .....                              | 74 |
| TABLA 31. CALCULO DE POTENCIAS TEÓRICAS Y GRADIENTES DE VELOCIDAD EN FLOCULADORES<br>MECÁNICOS ..... | 75 |
| TABLA 32. DATOS DE AGUA CRUDA Y CLARIFICADA DE CADA UNA DE LAS UNIDADES .....                        | 76 |
| TABLA 33. CARGA SUPERFICIAL EN LAS UNIDADES DE SEDIMENTACIÓN .....                                   | 79 |
| TABLA 34. PARÁMETROS DEL MÉTODO DE CURVA DE TENDENCIA .....  | 83 |
| TABLA 35. ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DEL TRAZADOR .....                                     | 83 |
| TABLA 36. RESULTADOS DEL MODELO DE DISPERSIÓN .....  | 86 |
| TABLA 37. RESULTADOS DEL MODELO DE WOLF RESNICK .....  | 90 |
| TABLA 38. CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA EN LAS UNIDADES .....   | 91 |
| TABLA 39. PERDIDA DE CARGA UNITARIA EN LAS UNIDADES .....  | 92 |
| TABLA 40. VOLUMEN PERDIDO DE LAS UNIDADES HIDRÁULICAS .....  | 92 |
| TABLA 41. PARÁMETROS DE FILTROS AUTOLAVADOS Y CONVENCIONALES .....                                   | 93 |
| TABLA 42. CONDICIONES DEL AGUA EN LA PLANTA Y DOSIS DE COAGULANTE APLICADO .....                     | 94 |
| TABLA 43. CONDICIONES DEL AGUA EN LA PLANTA Y DOSIS DE COAGULANTE APLICADO .....                     | 94 |





## RESUMEN

El agua al ser un recurso principal para el sostenimiento humano, la planta de tratamiento de agua potable requiere ser evaluada en cada uno de sus procesos para diagnosticar el estado en el que se encuentre cada uno de ellos por medio de ensayos óptimos en el laboratorio, evaluación hidráulica, evaluación de los parámetros de diseño en los procesos principales los cuales son: coagulación y mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

El presente documento realiza una descripción de cada uno de los procesos para el tratamiento de agua para ser evaluados sobre el funcionamiento operacional con el fin de estimar comportamiento hidráulico por medio de modelos matemáticos para flujo no ideal y parámetros de diseño de cada una de las etapas de: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

La evaluación de los procesos se desarrolla por métodos experimentales de campo dando como resultado una gama de parámetros para ser relacionados entre sí. El diagnóstico y recomendaciones se obtuvieron desde el punto de vista operacional y de al comparar datos obtenidos experimentalmente con los de diseño de cada proceso.



## ABSTRACT

The water being a main resource for human sustenance, the water treatment plant requires to be evaluated in each of its processes to diagnose the state in which each of them is found through optimal laboratory tests, evaluation Hydraulic and evaluation of design parameters in the main processes which are: coagulation and rapid mixing, flocculation, sedimentation, filtration and disinfection.

The present paper describes each of the processes for the treatment of water to be evaluated on the operational operation in order to estimate the hydraulic behavior by means of mathematical models for non-ideal flow and design parameters of each of the stages of: coagulation, flocculation, sedimentation, filtration and disinfection.

The evaluation of the processes is developed by experimental field methods resulting in a range of parameters to be related to each other. The diagnosis and recommendations were obtained from the operational point of view and from comparing data obtained experimentally with the design of each process.



## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la política de gestión aplicada del Acueducto de Armenia es de abastecer a la ciudad con agua con los mejores estándares de calidad en el cual cumpla con los requisitos establecidos en la Resolución 2115 del 2007, que reglamenta la calidad de agua en Colombia, comprendiendo en el mejoramiento continuo de sus procesos y satisfacción de los cliente.

Armenia ha venido con el transcurso del tiempo un incremento poblacional en un tiempo relativamente corto, generando mayor demanda de servicios públicos además con la implementación de la Resolución 2115 del 2007 se han implementado modificaciones para la optimización de procesos con el fin de mantener la calidad del agua.

La eficiencia en los procesos de potabilización de agua dependen de diversas variables la cuales afectan las características hidráulicas de cada unidad, en el presente estudio se evalúa a partir de las condiciones de operación el comportamiento hidráulico y parámetros de diseño de cada proceso de la planta de tratamiento Empresas Publicas de Armenia.

### 1.1. Planteamiento del problema y justificación

La planta de tratamiento de armenia desde el 2004 ha venido presentado cambios tanto en la estructuras de unidades y filtros, como la construcción de nuevas unidades de floculación– sedimentación, cambios operativos y de proceso, entre otros, en los cuales no se han evaluado el comportamiento de cada procesos a partir de dichas modificaciones.

Los procesos más influyentes dentro del tratamiento de agua potables se da en la coagulación - floculación. El flujo pistón (formado por trayectorias de partículas con tiempo de residencia de igual magnitud) es aquel con el que se espera de manera ideal, operen en las unidades de tratamiento, para ello es necesario que el diseño de la estructura sea tal, que proporcione las menores perturbaciones al flujo en su trayecto desde la entrada, hasta la salida de cada proceso. Es necesario realizar una evaluación hidráulica, tanto de modelos físicos, como de estructuras reales de las unidades, para identificar si éstos, proporcionarán las condiciones necesarias para generar el tipo de flujo esperado, brindando eficiencia en las unidades para garantizar una buena calidad de agua potable. Para ello se requiere un estudio detallado del movimiento del fluido dentro de cada proceso en la planta de tratamiento de agua Empresas Publicas de Armenia, con el objetivo de identificar las posibles causas que afectan su eficiencia a partir de las condiciones de operación.

Muchas de las plantas de tratamiento de agua no tienen la eficiencia esperada por deficiencias hidráulicas que ocasionan determinadas características de flujo en la unidad y



que afectan los periodos de retención del agua en las unidades. Estas situaciones tienen su origen en las deficiencias de diseño o en prácticas inadecuadas de operación en las unidades. Debido a que en el diseño de una planta existen limitaciones, en la actualidad se recurre al modelamiento de tipo numérico, en cual se emplean métodos, tales como diferencias finitas y métodos de elementos finitos. La ventaja que presentan estos modelos es que permiten realizar una caracterización bastante precisa de cada uno de las unidades de la planta, el cual, a su vez, permite identificar zonas de corto circuito, zona de acumulación de sedimentos, entre otros. Conociendo estas características, se puede llegar a realizar una evaluación en el diseño de las unidades.

Este estudio se realiza para evaluar cada proceso en el tratamiento de agua potable de Empresas Publicas de Armenia E.S.P (E.P.A) por medio de ensayo con trazadores, el comportamiento hidráulico y realizar la evaluación de diseño desde el punto de visto operativo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo principal**

Evaluar el comportamiento hidráulico en los procesos de potabilización de agua de Empresas Publicas de Armenia E.S.P., por medio de modelos hidráulicos y parámetros de diseño con el fin de proponer recomendaciones para el buen funcionamiento de estas unidades desde el punto de vista operacional.

### **1.2.2. Objetivo específicos**

- Revisar el diseño original y parámetros de diseño de cada una unidades de proceso
- Determinar parámetros óptimos de dosis de coagulante, pH, gradiente y tiempo de mezcla rápida y lenta por medio de ensayos de tratabilidad
- Evaluar el comportamiento hidráulico de los diferentes procesos de la planta de tratamiento de agua potable por medio de la metodología de estímulo – respuesta empleando NaCl como trazador y el método del flotador.
- Analizar matemáticamente los diferentes procesos por medio de modelos de flujo en reactores: modelos matemáticos de Wolf- Resnick, dispersión y tanques en serie, a partir de la curva del comportamiento del trazador
- Evaluar los parámetros de diseño de cada una de las unidades con respecto a la Norma RAS 2000



- Plantear recomendación técnicas operativas sobre el mejoramiento del funcionamiento para cada una de los procesos



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Planta de tratamiento convencional

La planta de tratamiento de agua tipo convencional está integrada por diferentes procesos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección como se puede observar en la Figura 1.



Fuente: <http://7mogradovds2014.blogspot.com.co/2013/05/proceso-de-potabilizacion-del-agua.html>

El proceso de coagulación se realiza por medio de una agitación fuerte del agua para obtener una dispersión de la sustancia de coagulante en toda la masas de agua y se da en la mezcla rápida luego sigue una agitación lenta para promover el crecimiento y aglomeración del floculo y se da en los floculadores, pasa por un sedimentador en el cual permite la separación partículas floculantes por diferencia de densidad. Por último la filtración termina de remover las partículas que no se sedimentaron en el proceso anterior para luego ser desinfectadas por adición de cloro.

#### 2.1.1. Coagulación – mezcla rápida

El objetivo de la coagulación es la obtención de las condiciones de gradiente de velocidad y tiempo de retención óptimo para producir una mezcla homogénea del coagulante con la masa de agua para lograr la máxima desestabilización de partículas. Dicho proceso se da en unidades de mezcla rápida y se clasifican en dos grupos, como se puede ver en la Tabla 1.

**Tabla 1. Clasificación De Las Unidades De Mezcla Rápida**

| Mecánicas   |                             | Retromezclador en línea  |             |
|-------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| Hidráulicas | Resalto hidráulico          | Canaleta Parshall        |             |
|             |                             | Canal de fondo inclinado |             |
|             |                             | Vertedero rectangular    |             |
|             | En línea                    | Difusores                | En tuberías |
|             |                             |                          | En canales  |
|             |                             | Inyectores               |             |
|             | Estáticos                   |                          |             |
|             | Caídas                      | Orificios                |             |
|             |                             | Vertederos triangulares  |             |
|             | Contracciones               | Medidor Venturi          |             |
|             |                             | Reducciones              |             |
|             |                             | Orificios ahogados       |             |
|             | Velocidad o cambio de flujo | Línea de bombeo          |             |
| Codos       |                             |                          |             |

Fuente: (Pérez Carrión, 2004)

Los mezcladores tipo canaleta Parshall presenta como ventaja que cumple con la doble función de mezclador y medidor de caudal. Este tipo de mezclador es recomendable para aguas que coagulan por el mecanismo de adsorción, dado que produce gradientes de velocidad altos y tiempos de retención muy cortos.

### 2.1.1.1. Parámetros de la Norma Ras 2000

Para el diseño de la canaleta Parshall debe cumplir con los siguientes requisitos presentes en la Tabla 2.

**Tabla 2. Parámetro De La Canaleta Parshall**

| W       | Hf ≥   | Máxima Sumergencia S |
|---------|--------|----------------------|
| 3"-9"   | 0,4 ho | ≤ 0,6                |
| 1'- 8'  | 0,3 ho | ≤ 0,7                |
| 10'-50' | 0,2 ho | ≤ 0,8                |

Fuente: (Vargas L., 2004) diagnostico pag35

La norma RAS 2000 título C establece los siguientes parámetros para evaluar el potencial de la mezcla rápida teniendo en cuenta los mezcladores como la canaleta Parshall en cada una de sus unidades ya sea resalto hidráulico y vertederos (RAS, 2000):



- ✓ La velocidad mínima en la garganta debe ser mayor de 2 m/s.
- ✓ La velocidad mínima del efluente debe ser aproximadamente 0.75 m/s.
- ✓ El número de Froude debe estar entre 1.7 y 2.5 o entre 4.5 y 9.0.
- ✓  $H_0/w$  debe estar entre 0.4 y 0.8. Donde  $H_0$  es la altura del agua y  $w$  es el ancho de la canaleta.
- ✓ Debe disponerse de un dispositivo aguas abajo con el fin de controlar la posición del resalto hidráulico.
- ✓ El tiempo de retención debe ser menor que 1 segundo.
- ✓ El gradiente de velocidad debe estar comprendido entre 1000 y 2000 s<sup>-1</sup>

### 2.1.1.2. Parámetros del manual de filtración rápida CEPIS

El manual de plantas de filtración rápida CEPIS/OPS. Establece los siguientes parámetros para evaluar el potencial de la mezcla rápida teniendo en la geometría de la unidad, el tiempo de retención y la intensidad de la mezcla.

Los siguientes parámetros se deben cumplir para que la canaleta Parshall sirva como mezclador:

- ✓ Trabajar con descarga libre.
- ✓ Que la relación  $H_0/W$  este entre 0.4 – 0.8 para que la turbulencia sea total.
- ✓ Que Numero de Froude este entre 1.7-2.5 ó 4.5-9.0. Valores entre 2.5-4.5 produce un resalto inestable, (no permanece en una sola posición)
- ✓ La intensidad de agitación, medida a través del gradiente de velocidad, puede variar de 700 a 1.300 s<sup>-1</sup> o de 3.000 a 5.000 s<sup>-1</sup> según el tipo de unidad seleccionada.

### 2.1.2. Floculación

La floculación se define como una lenta agitación en el agua para permitir el crecimiento de floc. Este crecimiento es inducido por el contacto de partículas de diámetro mayor de una micra (1 m), el contacto de partículas se crea por el gradiente de velocidad de la masa líquida

Los dos objetivos básicos que se persiguen con la floculación son:

- a. Reunir los microfloculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.
- b. Compactar el floc (disminuyendo su grado de hidratación) para producir una baja concentración volumétrica, que permita una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación – filtración).



Existen dos tipos de floculación: La llamada floculación pericinética, debida al desplazamiento continuo de las moléculas de agua producido por el movimiento Browniano y por la gravedad o peso de las partículas que al caer tienden a aglomerarse. El otro tipo es la floculación ortocinética que es debida al gradiente de velocidad inducidos en el líquido por energía mecánica o hidráulica, causando el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones lo cual aumenta considerablemente la posibilidad de colisión. (Valencia & A.R.Soto, 2000)

En el proceso de floculación existen tres características esenciales que se deben estudiar, estas son:

- a. La forma de producir la agitación
- b. El gradiente de velocidad
- c. El tiempo de retención

#### **2.1.2.1. Factores que Influyen en la Floculación**

Los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son: (Perez Carrion, 2004)

##### **2.1.2.1.1. Naturaleza del agua**

La floculación es extremadamente sensible a las características fisicoquímicas del agua cruda, tales como la alcalinidad, pH, y turbiedad. Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio fisicoquímico del sistema, en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos que se forman o en la interacción de estos polímeros con las partículas coloidales lo que afectara el tiempo de floculación.

##### **2.1.2.1.2. Influencia del Tiempo de Floculación**

En todos los modelos propuestos para la floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones, existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. Mediante ensayos de prueba de jarras (jar test), se puede determinar este tiempo. La permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al optimo produce resultados inferiores, cuanto más se aleje del tiempo óptimo de floculación.

##### **2.1.2.1.3. Influencia del Gradiente de Velocidad**

Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico, inducidas por el gradiente de



velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores

#### **2.1.2.1.4. Influencia de la Variación del Caudal**

Es conocido que al variar el caudal de operación de la planta, se modifican los tiempos de residencia y gradientes de velocidad en los reactores.

Para el floculador hidráulico es algo flexible a estas variaciones. Al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad. Al aumentar el caudal, el tiempo de retención disminuye, el gradiente de velocidad incrementa. En el floculador mecánico, el efecto es más perjudicial debido a su poca flexibilidad, ya que la velocidad permanece constante y el tiempo de residencia aumenta o disminuye de acuerdo con la variación del caudal.

#### **2.1.2.2. Clasificación de Floculadores**

Según el tipo de energía usada para producir la agitación, los floculadores pueden clasificarse en hidráulicos, mecánicos e hidromecánicos como se muestra en la Tabla 3. Los hidráulicos según el sentido del flujo, se clasifican en: de flujo horizontal, de flujo vertical y de flujo helicoidal. Los mecánicos, se clasifican según el sentido del movimiento, en reciprocantes y rotatorios. Y los hidromecánicos, son de flujo horizontal. Cabe destacar también dos tipos de floculadores que tienen carácter experimental; los de piedras y los de mallas. (Valencia & A.R.Soto, 2000)



**Tabla 3. Clasificación De Los Floculadores**

| SEGÚN LA ENERGÍA DE AGITACIÓN | SEGÚN EL SENTIDO DE FLUJO | DESCRIPCIÓN  | NOMBRE         |
|-------------------------------|---------------------------|--|----------------|
| Hidráulicos                   | Flujo horizontal          | Con tabiques de ida y regreso                              | De tabiques    |
|                               | Flujo vertical            | Con tabiques arriba y abajo del tanque                     |                |
|                               |                           | Con codos en el fondo que proyectan el agua arriba y abajo | Alabama        |
|                               |                           | Con entrada lateral al tanque                              | Cox            |
| Mecánicos                     | Rotatorios                | De paletas de eje horizontal o vertical                    | De paletas     |
|                               |                           | De turbinas horizontales o verticales                      | De turbinas    |
|                               | Reciprocantes             | Rejas o cintas oscilantes                                  | Reciprocantes  |
| Hidromecánicos                | Flujo horizontal          | De turbina Pelton y paletas horizontales                   | Hidromecánicos |

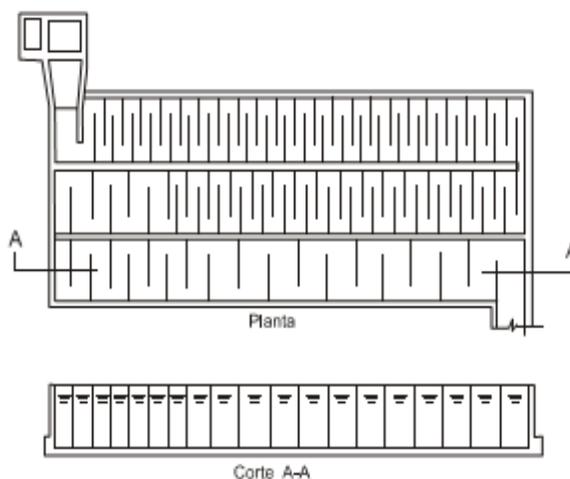
Fuente: (Valencia & A.R.Soto, 2000)

### 2.1.2.2.1. Floculadores Hidráulicos

Los floculadores hidráulicos derivan su energía para la agitación de la masa líquida, de la carga de velocidad que el flujo adquiere al escurrir por un conducto. Consisten en tanques provistos de pantallas entre los cuales el agua circula con una velocidad fija, produciendo cierta turbulencia en cada cambio de dirección del flujo



**Figura 2. Floculadores hidráulicos de tabiques**



Fuente: (Arboleda Valencia, 2000)

Los más comunes son los de flujo horizontal y los de flujo vertical. En los primeros, el flujo va y viene alrededor de los tabiques haciendo un giro de 180° al final de cada uno. En los segundos, el flujo sube y baja en condiciones similares. (Valencia & A.R.Soto, 2000)

#### **2.1.2.2.2. Parámetros de diseño según el RAS 2000**

Estas unidades deben diseñarse teniendo en cuenta los siguientes criterios (RAS, 2000)

- ✓ Velocidad del agua: Se recomienda que la velocidad del agua a través del tanque este entre 0.20 y 0.60 m/s. Algunos diseñadores suelen hacer dos o tres sectores, incrementando el espaciamiento de los tabiques para producir una alta velocidad al principio (0.30 - 0.60 m/s) y baja al final (0.20 - 0.30 m/s).
- ✓ Las velocidades altas (0.60 m/s) Pueden romper el floc, mientras que las bajas (0.10 m/s) permiten la sedimentación de los lodos. Cada una de acuerdo con las fuerzas que mantienen aglutinadas las partículas y los coagulantes que se usen, requiere un estudio especial al respecto.
- ✓ tiempo de retención y gradiente de velocidad: El tiempo de detención y el gradiente de velocidad deben determinarse a través de pruebas de laboratorio. El gradiente medio de velocidad debe estar entre 20 s<sup>-1</sup> y 70 s<sup>-1</sup> y el tiempo de detención entre 20 y 30 minutos, deben determinarse en base a las pérdidas de carga y la longitud de trayectoria del flujo.

### 2.1.2.2.3. Floculadores mecánicos

Los floculadores mecánicos utilizan energía de una fuente externa, normalmente un motor eléctrico acoplado a un intercambiador de velocidades, que hace posible la pronta variación de la intensidad de agitación. (Valencia & A.R.Soto, 2000)

### 2.1.2.2.4. Parámetros de diseño RAS 2000

Estas unidades deben diseñarse teniendo en cuenta los siguientes criterios (RAS, 2000)

- ✓ tiempo de detención y gradiente de velocidad: Estos parámetros deben obtenerse por ensayos previos en laboratorio para diferentes calidades de agua. El tiempo de detención debe estar entre 20 y 40 minutos, el gradiente de velocidad para los floculadores debe ser de 15 s<sup>-1</sup> a 75 s<sup>-1</sup>.
- ✓ velocidad periférica: La velocidad periférica máxima en la punta de la paleta para los floculadores de alta energía debe ser 3 m/s y para los floculadores de baja energía de 0.3m/s a 0.75 m/s. La velocidad de los agitadores debe ser ajustable, de manera que se pueda variar para obtener la velocidad óptima para flocular el agua.
- ✓ dimensionamiento del agitador: La distancia de los extremos de las paletas a los muros, al piso y a la superficie libre del agua, debe estar entre 0.15 m y 0.30 m.
- ✓ interconexión de las cámaras: Para evitar los cortocircuitos en las cámaras de los floculadores mecánicos se debe colocar la pared con orificios sumergidos y vertedero ahogado intercalados.
- ✓ número de unidades: Como la eficiencia es función del número de cámaras, para los niveles bajo y medio de complejidad no debe diseñarse menos de dos unidades en serie y para los niveles medio alto y alto de complejidad mínimo cuatro unidades.

### 2.1.3. Sedimentación

Se entiende por sedimentación, la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento de agua para conseguir su clarificación. Esta relaciona exclusivamente con las propiedades de la caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentradas. (Valencia & A.R.Soto, 2000)



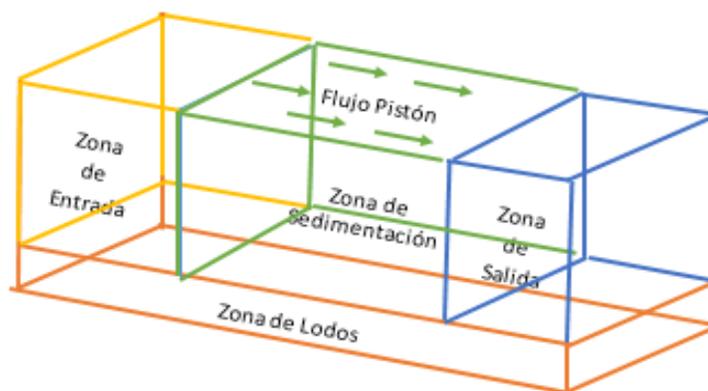
### 2.1.3.1. Tanque Ideal de Sedimentación

El tanque ideal tiene cuatro zonas: zona de entrada, zona de sedimentación, zona de salida o recolección de agua y zona de depósitos de lodos. Como se indica en la Figura 3.

En esta unidad de tratamiento solo se considera el análisis de sedimentación de partículas discretas, que son aquellas que no cambian su forma, tamaño o peso a medida que se sedimentan. Debido a su simplicidad y con el fenómeno de obtener expresiones que representen en cierto grado dicho fenómeno, según (Valencia & A.R.Soto, 2000) se tienen consideraciones que consisten en:

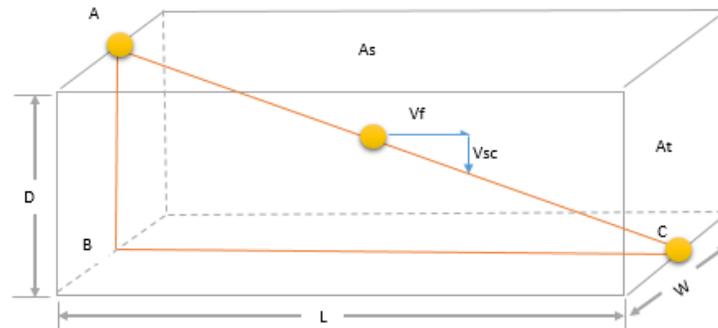
- ✓ Hay una distribución uniforme de partículas en la entrada. La concentración de partículas de cada tamaño es por lo tanto la misma en todos los puntos de la sección transversal de la entrada.
- ✓ En la zona de sedimentación la dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos por lo que responde a un modelo de flujo tipo pistón.
- ✓ La trayectoria de sedimentación de una partícula es recta, descendiente conforme se aleja de la zona de entrada y se acerca a la zona de salida tal y como se aprecia en la Figura 4Figura 3. Toda partícula que entra a la zona de lodos queda atrapada y se considera removida

Figura 3. Tanque Ideal De Sedimentación



Fuente: (autor)

**Figura 4. Trayectoria De Partícula Discreta En Zona De Sedimentación, Tanque Ideal**



Fuente:(autor)

Para la Figura 4;  $V_f$  es velocidad del fluido;  $V_{sc}$ , velocidad crítica de sedimentación;  $L$ ,  $W$  y  $D$  son largo, ancho y alto del sedimentador respectivamente;  $A_s$  y  $A_t$  son área transversal y área superficial de la unidad de tratamiento respectivamente;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , son referencias de posición de la partícula. El análisis de los sedimentadores de tipo rectangular se apega a los criterios establecidos para el sedimentador ideal, por lo que, para ambos se utilizan las mismas ecuaciones.

### 2.1.3.2. Clasificación de Sedimentadores

En un sentido amplio el termino sedimentación comprende un grupo de acciones diferentes según el tipo y concentración de sólidos o partículas en suspensión, los que se resumen en los modelos indicados en la Tabla 4.

Cabe destacar que para el modelo de clarificación tipo 1 los sólidos o partículas son idealizadas como discretas o aisladas, o sea, no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido.

En cambio, en el modelo de clarificación tipo 2 los sólidos o partículas son pesadas como aglomerables y al descender se adhieren o aglutinan entre si cambiando de tamaño, forma y peso específico durante la caída. En la clarificación tipo 3 y 4 es el comportamiento conjunto de los sólidos lo que se analiza, debido a las interferencias mutuas entre partículas que hace que éstas formen un manto de lodos que flota en el líquido.

Cabe destacar que para el modelo de clarificación tipo 1 los sólidos o partículas son idealizadas como discretas o aisladas, o sea, no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido.

**Tabla 4. Diferentes Modelos Del Proceso De Clarificación Por Sedimentación**

| Clarificación por sedimentación tipo | Características de los sólidos en suspensión                 | Descripción del proceso  | Ejemplos   |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 1                                    | Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas       | No hay interacción entre las partículas y el resto de fluido                               | Movimiento de sedimentación en partículas desarenadores o pre sedimentadores |
| 2                                    | Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas | Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas de mayor tamaño                      | Sedimentación de flocs en decantadores horizontales o de placas              |
| 3                                    | Soluciones de concentración intermedia                       | Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables         | Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente                      |
| 4                                    | Soluciones de alta concentración                             | Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo | Compactación de depósitos de lodos   |

Fuente: (Valencia & A.R.Soto, 2000)

En cambio, en el modelo de clarificación tipo 2 los sólidos o partículas son pesadas como aglomerables y al descender se adhieren o aglutinan entre si cambiando de tamaño, forma y peso específico durante la caída. En la clarificación tipo 3 y 4 es el comportamiento conjunto de los sólidos lo que se analiza, debido a las interferencias mutuas entre partículas que hace que éstas formen un manto de lodos que flota en el líquido. Los tipos de sedimentadores, clasificados según el sentido del flujo, utilizados en las unidades de decantación y el tipo de clarificación que se genera se resumen en la Tabla 5.

**Tabla 5. Clasificación De Los Procesos De Sedimentación Según El Sentido Del Flujo**

| Sentido de flujo                     | Tipo de sedimentación | Ejemplo                           | Rata de flujo m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---|
| Horizontal                           | 1 y 2                 | Desarenadores                     | 200 – 420   |
|                                      |                       |                                   | 15 – 30   |
| Vertical                             | 2 y 3                 | Manto de lodos                    | 45 – 60   |
| Inclinado (ascendente o descendente) | 1 y 2                 | Decantadores con módulos o placas | 120 – 180   |

Fuente: (Valencia & A.R.Soto, 2000)



### **2.1.3.3. Parámetros de Diseño según el RAS 2000**

Estas unidades deben diseñarse teniendo en cuenta los siguientes criterios (RAS, 2000)

#### **2.1.3.3.1. Sedimentadores de Flujo Horizontal**

En el diseño de los sedimentadores de flujo horizontal, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Tiempo de retención : tiempo de detención entre 2 y 4 horas
- ✓ Carga superficial: debe de esta entre  $15 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$  y  $30 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$
- ✓ Velocidad del flujo: debe estar diseñado de forma que permita una velocidad horizontal del flujo de agua máximo  $1 \text{ cm/s}$

#### **2.1.3.3.2. Sedimentadores de Flujo Ascendente o vertical**

En el diseño de los sedimentadores de flujo ascendente, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Tiempo de retención : tiempo de detención entre 2h y 4h
- ✓ Carga superficial: debe de esta entre 20 y  $30 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$  máximo  $60 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$

#### **2.1.3.3.3. Sedimentador De Alta Tasa**

En el diseño de los sedimentadores de alta tasa, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Tiempo de retención : tiempo de detención entre 10 – 15 min
- ✓ Carga superficial: debe de esta entre  $120 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$  y  $185 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$  para placas angostas y  $200\text{-}300 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$  para placas profundas. Para velocidades mayores deberá hacerse ensayos en planta piloto
- ✓ Número de Reynolds: debe ser menor a 500 se recomienda un Reynolds menor a 250



#### 2.1.3.3.4. Sedimentador Con Manto de Lodos

En el diseño deben tenerse en cuenta los siguientes criterios

- ✓ Tiempo de detención. El sedimentador debe diseñarse de forma que el tiempo de detención en la unidad esté entre 1 h y 1.5 h.
- ✓ Velocidad del flujo. La velocidad ascendente del flujo en la unidad debe estar entre 30 m/día y 60 m/día.
- ✓ Altura del tanque. La altura del tanque debe estar entre 4.0 m y 7.0 m.
- ✓ Concentración del manto de lodos. La concentración de sólidos en el manto debe estar entre el 10 % y el 20 % en volumen.
- ✓ Altura del manto. La altura del manto varía según la unidad, de 1 m a 3 m

#### 2.1.4. Filtración

La filtración es el proceso mediante el cual los flóculos remanentes de los decantadores son retenidos en medios filtrantes formados principalmente por arena. En la práctica se tiene como objetivo remover turbiedad e impedir la interferencia de la turbiedad con la desinfección, al proveer protección a los microorganismos de la acción desinfectante. (Romero Justina, 2008).

Para plantas de tratamiento convencional se utiliza filtración rápida, este tipo de filtros consta de un tanque rectangular de profundidad total, en el cual va un lecho de arena y grava sobre un sistema de drenaje. Para operar, se deja pasar el agua a través del lecho donde posteriormente es recogida en los drenajes. Al cabo de ciertas horas, el filtro se obstruye, por lo que es necesario introducir agua en forma inversa, esto es desde los drenajes hasta las canaletas de lavado en la parte de arriba para que la arena se expanda y el material que se encuentra acumulado salga.

Es importante aclarar que se entiende por velocidad de filtración a través del lecho, la velocidad que resulta de dividir el gasto aplicado al filtro entre el área total de la unidad y no precisamente la velocidad real a través de los poros del lecho, la cual naturalmente es mayor, y cuya magnitud depende del área útil de paso entre los intersticios dejados por los poros. (Arboleda V., 1969).

##### 2.1.4.1. Parámetros de Diseño según RAS 2000

se establece los siguientes parámetros para evaluar el potencial de los filtros de una planta convencional teniendo en cuenta composición de los lechos filtrantes, soporte del



medio filtrante, la velocidad de filtración, la altura del agua sobre el lecho, pérdida de carga y número de unidades.

1. La composición de los lechos filtrantes: puede ser de un solo medio (arena o antracita), de medio dual (arena y antracita) o lechos mezclados. Puede ser de profundidad convencional de 0.6 m a 0.9 m o de capa profunda de más de 0.9 m de altura.

- Lechos de arena

- ✓ La arena fina (0.35 mm - 0.45 mm) solamente se recomienda en los siguientes casos:
  - a. Cuando el pretratamiento sea poco satisfactorio.
  - b. Cuando se requiera un alto grado de remoción.
  - c. Cuando se pueda operar con periodos cortos de filtración y no sea importante el ahorro de agua de lavado.
  - d. Cuando el sistema de lavado esté diseñado únicamente para arena fina.
- ✓ La arena estándar (0.45 mm - 0.65 mm) se recomienda cuando las condiciones del agua se encuentren entre las que se especifique para arena fina y gruesa.
- ✓ La arena gruesa (0.65 mm - 0.85 mm) se recomienda en los siguientes casos:
  - a. Cuando el pretratamiento sea satisfactorio.
  - b. Cuando no se requiera un alto grado de remoción.

- Lechos de antracita

Para los lechos de antracita, este material debe tener un contenido bajo de cenizas y material volátil, baja friabilidad, alto contenido de carbono fijo y atraxilón (fósiles coloidales), y además libre de mica, polvo, arcilla, sulfuro de hierro, limo y materiales extraños. Las partículas deben ser piramidales con el fin de obtener una mayor área superficial por unidad de volumen, con una densidad no inferior a 1450 kg/m<sup>3</sup> y una dureza de 3.5 en la escala de Mohs. La antracita puede reemplazar la arena parcial o totalmente como lecho filtrante. Las características físicas y químicas de los medios filtrantes, muestreo, ensayos, embarque y colocación del material filtrante, deben cumplir la Norma Técnica Colombiana NTC 2572.

- Lechos mezclados de arena y antracita

Para este tipo de lecho debe formarse una interface de los dos materiales donde ellos se juntan, que no puede ser mayor a 0.15 m. Por tanto los tamaño de los granos de cada



lecho deben ser tales que el diámetro del medio de antracita más grueso (que va encima:  $d_1$ ) sea como máximo cuatro a seis veces mayor que el diámetro del medio menor de arena ( $d_2$ ) que va debajo. ( $d_1 = 4$  a  $6 d_2$ )

2. La tasa de filtración: debe depende de la calidad del agua, de las características de la filtración y de los recursos de operación y control. La tasa normal debe garantizar la eficiencia del proceso. Para el diseño deben adoptarse las siguientes tasas de velocidad filtrante:
  - ✓ Para lechos de arena o antracita sola con tamaño efectivo de 0.45 mm a 0.55 mm y una profundidad máxima de 0.75 m, la tasa debe ser inferior a 120 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>.día).
  - ✓ Para lechos de antracita sobre arena y profundidad estándar, la tasa máxima es de 300 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>.día), siempre y cuando la calidad del floc lo permita.
  - ✓ Para lechos de arena sola o antracita sola de tamaño grueso, con profundidad mayor de 0.9 m, la tasa de filtración máxima es de 400 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>.día). Tasas de filtración mayores a 360 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>.día) deben determinarse en filtros pilotos, siempre que la calidad del floc lo permita
3. La hidráulica del filtro: debe diseñarse para que como mínimo pueda disponer de 2 m de pérdida de carga durante la carrera de filtración. La sumatoria de los descensos de nivel en un filtro de tasa variable declinante durante la carrera debe ser por lo menos igual a 2.0 m

## 2.2. Distribución de Tiempos de Residencia

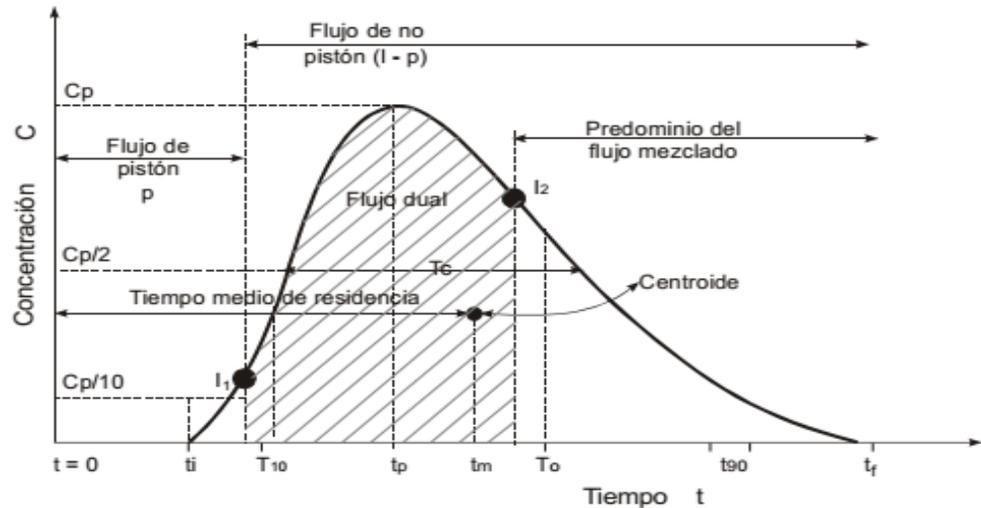
Para determinar el comportamiento hidrodinámico de un sistema o reactor, se debe conocer cuánto tiempo permanece cada una de las partículas o moléculas dentro del sistema, o más exactamente su distribución de tiempos de residencia (DTR). La información de la DTR se determina de manera fácil y directa por métodos experimentales conocidos como estímulo-respuesta o estudios de dispersión utilizando trazadores, lo cual consiste en añadir a la corriente del flujo de agua una cantidad conocida de sustancia trazadora y monitorear la salida de esta sustancia en el tiempo. Las partículas del fluido en cuestión pueden presentar diferentes tiempos de residencia en cualquier sistema (Levenspiel, 1998), debido a condiciones como la configuración geométrica, ubicación y diseño de las estructuras de entrada y salida a la instalación, velocidades del flujo y caudales.

Dentro del análisis de las curvas de distribución, se tiene el de tendencia de la concentración del trazador para la identificación de zonas muertas, cortocircuitos y tipo de flujo del reactor, estas conclusiones de estados son tomadas en base a los resultados de los tiempos de salida del trazador en la Figura 5 y Tabla 6, se muestran los parámetros



usados para determinar las relaciones en base a las cuales determinar el estado hidrodinámico de los reactores.

**Figura 5. Concentración del trazador en el efluente de un reactor**



Fuente: (CEPIS, 2004b)

**Tabla 6. Relaciones En Los Tiempos Experimentales Y Tiempos Teóricos**

| PARÁMETRO   | RELACIONES |   |                             |
|---|------------|---|-----------------------------|
| Ti= tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente   | Ti/To      | >0,3  | Indica cortocircuitos       |
| T10= tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador         |            | = 1   | Flujo pistón                |
| Tp = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración       |            | =0  | Flujo mezclado              |
| Tm= tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total de trazador  | Tm /To     | <1  | Indica cortocircuito        |
| To= tiempo teórico de retención   |            | >1  | Indica zonas muestras       |
| T90= tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador         | Tp / To    | ≈0  | Predomina el flujo mezclado |
| Tf= tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador en el reactor |            | ≈1 y Ti/To >0,5   | Predomina el flujo pistón   |
| Tc= tiempo en que la concentración es mayor que la mitad de la concentración máxima   | Tc/To      | Para un reactor completamente mezclado esta relación es mayor o igual a 0,693                             |                             |
| Co= concentración inicial   | T10/to     | Para un reactor flujo pistón se aproximara al tiempo de inyección y para flujo mezclado será de orden 2,3 |                             |
| Cp= concentración máxima  |            |   |                             |

Fuente: (autor)



### 2.3. Trazadores

(Castany & Margat, 1977) Definen el trazador en carácter específico, como aquella sustancia solidaria en un cuerpo en movimiento, que permite identificar y describir el movimiento de este; esta sustancia puede estar de forma natural o puede ser incorporada al cuerpo en movimiento.

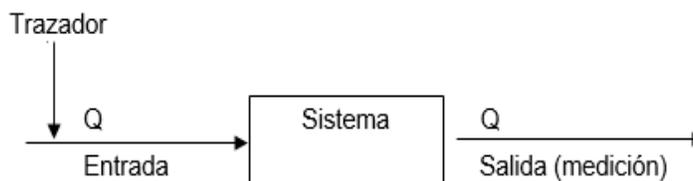
Los trazadores han sido usados en diversos sistemas de tratamiento biológico para determinar la hidráulica y los patrones de flujo: ríos, reservorios y en acuíferos subterráneos. Un buen trazador debe ser de fácil detección, conservativo e inerte, pero pocos compuestos cumplen con estas características. El aspecto más negativo que se puede encontrar cuando se emplean trazadores en los estudios de determinación de tiempos de residencia, es la pérdida del mismo por filtraciones o falencias en el sistema. Los colorantes han sido usados como trazadores conservativos, pero varias investigaciones han revelado que estas sustancias pueden ser adsorbidas por sedimentos, por lodo anaerobio, por contacto de grava y por degradación fotoquímica o biológica (Pérez, Rincón, & Bracho, 2011)

Las unidades de tratamiento no tienen la eficiencia esperada debido a deficiencias de orden hidráulico que ocasionan distorsiones en el flujo dentro de los sistemas y por ende, en las distribuciones de los tiempos de residencia. Las técnicas de trazadores permiten obtener información del sistema o parte de él, mediante la observación del comportamiento del trazador añadido al proceso, durante su recorrido por el sistema.

Si se considera que un fluido está constituido por pequeños elementos que pueden tener igual o diferente comportamiento hidrodinámico en su paso a través de un sistema, podemos definir algunos parámetros cuantitativos de las funciones de distribución de población, utilizadas en el estudio.

Como se presenta en la Figura 6, el trazador a su paso a través del sistema determina un tiempo de residencia. Este es el tiempo que transcurre desde el instante en que entra al sistema hasta que lo abandona.

**Figura 6. Esquema De La Prueba Con Trazadores**



Fuente: (autor)



En plantas de tratamiento su uso ha sido limitado, pero muy útil para la determinación del flujo en unidades paralelas y evaluar las condiciones hidráulicas. En la actualidad estos ensayos se utilizan principalmente para determinar los tiempos reales de retención y sus principales características concomitantes: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento como mezcladores rápidos, floculadores, sedimentadores, así como en modelos de reactores en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de enorme utilidad práctica. También tienen aplicación los ensayos de trazadores para la medición de caudal.

Un ensayo de trazadores consiste en agregar la sustancia trazadora en el afluente del tanque o reactor que se requiere analizar con una concentración conocida y determinando a la salida la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo

### 2.3.1. Sustancias Trazadoras

Las sustancias trazadoras pueden ser:

- a. Colorantes como fluoresceína o rodamina
- b. Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros o nitratos especialmente de sodio.
- c. Elementos radiactivos como isótopos
- d. Ácidos: clorhídrico, benzoico.
- e. Otras sustancias químicas: alizarina, saprol, naptol.

En las plantas de tratamiento de agua se suele usar el ion cloruro. 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 o por concentración de cloruros. (Castany & Margat, 1977)

## 2.4. Modelos de Flujo

En las unidades de tratamiento de una planta, desde el punto de vista hidráulico, el flujo del líquido puede ser de dos tipos: discontinuo o continuo. (Valencia & A.R.Soto, 2000)

### 2.4.1. Flujo Intermitente

El flujo de tipo discontinuo o intermitente es el menos habitual y consiste en llenar la unidad y dejar un tiempo el líquido en ella mientras se produce el proceso



correspondiente, que puede realizarse con o sin mezcla, vaciar la unidad y repetir el ciclo. Este tipo de flujo, en la mayoría de los casos, no es práctico y generalmente los procesos en una planta de tratamiento son de flujo continuo, salvo que el proceso de tratamiento en sí exija la discontinuidad, o se trate de experiencias piloto o pruebas de laboratorio.

## 2.4.2. Flujo Constante

Este tipo de flujo es el habitual en las plantas de tratamiento de agua. Teniendo en cuenta esta característica, los reactores pueden ser de flujo de flujo pistón, mezclado y no ideal.

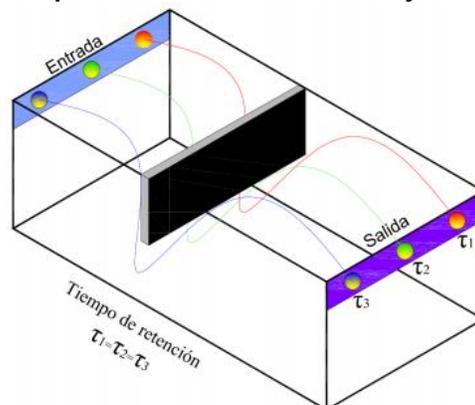
## 2.5. Tipos de Flujo en las Unidades de Tratamiento

### 2.5.1. Flujo Pistón

Se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entra a la unidad permanecen en ella al mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad. (Ver Figura 7).

En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características. Se presenta con bastante aproximación en unidades hidráulicas como los canales Parshall, los vertederos, los floculadores hidráulicos de pantallas y en los decantadores con una relación largo/ancho bastante mayor de 1. (Valencia & A.R.Soto, 2000)

Figura 7. Representación Gráfica De Flujo Pistón

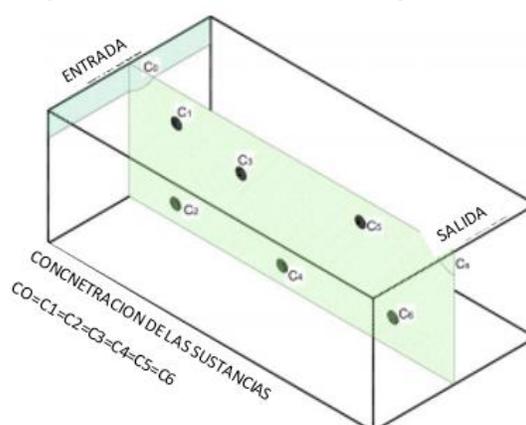


Fuente: (Sánchez, 2015)

## 2.5.2. Flujo Mezclado

Un reactor con flujo mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo reactor. En la práctica es muy difícil de lograr un flujo con estas características; solo se presentara bajo condiciones ideales. Se encuentra con bastante aproximación en retro mezcladores o floculadores mecánicos con pocas cámaras en serie. (Ver Figura 8)

Figura 8. Representación Gráfica De Flujo Mezclado

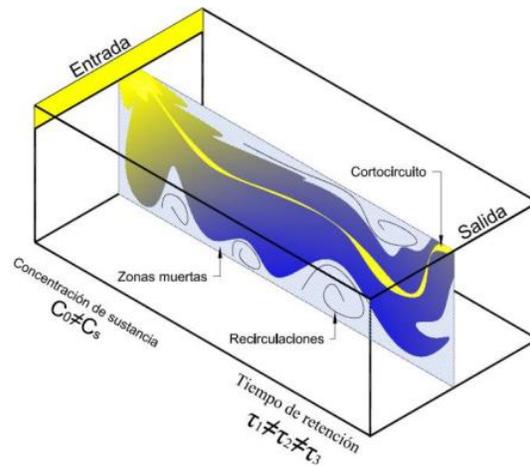


Fuente: (Sánchez, 2015)

## 2.5.3. Flujo No ideal

Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo a pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Viene a ser el tipo de flujo con el que nos encontramos usualmente en las unidades de tratamiento en las plantas. (Ver Figura 9).

Figura 9. Representación Gráfica Del Flujo No Ideal



Fuente: (Sánchez, 2015)

## 2.6. Modelos Matemáticos De Flujo No Ideal

### 2.6.1. Modelos de Dispersión

El modelo de dispersión supone que dentro del reactor no existen zonas muertas o cortos circuitos. Dado que el proceso de mezcla implica redistribución de la materia, por deslizamiento o formación de remolinos, se puede considerar, entonces, que dichas perturbaciones son de naturaleza estadística, tal como ocurre con la difusión molecular. Este proceso físico en una dirección determinada, se rige por la Ley de Fick (Levenspiel, 1998), la cual es descrita por la ecuación 1.

$$\frac{dC}{dt} = \xi \frac{d^2C}{dx^2} \quad (1).$$

De modo similar, se puede asumir que todas las contribuciones a la retomezcla del fluido que circula en la dirección  $x$ , se pueden describir por una ecuación similar, tal como lo muestra la ecuación 2.

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (2).$$

Donde  $D$  es el coeficiente de dispersión longitudinal o axial, el cual caracteriza el grado de retomezcla durante el flujo. La ecuación diferencial básica que representa este modelo de dispersión, se puede trabajar en forma adimensional, haciendo  $z = x/L$ ,  $\theta = t/t_m = tu/L$ , donde  $L$  es una longitud representativa del reactor. Así, la ecuación de dispersión queda como se muestra en la ecuación 3 (Levenspiel, 1998),.

$$\frac{dC}{d\theta} = \frac{D}{uL} \frac{d^2C}{dz^2} - \frac{dC}{dz} \quad (3).$$

Donde  $D/uL$  es un parámetro adimensional denominado módulo de dispersión del recipiente, el cual mide el grado de dispersión axial. Si este parámetro tiende a cero, el flujo tiende a ser un flujo en pistón, y si es grande, tiende, entonces, a un flujo en mezcla completa.

Cuando la curva de concentraciones contra tiempo es muy asimétrica, se puede pensar en que en el reactor la dispersión es grande, por ello, el módulo de dispersión para cada reactor se debe calcular usando la ecuación 4 (Levenspiel, 1998)

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \frac{D}{uL} - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 (1 - e^{-uL/D}) \quad (4).$$

Una vez determinados todos los parámetros, es posible construir la curva analíticamente, tal como se muestra en (Levenspiel, 1998), para ser comparada con la curva  $E(\theta)$  experimental. La curva analítica se construye usando la ecuación 5.

$$E(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\theta\left(\frac{D}{uL}\right)}} \exp\left(-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta\left(\frac{D}{uL}\right)}\right) \quad (5).$$

### 2.6.2. Modelos de Tanque en Serie

Además del modelo de dispersión, el modelo de tanques en serie es otro modelo de un parámetro de aplicación muy extendida para representar el flujo no ideal. En este modelo, se supone que el reactor puede representarse por varios tanques de mezcla completa ideal del mismo tamaño en serie, y el único parámetro es el número de tanques. Dicho número se obtiene para cada reactor, según la ecuación 6 (Levenspiel, 1998)

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \quad (6).$$

Donde  $N$  es el número de tanques en serie, que, para ambos reactores, es de 2. La Curva  $E(\theta)$ , para el modelo de tanques, se puede obtener usando la ecuación 7 (Levenspiel, 1998)

$$E(\theta) = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \quad (7)$$



### 2.6.3. Modelos de Wolf Resnick

Este modelo matemático permite cuantificar el porcentaje de flujo pistón (P), mezcla completa (M) y zonas muertas (m), que se presentan en la operación normal de un reactor. Dicho modelo se representa por la ecuación 8.

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{(1-p)(1-m)} \left[\frac{t}{t_0} - p(1-m)\right]\right) \quad (8).$$

Donde (1-p), representa el porcentaje de flujo no pistón, que se presenta en el reactor.

Para encontrar los parámetros antes mencionados, se debe construir la gráfica de 1-F en escala semilogarítmica y en función del tiempo adimensional (t/t<sub>0</sub>). Luego se traza una recta tangente en el punto donde la línea comienza a volverse vertical. Se llamará α al Angulo comprendido entre la recta tangente y la horizontal, y θ al intercepto de la recta con el eje de las abscisas, obteniéndose las ecuaciones 9 y 10 (CEPIS, 2004b)

$$p = \frac{\theta \tan(\alpha)}{0,435 + \theta \tan(\alpha)} \quad (9)$$

$$\theta = p(1-m) \quad (10)$$

Al realizar una búsqueda bibliográfica se encuentran artículos científicos, tesis y manuales que han sido publicados, relacionados con el funcionamiento hidráulico en plantas de tratamiento de agua.

(Molina, 2010) En su trabajo de modelamiento de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domesticas; se procede a pruebas estímulo respuesta con rodamina WT, como trazador, con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico de los reactores de la planta de tratamiento. La metodología de evaluación consistió en un análisis de las curvas de distribución temporal y acumulada de concentración de trazador en cada reactor para posteriormente hacer ajustes con 3 modelos matemáticos 1). Dispersión, 2). Tanques en serie y 3). Modelos simplificados de Wolf-Resnick. Los resultados permitieron concluir que el transporte de sustancias en el reactor anaerobio se puede simular haciendo uso de modelos de difusión- dispersión. Finalmente se aplica la teoría de análisis dimensional lo cual permitió evaluar la eficiencia de las unidades de sedimentación, sin importar la escala de trabajo.

(Patiño, Cruz, Torres, & Laín, 2012) Realizo una evaluación hidrodinámica de un clarificador hidráulico mediante indicadores de comportamiento hidráulico y modelos simplificados de flujo. En este estudio se evaluó el comportamiento hidrodinámico de un clarificador hidráulico con recirculación de lodos mediante ensayos de trazadores de tipo continuo, a partir de los cuales se determinaron diferentes indicadores de comportamiento hidráulico y modelos simplificados de flujo. El clarificador presentó flujo dual con predominio de mezcla completa durante las horas en las que el agua afluente reportó temperaturas mayores a las del interior del reactor, ocasionando la formación de corrientes de densidad térmicas que promovieron la mezcla en el reactor y aumentaron la



turbiedad en el efluente; adicionalmente, se observó que los indicadores hidráulicos y el modelo de Wolf-Resnick mostraron mayor sensibilidad a la influencia de la temperatura sobre la hidrodinámica del reactor.

(Sánchez, 2015), (Guyonvarch, Ramin, Kulahci, & Plósz, 2015) realizó una técnica alterna para evaluar hidráulicamente las unidades de tratamiento, dicha técnica consistió en una modelación numérica que evalúa los parámetros de flujo con un modelo de dinámica de fluidos computacional (DFC), utilizando un software que se fundamenta en las ecuaciones generales del flujo resueltas con el método de volumen finito. Esta herramienta permitió obtener la dinámica del fluido en los diferentes sitios del sedimentador. Los resultados de la modelación numérica del diseño original mostraron deficiencias importantes en la zona de entrada, se identificaron zonas muertas, de forma global el sedimentador presentó funcionamiento tipo cortocircuito. Para el mejoramiento hidráulico del diseño original se propusieron diferentes modificaciones en el diseño del sedimentador con el fin de disminuir el tiempo de residencia, esta técnica de modelación de DFC resultó una herramienta práctica para el mejoramiento de los diseños de las unidades de tratamiento.

En 2003 (Pineda & Rincon, 2003) realizaron una evaluación del proceso de potabilización de Empresas Públicas de Armenia E.S.P.. Por medio de Jar Test obtuvieron tiempos óptimos de floculación que oscilan entre 15 y 35 minutos, con gradiente de velocidad óptimos que varían entre 18 y 23 s<sup>-1</sup>. Para dicho año se encontraban 4 unidades de floculación – sedimentación las cuales eran: unidad hidráulica llamada Alabama y 3 unidades mecánicas llamadas Permutit 1 y 2 y Unidad Mixta.

Se realizó prueba con cloruro de sodio como trazador para el funcionamiento hidráulico de las unidades. Para el floculador de la unidad Alabama se encontró en buenas condiciones ya que obtuvieron un alto porcentaje en flujo pistón, para la zona uno se encontró el 88% de flujo pistón y un 12 % para flujo mezclado y para la zona dos se encontró el 75 % en flujo pistón y un 23 % de flujo mezclado, no se presentaron cortocircuitos ni espacio muertos ya que el tiempo de retención de 8 minutos y 24 minutos respectivamente, no difieren mucho con los valores teóricos (zona 1 8 min y 29,5 min para la zona 2). Para los gradientes de floculación calculados diferían con los del diseño inicial de las unidades pero no indicaron un mal funcionamiento ya que los valores fueron muy cercanos a los obtenidos en las pruebas de jarras.

Para las unidades mecánicas no se realizó evaluación hidráulica solo se realizaron estudios de los gradientes en cada una de las unidades, concluyeron que los gradientes pueden ser modificados de acuerdo a los parámetros óptimos y realizaron una observación que para la Unidad Mixta se debe adecuar los gradientes de manera que sean mayores en las primeras cámaras para evitar que el floc se forme y se rompa continuamente por la distribución de mallas.

Para las unidades de sedimentación por medio de la prueba de trazadores obtuvieron los siguientes resultados:



**Tabla 7. Resultados de las unidades con la prueba de trazadores**

| Unidad            | Tipo de flujo |                |              | Tiempo de retención teórico (min) | Tiempo de retención real (min) |
|-------------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------------|
|                   | Flujo pistón  | Flujo mezclada | Flujo muerto |                                   |                                |
| <b>Hidráulica</b> | 59 %          | 40 %           | 0%           | 29,5                              | 24,6                           |
| <b>Permutit 1</b> | 32%           | 68%            | 68%          | 68,6                              | 34,8                           |
| <b>Permutit 2</b> | 30%           | 70%            | 75%          | 68,6                              | 37,75                          |
| <b>Mixta</b>      | 17%           | 83%            | 3%           | 44,4                              | 36,6                           |

Fuente : (Pineda & Rincon, 2003)

Los valores para un sedimentador deben de estar en flujo pistón de 60% y flujo mezclado de 40 %, en base con los valores anteriores se concluye que la Unidad Hidráulica presenta un muy buen comportamiento ya que no presenta presencia de cortos circuitos ni zonas muertas. Con respecto a la Unidad Mixta presenta un comportamiento de flujo mezclado con presencia de un 3 % de flujo muerto lo que indica presencia de cortocircuitos pero no es tan significativo ya que el tiempo de retención real y teórica son cercanas. Finalmente para las dos Unidades Permutit presenta un comportamiento de flujo mezclado con alta presencia de cortocircuitos. Un 80% del total del trazador ha pasado antes del tiempo de retención, esto muestra gran cantidad de cortocircuitos.

Para el 2010 la firma (Hidrosan & Ltda, 2010) realizo una consultoría de estudios y diseños para la optimización de los componentes del sistema de producción de agua potable del acueducto de armenia, realizaron pruebas de tratabilidad en el que utilizaron ensayos con 20 , 30 y 40 RPM, para la determinación de tiempo y gradiente óptimo de floculación con policloruro de aluminio obtuvieron el mejor resultado con un gradiente de 23 s-1 que corresponde a 30 RPM.

Para la evaluación de las unidades se establecieron las siguientes condiciones de trabajo para obtener un tiempo de retención de 20 minutos



**Tabla 8. Resultados para la optimización de las unidades.**

|                                      | Unidad Permutit 1 y 2                          | Unidad Hidráulica   | Unidad Nueva  | Unidad Mixta  |
|--------------------------------------|--|---|---|---|
| Sistema de la unidad                 | Manto de lodos con sistema mecánico de paletas | Unidad con floculación hidráulica de flujo vertical con placas de asbesto | Floculación hidráulica de tabiques de flujo vertical y compartimiento de sedimentación de flujo laminar | Floculador hidráulico de flujo vertical y sedimentación laminar |
| Volumen de floculación               | 340,46 m3                                      | 649,66 m3   | 460,8 m3  | 159,04 m3   |
| Área de sedimentación                | 192,06 m2                                      | 220,8 m2  | 125,76 m2   | 108,48 m2   |
| Criterios de optimización            |  |   |   |   |
| Caudal máximo                        | 262,3 L/s                                      | 357,8 L/s   | 192 L/s   | 148,1 L/s   |
| Carga superficial máxima             | 112,5 m3/m2.día                                | 140 m3/m2.día   | 118 m3/m2.día   | 118 m3/m2.día   |
| Caudal de trabajo                    | 250 L/s  | 350 L/s   | 170 L/s   | 130 L/s   |
| Gradiente de velocidad floculación   | n/a  | 5,4 s-1   | 3,2 s-1   | 22,7 s-1  |
| Gradiente de velocidad sedimentación | n/a  | 20,6 s-1  | 24,2 s-1  | 14 s-1  |

Fuente: (Hidrosan & Ltda, 2010)



### 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

#### 3.1. Descripción de la planta de tratamiento de agua potable Empresas Públicas de Armenia.

Se describe todas las características de diseño de cada unidad de proceso

#### 3.2. Ensayos de tratabilidad en el laboratorio para encontrar el gradiente y velocidad optima de mezcla rápida y lenta, dosis óptima, pH óptimo con diferentes calidades de agua.

El procedimiento de la prueba se realizó de igual manera a la recomendada por Jorge Arboleda Valencia, en su libro Teoría y Práctica de la Purificación del Agua, publicado por Acodale equipo empleado para la realización de las pruebas se realizó en un equipo para pruebas de jarras Phipps & bird con velocidad máxima de 300 RPM y con control programable de velocidades y tiempo de agitación Se emplearon jarras rectangulares de 2 litros de capacidad, denominadas jarras Hudson y Wagner con dimensiones de 11,5 x 11,5 x 21,0 cm. Para la determinación de la turbiedad se utilizó un turbidímetro Hach 2100N y para la medición del pH se empleó el pHmetro Metrohm 691

- **Determinación De La Dosis Optima De Coagulante**

Las pruebas se realizaron con diferentes turbiedades que llegaban a la planta, para trabajar con las características químicas y físicas reales del agua.

#### CONDICIONES DEL ENSAYO

**Mezcla Rápida**= 30 segundos a 100 RPM

**Floculación**= 10 minutos a 35 RPM

**Sedimentación** = 10 minutos

- **Determinación Del pH Óptimo De Coagulación**

Para determinar el pH óptimo de coagulación, el cual la remoción de turbiedad fuese el mejor, se realizó pruebas de jarras con muestras de agua cruda con la dosis optima encontradas anteriormente y variando el pH a cada jarra. Esta variación se realiza aplicando ácido sulfúrico o cal diluida.



### **CONDICIONES DEL ENSAYO**

**Mezcla Rápida**= 30 segundos a 100 RPM

**Floculación**=10 minutos a 35 RPM

**Sedimentación** = 10 minutos

#### **3.3. Velocidad media por el método del flotador para la unidad de mezcla rápida**

Para determinar la velocidad media se realizó el método del flotador, el cual consiste en registrar el tiempo que tarda el flotador en recorrer una distancia conocida, el flotador es soltado repetidas veces en unos cuantos metros aguas arriba de la sección de prueba, cronometrando el tiempo de recorrido para obtener un promedio. Luego la velocidad superficial se determina dividiendo la distancia recorrida entre el tiempo promedio del viaje del flotador. La velocidad media se encuentra por debajo de la superficie libre, por lo cual es necesario corregir la velocidad superficial multiplicándolo por un coeficiente que varía entre 0,65 y 0,8; 0,65 para caudales pequeños y 0,8 para grandes caudales.

#### **3.4. Evaluación la condiciones hidráulicas de la canaleta Parshall teóricas y reales ante la Norma RAS 2000**

Para la evolución del diseño de la canaleta Parshall se utilizó el procedimiento analítico sugerido por Jorge Arboleda en el texto Teoría y Práctica de la Purificación del Agua Tomo A, los resultados obtenidos se comparan con los criterios de diseño para mezcladores rápidos para RAS 2000 y AWWA



**Tabla 9. Valores de K y n**

| Unidades Métricas |       |       |
|-------------------|-------|-------|
| W                 | K     | n     |
| 3"                | 0,176 | 1,547 |
| 6"                | 0,381 | 1,580 |
| 9"                | 0,535 | 1,530 |
| 1'                | 0,690 | 1,522 |
| 1 ½'              | 1,054 | 1,538 |
| 2'                | 1,426 | 1,550 |
| 3'                | 2,182 | 1,566 |
| 4'                | 2,935 | 1,578 |
| 5'                | 3,728 | 1,587 |
| 6'                | 4,515 | 1,595 |
| 7'                | 5,306 | 1,601 |
| 8'                | 6,101 | 1,606 |

Fuente: (Azevedo & Álvarez , 1976)

**Tabla 10. Dimensiones Típicas De Canaletas Parshall (Cm)**

| W    | (cm)  | A     | B     | C     | D     | E    | F    | G    | K   | N    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-----|------|
| 1"   | 2,5   | 36,6  | 35,6  | 9,3   | 16,8  | 22,9 | 7,6  | 20,3 | 1,9 | 2,9  |
| 3"   | 7,6   | 46,6  | 45,7  | 17,8  | 25,9  | 38,1 | 15,2 | 30,5 | 2,5 | 5,7  |
| 6"   | 15,2  | 62,1  | 61,0  | 39,4  | 40,3  | 45,7 | 30,5 | 61,0 | 7,6 | 11,4 |
| 9"   | 22,9  | 88,0  | 86,4  | 38,0  | 57,5  | 61,0 | 61,0 | 45,7 | 7,6 | 22,9 |
| 1'   | 30,5  | 137,2 | 134,4 | 61,0  | 84,5  | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |
| 1 ½' | 45,7  | 144,9 | 142,0 | 76,2  | 102,6 | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |
| 2'   | 61,0  | 152,5 | 149,6 | 91,5  | 120,7 | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |
| 3'   | 91,5  | 167,7 | 164,5 | 122,0 | 157,2 | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |
| 4'   | 122,0 | 183,0 | 179,5 | 152,2 | 193,8 | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |
| 5'   | 151,5 | 198,3 | 194,1 | 183,0 | 230,3 | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |
| 6'   | 183,0 | 213,5 | 209,0 | 213,5 | 266,7 | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |
| 7'   | 213,5 | 228,8 | 224,0 | 244,0 | 303,0 | 91,5 | 61,0 | 91,5 | 7,6 | 22,9 |

Fuente: (Azevedo & Álvarez , 1976)





- Velocidad de sección de medición (m/s):

$$v_o = \frac{Q}{D' * h_o} \quad (13).$$

- Caudal específico en la garganta de la canaleta (m<sup>3</sup>/s/m):

$$q = \frac{Q}{W} \quad (14).$$

- Energía específica (m):

$$E = \frac{v_o^2}{2 * g} + h_o + N \quad (15).$$

Dónde:

g= valor de la gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>

N constante que depende del ancho de la garganta el cual se encuentra en la Tabla 10.

- Velocidad antes del resalto (m/s):

$$v_1 = 2 * (2/3 * g * E)^{0,5} * \cos(\theta/3) \quad (16).$$

$$\cos \theta = \frac{-q * g}{(\frac{2}{3} * g * E)^{1,5}} \quad (17).$$

Dónde:

g= valor de la gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>

- altura del agua antes del resalto (m):

$$h_1 = \frac{q}{v_1} \quad (18).$$

- numero de Froude:

$$Nf = \frac{v_1}{\sqrt{g * h_1}} \quad (19).$$

Dónde:

g= valor de la gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>



### Condiciones En El Resalto

- Altura en el resalto (m):

$$h_2 = \frac{h_1}{2 \cdot [(1 + 8 \cdot N \cdot f^2)^{0.5} - 1]} \quad (20).$$

- velocidad en el resalto (m/s):

$$v_2 = \frac{Q}{w \cdot h_2} \quad (21).$$

### Condiciones De Salida

- altura en la sección de salida de la canaleta (m):

$$h_3 = h_2 - (N - K) \quad (22).$$

Dónde:

N y K constantes que depende del ancho de la garganta el cual se encuentra en la Tabla 10.

- Velocidad en la sección de salida de la canaleta (m/s):

$$v_3 = \frac{Q}{c \cdot h_3} \quad (23).$$

Dónde:

C constante que depende del ancho de la garganta el cual se encuentra en la Tabla 10.

- Perdida de carga en el resalto (m):

$$h_p = h_o + K - h_3 \quad (24).$$

Dónde:

K constante que depende del ancho de la garganta el cual se encuentra en la Tabla 10.

- Tiempo de mezcla en el resalto ( s):

$$T = \frac{2 \cdot G}{v_2 + v_3} \quad (25).$$

Dónde:

G constante que depende del ancho de la garganta el cual se encuentra en la Tabla 10.



- Gradiente de velocidad ( s<sup>-1</sup> ):

$$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{hp/T} \quad (26).$$

**Tabla 11. Relación De  $\sqrt{\gamma/\mu}$  para Diferentes Temperaturas Del Agua**

| Temperatura (°C) | $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ |
|------------------|-----------------------------|
| 0                | 2336,94                     |
| 4                | 2501,56                     |
| 10               | 2736,53                     |
| 15               | 2920,01                     |
| 20               | 3114,64                     |
| 25               | 3266,96                     |

Fuente: (Azevedo & Álvarez , 1976).

En la Tabla 11 se observa las medidas reales y los teóricos sugeridos por (Azevedo & Álvarez , 1976). Con estos valores se calculan las condiciones de entrada, en el resalto y de salida,

### 3.5. Determinación del Tiempo y gradiente optimo

Para las pruebas de tratabilidad se basaran según lo establecido por el RAS 2000, titulo C, el cual estipula que el procedimiento para las pruebas de jarras deben guiarse por la Norma Técnica Colombiana NTC 3903 (ICONTEC, 2001), además se considerará que todo análisis de laboratorio debe hacerse de acuerdo a la normatividad vigente y en su ausencia con los métodos estándar internacionales como Normas ASTM; Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water (Rice & Bridgewater, 2012)

Objetivo: Este ensayo se realiza a nivel de laboratorio por medio de la prueba de jarras con el fin de encontrar el gradiente y la velocidad óptima de floculación.

### PROCEDIIMIENTO

1. Determinar las características del agua cruda ( pH, alcalinidad, turbiedad y color)
2. Determinar la dosis optima de coagulante con respecto a la calidad del agua cruda



Con la dosis optima de coagulante, Se realiza diferentes ensayos a diferentes revoluciones por minuto (RPM) en la mezcla lenta. Dejando sedimentar por 10 minutos y se realiza análisis de turbiedad y color de cada una de las muestras. La secuencia en los ensayos se controla como se presenta en la

**Tabla 12. Secuencia de ensayos en el Jart Test.**

| Tiempo (minutos) | Acción por ejecutar                               |
|------------------|---|
| 0                | Comienza la floculación al gradiente seleccionado |
| 7                | Se levanta el agitador de la jarra N° 1           |
| 13               | Se levanta el agitador de la jarra N° 2           |
| 17               | Se toma la muestra de la jarra N° 1               |
| 20               | Se levanta el agitador de la jarra N° 3           |
| 23               | Se toma la muestra de la jarra N° 2               |
| 27               | Se levanta el agitador de la jarra N° 4           |
| 30               | Se toma la muestra de la jarra N° 3               |
| 33               | Se levanta el agitador de la jarra N° 5           |
| 37               | Se toma la muestra de la jarra N° 4               |
| 40               | Se levanta el agitador de la jarra N° 6           |
| 43               | Se toma la muestra de la jarra N°5                |
| 50               | Se toma la muestra de la jarra N°6                |

*Fuente: (autor)*

### 3.6. Ensayos de trazabilidad para el estudio del comportamiento hidráulico de cada una de las unidades de floculación y sedimentación con NaCl como trazador

Las herramientas tales como indicadores de rendimiento hidráulicos y modelos de flujo simplificado basado en los estudios de seguimiento han conducido a la evaluación hidrodinámica de un reactor a partir de datos de campo. De acuerdo con el método de dosificación, los estudios de seguimiento pueden ser del tipo de adición instantánea (usando una concentración conocida en la entrada del reactor por un período muy corto) o adición continua (inyección de forma continua una concentración de trazador a una velocidad constante durante un período de no menos de tres veces el tiempo de retención y luego interrumpir bruscamente la dosis) (Patiño et al., 2012)

Objetivo: determinar la distribución del flujo en unidades paralelas y evaluar las condiciones hidráulicas. En la actualidad estos ensayos se utilizan principalmente para determinar los tiempos reales de retención y sus principales características concomitantes: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento como mezcladores rápidos, floculadores, sedimentadores.



## PROCEDIMIENTO

La aplicación del trazador puede hacerse en forma continua o instantánea

### A. Aplicación instantánea

Se aplica una concentración ( $C_0$ ) a la entrada de la unidad en evaluación en un tiempo muy corto, inferior a  $1/30$  del tiempo de retención teórico ( $t_0$ ) y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua afluyente de la unidad que se piensa a analizar

En la dosificación instantánea, la concentración ( $C_0$ ) que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua. Para el caso del ion cloruro como trazador, es común usar concentraciones entre 30 y 50 mg/L.

La cantidad de trazador  $P$  (Kg) que se necesita añadir al reactor en evaluación esta dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V \cdot K \cdot C_0}{I \cdot 10^3} \quad (27)$$

Donde:

$P$  = peso del trazador por añadir al reactor, Kg

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

$K$  = Constante de corrección

$C_0$  = concentración, mg/L o g/m<sup>3</sup>

$I$  = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

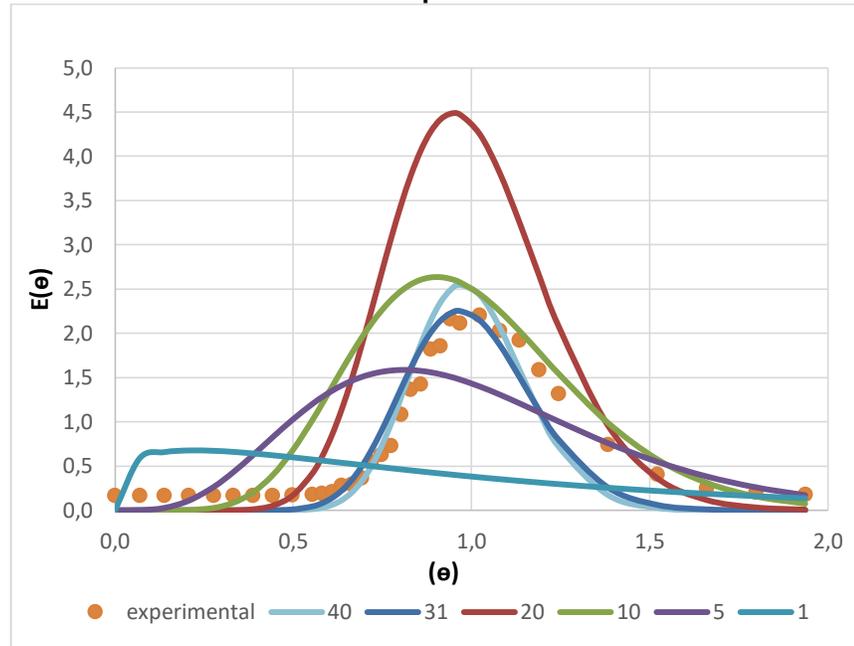
Una vez agregado el trazador, completamente disuelto, se toman muestras en frascos enumerados a la salida del floculador ya sea cada 2, 3, 4 o 5 minutos y se analizan el contenido de cloruros de la muestra o mediciones de conductividad de cada muestra.

### 3.7. Análisis hidráulico por medio de los modelos matemáticos de dispersión, tanques en serie y Wolf Resnick las unidades de floculación

Se realiza los cálculos descritos en el marco teórico a continuación en la Gráfica. 1 se muestra un ejemplo del modelo de tanques en serie en cual se puede ver como la curva experimental se ajusta al número de tanque en serie igual a 31.



**Gráfica. 1 Modelo tanques en serie**



Fuente: (autor)

### 3.8. Cálculo de pérdidas de carga a través de orificios y gradiente de velocidad para las unidades de floculación hidráulicas

Las características de los sistemas de floculación Hidráulica existentes se han tomado de los planos definitivos de construcción 8/41 a 13/41 del contrato de obra N° 403 de 2092 “ampliación y optimización planta de tratamiento Regivit– armenia “

Los cálculos se hicieron a partir de la siguiente fórmula:

- Pérdida de carga a través de orificios

$$hf = \frac{Q^2}{Cd^2 * A^2 * 2 * g} \quad (29)$$

Dónde:

hf= pérdida de carga (m)

Q= caudal a través del orificio (m<sup>3</sup>/s)

Cd= coeficiente de descarga; Cd ≈ 0,65

A= área de orificio (m<sup>2</sup>)

g= aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

### 3.9. Cálculo de gradiente de velocidad para las unidades de floculación mecánico

Se efectúa el cálculo de potencias teóricas y gradientes de velocidad de acuerdo a las dimensiones de la paleta.

Cada Unidad dispone de dos ejes, cada uno con 10 juegos de paletas.

- potencia teórica:

$$P = 10000 * n^3 * \Sigma A r^3 \quad (30)$$

Dónde:

n= número de revoluciones por minuto (RPM)

A= área de las paletas (m<sup>2</sup>)

r= distancia de cada paleta la eje de giro

- Gradiente de velocidad para eje horizontal:

$$G = 90 \sqrt{\frac{n^3 * \Sigma A * r^3}{\mu * V}} \quad (31)$$

Dónde:

N= velocidad de rotación (RPM)

A= área de las paletas (m<sup>2</sup>)

μ= viscosidad dinámica

V= volumen de la cámara de floculación

### 3.10. Cálculo de carga en los sedimentadores

Se halla la carga de superficial teórica y real mediante la siguiente formula:

- Carga superficial

$$q = \frac{H * 86400}{T_o * 60} \quad (32)$$

Dónde:

Cs = carga superficial (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día)

H= profundidad del sedimentador (m<sup>3</sup>/s)

To = tiempo de retención (min)

### 3.11. Cálculo de carga en la zona de entrada en los sedimentadores

Las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

- Velocidad de entrada:

$$V = \frac{Q}{N * A_o} \quad (33)$$



Dónde:

V= velocidad (m/s)

Q= caudal (m<sup>3</sup>/s)

N=número de orificios

Ao= área de los orificios (m<sup>2</sup>)

- Gradiente para orificios rectangulares

$$G = n * \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} * Rh^{-0,7} * V^{1,5} \quad (34)$$

Dónde:

G= gradiente de velocidad (s<sup>-1</sup>)

n= coeficiente de rugosidad

σ= densidad del agua (Kg/m<sup>3</sup>)

μ= viscosidad absoluta (Kgm/m<sup>2</sup>-s)

R<sub>h</sub>= radio hidráulico (m)

V= velocidad (m/s)

- Gradiente para orificios circulares

$$G = \sqrt{\frac{0,04 * V^3}{\nu * 8 * Rh}} \quad (35)$$

Dónde:

G= gradiente de velocidad (s<sup>-1</sup>)

ν= viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

R<sub>h</sub>= radio hidráulico (m)

V= velocidad (m/s)

### 3.12. Cálculo de carga en la zona de sedimentación en los sedimentadores

Se evalúa la carga unitaria en vertederos y volumen perdido en la sedimentación.

- Carga superficial

$$q = \frac{Q * 3600}{L} \quad (36)$$

Dónde:

C<sub>s</sub> = carga lineal del vertedero (m<sup>3</sup>/h)

Q= caudal (m<sup>3</sup>/s)

L=longitud del canal recolector

- Velocidad de aproximación

$$V_o = \frac{q}{\text{sen } \theta - n * e * a} \quad (37)$$



Dónde:

$V_o$ = velocidad a través de las placa (m/s)

$Q$ = caudal ( $m^3/s$ )

$\Theta$  = Angulo de inclinación de las placas

$n$ = número de placas

$e$ = espesor de las placas (m)

$a$ = largo de la placa (m)

- Volumen perdido en la zona de sedimentación

$$V1 = k * \frac{q}{V_o^2} \quad (38)$$

Dónde:

$q$ = carga lineal en vertederos ( $m^3/h$ )

$V_o$ = velocidad de aproximación (m/h)

$K= 0,45$

### 3.13. Pérdida de carga y tasa promedio en filtros

Se evalúa la pérdida de carga y tasa promedio de filtración de los filtros autolavados.

- Tasa promedio de filtración:

$$tp = \frac{Q}{N * A} \quad (39)$$

Donde:

$Q$ = caudal ( $m^3/s$ )

$N$ = Numero de filtro

$A$ = área total ( $m^2$ )

$Tp$ = tasa de filtración ( $m^3/m^2$  día)



➤ Pérdida de carga localizadas

$$hf = \Sigma k \frac{v}{2 * g} \quad (40)$$

Donde:

hf: pérdida de carga por accesorios (m)

v: velocidad de filtración (m/s)

k: coeficiente de pérdida

g: gravedad (m<sup>2</sup>/s)

➤ Pérdida de carga por lecho

$$hf = f * \frac{L * \vartheta}{g} * tp \frac{(1 - Po)^2}{Po^3} * \left( \frac{6}{Ce * De} \right)^2 \quad (41)$$

Donde:

hf= pérdida de carga por lecho (m)

f= coeficiente de Kozeny

L=altura del lecho (m)

ϑ= viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

g= gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Po= porosidad

Ce: coeficiente de porosidad

De: diámetro del lecho

tp: velocidad de filtración (m)



## 4. RESULTADOS

A continuación se analiza los resultados con el fin de evaluar operacionalmente la hidráulica, el régimen de flujo y los parámetros de diseño en los diferentes procesos para el tratamiento de agua potable de Empresas Publicas de Armenia E.S.P., empleando diferentes áreas de la ingeniería química tales como mecánica de fluidos, comportamiento de flujo no ideal en reactores, optimización de parámetros químicos, diseño de unidades, control de procesos y operación. Los resultados se analizaron a partir de parámetros y recomendaciones bibliográficas principalmente: Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico Ras 2000, Manual de tratamiento de aguas potables Jorge Arboleda, Ingeniería de las reacciones químicas; Octave Levenspiel, Tratamiento de agua para consumo humano OPS, CEPIS, Manual de Hidráulica, Azevedo.

### 4.1. Descripción de la planta Empresas Publicas de Armenia E.S.P

La planta es de tipo convencional que consta de un sistema de desarenación, mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Cuenta con una capacidad máxima de 1250 L/s, el caudal de operación es de 900L/s, la aplicación de coagulante se realiza cuando llega a la planta agua con turbiedad mayor a 2 y color mayor de 18; de lo contrario se abre el canal de paso directo a los filtros y se realiza filtración directa. (Ver Fotografía 1).

**Fotografía 1. Planta De Tratamiento De Agua Potable Empresas Públicas De Armenia E.S.P.**



*Fuente: (autor)*

#### 4.1.1. Tanques desarenadores

El agua cruda ingresa a la planta por una tubería de 36" a una cámara de 5 m<sup>3</sup> de capacidad, que alimenta un canal de 13 m de longitud y distribuye el agua a las dos unidades desarenadoras convencionales de flujo horizontal con capacidad de 330 m<sup>3</sup> cada una, cuenta con un canal de entra, un paso directo controlado por compuerta; un canal de salida, un canal de rebose agua abajo en la salida, una cámara de desagüe y dos tuberías de desagüe controladas por válvulas de compuerta. (Ver Fotografía 2) Sus dimensiones son las siguientes:

- Ancho: 4,91 m
- Largo: 18 m
- Profundidad media: 2,5 m

Fotografía 2. Desarenadores



Fuente: (autor)

#### 4.1.2. Mezcla rápida

El agua de los desarenadores pasa por un canal de 1,2 m de ancho por 1,25 m de lato hacia la canaleta Parshall, la cual sirve como medidor de caudal. La canaleta presenta las siguientes características:

- Material: fibra de vidrio
- Capacidad: 1,3 m<sup>3</sup>
- Ancho de la garganta: 0,9 m
- Ancho aguas arriba: 1,55 m
- Ancho aguas abajo: 1,2 m

La mezcla rápida es realizada sobre el resalto hidráulico producido por un cambio brusco de pendiente de una rampa de concreto de 1 m de largo en el sentido del flujo, con un ancho de canal igual a 1,4 m y altura de 0,81m ubicado a 1,1 m de la canaleta Parshall. El Policloruro de Aluminio se aplica por medio de una tubería PVC de 8". El agua mezclada se distribuye hacia las Unidades de floculación- sedimentación por medio de un canal de 1,18 m de ancho por 1,1 m de alto. (Ver Fotografía 3).

**Fotografía 3. Canaleta Parshall**



*Fuente: (autor)*

#### **4.1.3. Sistemas de floculación – sedimentación**

A continuación se describirán brevemente los tres procesos de floculación - sedimentación en unidades llamadas Unidad Hidráulica, Unidad Nueva, Unidad Permutit 1 y Unidad Permutit 2 que hace parte del sistema actualmente en la planta de tratamiento. (Ver Fotografía 4)

#### Fotografía 4. Unidades De Floculación- Sedimentación



Fuente: (autor)

#### 4.1.3.1. Unidad Hidráulica

Este sistema como una sola unidad de floculación hidráulica de flujo vertical en dos sectores y sedimentación laminar de alta tasa en dos compartimientos provistos de placas de asbesto cemento.

El agua mezclada pasa por un canal de 1,18 m de ancho por 1,9 m de alto, pasa a el primer sector de floculación hidráulica de eje vertical que consiste en 2 series de 5 cámaras, cada una de 2 m longitud x 2 m de ancho y 4,7 m de profundidad útil; con un volumen total de 188m<sup>3</sup>; poseen orificios rectangulares en el fondo de la entrada y salida del agua, además cada una de ellas excepto la primera posee un vertedero para obligar que el agua tenga un cambio de dirección. Posteriormente el agua de la primera sección se mezcla en un canal de 1 m de ancho por 9,2 m de longitud para direccionar el agua hacia el segundo sector de floculación.

El segundo sector de floculación hidráulica consiste en 6 cámaras en serie de sección compuesta rectangular y trapezoidal de 9,618 m<sup>2</sup> de área total y 4 m de longitud, con lo cual tiene un volumen útil de 461,66 m<sup>3</sup>.

Después de que el agua termina el recorrido por la unidad de floculación, pasa la última cámara de la segunda fase por medio de dos orificios en el fondo de cada lado de la misma, hacia dos canales múltiples difusores uno para cada unidad de sedimentación, con una sección trapezoidal de base mayor de 1,6 m, base menor 0,3m y altura 1,3 m, el agua sale al sedimentador por medio de 34 orificios rectangulares de 0,4 m por 1,5 m.

La sedimentación se efectúa en dos compartimientos, cada uno con dos hileras de placas distribuidas en 5 sectores de 2,40 m de ancho y 4,6 m de longitud para un área total de

220,8 m; el flujo ascendente se encuentra las placas de asbesto – cemento, luego el agua es recolectada por medio de 13 canaletas de fibra de vidrio, de 0,3 m x 0,3 m de sección y 5 m de longitud provistas a cada lado de vertederos triangulares en v de 90 ° las cuales descargan libremente en canales longitudinales de 0,7 m de ancho. Por ultimo pasa a un canal de 1,2 m de ancho por 1m del alto es cual la lleva a continuar con el proceso de filtración.

#### **FLOCULADOR HIDRAULICO EJE VERTICAL**

- Caudal de diseño: 400 L/s
- Gradiente de velocidad: 90- 20 s<sup>-1</sup>
- Gradiente primera fase: 90 – 70 s<sup>-1</sup>
- Gradiente segunda fase: 60 – 20 s<sup>-1</sup>
- Tiempo de retención primera fase: 250 s
- Tiempo de retención segunda fase: 1250 s
- Número de cámaras primera fase: 5 \*2
- Número de cámaras segunda fase: 6
- Volumen total primera fase: 188 m<sup>3</sup>
- Volumen total segunda fase: 461,6 m<sup>3</sup>
- Tiempo de retención total: 25 min
- Velocidad: 0,2 m

#### **SEDIMENTADOR DE ALTA TASA**

- ancho: 2,4 m
- longitud: 4,6 m
- área total: 220,8 m<sup>2</sup>
- caudal de diseño: 400L/s
- área real de las placas plana AC: 13,71 m<sup>2</sup>
- largo de las placas: 2,4 m
- ancho de las placas: 1,2 m
- espesor de las placas: 0,01m
- inclinación: 60 °
- separación entre placas: 0,07 m
- longitud zona de placas: 23 m
- número de placas: 680

#### **4.1.3.2. Unidad Nueva**

Este sistema es la más nueva de la planta construida en 2003, cuenta como una sola unidad de floculación hidráulica de flujo vertical cuenta con dos módulos de floculación – sedimentación independientes.



El agua mezclada pasa a la unidad de floculación de tabiques de flujo vertical constituidas por 12 compartimientos por cada lado con características de 2,0 m de ancho, 1,0 m de longitud y aproximadamente 4,8 m de profundidad útil, con un volumen total de 230,4 m<sup>3</sup>.

Después de que el agua termina el recorrido por la unidad de floculación, pasa la última cámara de la segunda fase por medio de dos orificios en el fondo de cada lado de la misma, hacia dos canales múltiples difusores uno para cada unidad de sedimentación, con una sección trapezoidal de base mayor de 1,85 m, base menor 0,35 m y altura 1,5 m, el agua sale al sedimentador por medio de 45 orificios de distribución de 6 pulgadas de diámetro cada 0,5 m.

La sedimentación se efectúa en dos compartimientos, el flujo asciende a paneles de plástico distribuidas en 5 sectores de 2,40 m de ancho y 4,6 m de longitud, luego el agua es recolectada por medio de 12 canaletas de fibra de vidrio, de 0,3 m x 0,3 m de sección y 4,9 m de longitud provistas a cada lado de vertederos triangulares en  $v$  de 90 ° las cuales descargan libremente en canales longitudinales de 0,7 m de ancho. Por último pasa a un canal de 1,2 m de ancho por 1 m del alto es cual la lleva a continuar con el proceso de filtración.

#### **FLOCULADOR HIDRAULICO EJE VERTICAL**

- Caudal de diseño: 350 L/s
- Gradiente de velocidad: 30 s<sup>-1</sup>
- Tiempo de retención: 1200 s
- Número de cámaras: 12 \*2
- Volumen total: 230,4 m<sup>3</sup>

#### **SEDIMENTADOR DE ALTA TASA**

- ancho: 4,8 m
- longitud: 26,2 m
- área total: 251,52 m<sup>2</sup>
- caudal de diseño: 350 L/s
- área real de módulos tubulares: 125,76 m<sup>2</sup>
- longitud de los módulos tubulares: 1,2 m
- inclinación: 60 °

#### **4.1.3.3. Unidad Permutit 1 y 2**

Los sistemas Permutit de manto de lodos (precipitadores) constituyen las unidades de clarificación más antiguas de la planta.

El agua mezclada ingresa a cada una de las unidades por un canal central en la parte superior con sección trapezoidal con base inferior de 1,29m, basa superior de 0,51 m y



una altura de 0,63 m con orificios en el fondo, descendiendo hacia la zona de la floculación donde se encuentra dos ejes de agitadores mecánicos cada uno con 10 juegos de paletas, esta zona está ubicada en la parte central de cada unidad tiene un área trapezoidal cuyas dimensiones son : base superior 1,29 m, base inferior 2,3 m y una altura de 1,14 m, el agua continua por la parte de abajo hacia las dos zonas de sedimentación y asciende a través de las colmenas plásticas que aumentan la carga superficial de las unidades.

El agua sedimentada es recolectada a lo ancho de cada una de las zonas de sedimentación por medio de canaletas de recolección de 0,25 m x 0,30 m de sección y 3,30 m de longitud, construidas en fibra de vidrio y provistas de doble hilera de orificios triangulares en forma de v de 90°. Finalmente el agua recolectada para por un canal a cada lado de 0,63m de ancho y 1,1 m de alto ubicado en los dos extremos de la unidad. Finalmente los dos canales de cada unidad entregan el agua a un canal por medio de un vertedero de cresta delgada sumergido con una altura de 0,26 m y es conducida hacia los filtros.

- Caudal de diseño: 250 L/s
- Volumen total: 1104,21 m<sup>3</sup>
- Volumen útil: 1029,2 m<sup>3</sup>
- Tiempo de retención teórico: 67 min

#### 4.1.4. Filtración

El proceso de filtración se lleva a cabo en dos estructuras, 4 filtros convencionales y 10 filtros autolavados. Ambas estructuras han sufrido diversas modificaciones para optimizar su funcionamiento, a continuación se describe brevemente sus características actuales.

##### 4.1.4.1. Filtros convencionales

Este sistema consta de 4 unidades, cada una con dos compartimientos de filtración de 2,775 m x 8,20 m y 3,20 m de profundidad total, para un área de filtración total de 180,4 m<sup>2</sup>. (Ver Fotografía 5).

Cada filtro consta de:

- Sistema de drenaje constituido por bloques “ Leopold” de arcilla vitrificada de 0,25 m de altura para lavado contracorriente, agua y aire
- Lecho filtrante doble de arena con 0,15 m de espesor y antracita con 0,50 m de espesor sobre lecho de sostén de grava gradada de 0,20 m de espesor.



- Dos hileras de 4 canales de lavado de 0,30 m de ancho libre y un caudal central de descarga de agua sucia de lavado de 0,50 m de ancho
- En la galería de conductos se dispones de las siguientes tuberías con sus válvulas:
  - a. Admisión de 14" de diámetro a cada filtro, derivada de un canal central de agua sedimentada de 1,20 m x 1,20 m de sección, con una válvula de operación remota de 16" de diámetro.
  - b. Admisión del agua de lavado procedente del tanque elevado de 16" de diámetro, con derivación a cada filtro en el mismo diámetro, provista de válvula de operación remota de 16" de diámetro
  - c. Sistema de lavado con aire a presión, en cada filtro en bajante en tubería de 8" de diámetro y tubería de distribución de aire de 6 " de diámetro con 11 derivaciones, las tuberías de aire son de acero, Schedule 30
  - d. Salida de agua filtrada de cada unidad en 14 " de diámetro derivada de la tubería de admisión de agua de lavado
  - e. Desagüe del agua sucia de lavado en tubería , accesorios y válvula de 18" de diámetro
  - f. Drenaje de filtro o relavado de 4" de diámetro

Datos técnicos:

Caudal por unidad: 0,125 m<sup>3</sup>/s

Ancho: 1,51 m

Largo: 1,02 m

Profundidad: 3,88 m

Área por unidad: 45,10 m<sup>2</sup>

Espesor de la antracita: 0,5 m

Espesor de la arena: 0,15 m

Número de filtros: 4

Área total de filtración: 180,40 m<sup>2</sup>+

Falso fondo: Leopold

Sistema de lavado: tanque elevado y aire

Duración de lavado: 10 min



**Fotografía 5. Filtros convencionales**



*Fuente: (autor)*

#### **4.1.4.2. Filtros autolavados**

Consta de diez unidades de 3,81 m x 7,62 m y 4,70 m de profundidad en dos hileras de 5 filtros cada una. Debido al espacio ocupado por el sistema de admisión de agua de lavado, la longitud útil del lecho filtrante se reduce a 7,25 m, para un área total de 276,2 m<sup>2</sup>. (Ver Fotografía 6)

Cada filtro consta de:

- a. Sistema de drenaje falso fondo tipo "S" Leopold, fabricados en polietileno de alta densidad y diseñados para lavado con aire y agua
- b. Lecho filtrante doble de arena con 0,305 m de espesor y antracita con 0,457 m de espesor sobre lecho de sostén de grava gradada de 0,2305 m de espesor.
- c. Canaleta central de lavado en lámina de acero de 0,70 m de ancho, 0,60 m de altura y 7,62 m de longitud
- d. Admisión de agua decantada: se hace en válvulas de mariposa de diámetro de 16" provista de vástago de extensión, columna de maniobra y rueda de manejo, la cual descarga mediante codo de 90 ° en la canaleta de lavado
- e. Salida de agua filtrada: se hace inicialmente mediante orificio de 0,86 m x 0,84 m a una cámara situada debajo del canal de salida, la cual comunica con dicho canal mediante válvula de fondo de 24" de diámetro

Existe un canal de salida de 0,84 m de ancho y 1,74 m de profundidad total para cada una de las dos hileras de filtros. Los dos canales de salida se juntan en un canal común de 2 m de ancho donde se encuentra situado el vertedero de control del lavado

- f. Descarga de agua sucia de lavado mediante compuerta lateral de 0,5 m X 0,5 m provista de vástago de extensión, columna de maniobra y rueda de manejo, la cual está conectada al extremo de la canaleta de lavado.
- g. Drenaje de filtros: se hace mediante válvula de compuerta de 4" de diámetro,
- h. Sistema de lavado con aire a presión, en cada filtro en bajante en tubería de 8" de diámetro y tubería de distribución de aire de 6 " de diámetro con 11 derivaciones, las tuberías de aire son de acero, Schedule 30

**Fotografía 6. Filtros Autolavados**



*Fuente: (autor)*

#### **4.1.5. Desinfección**

La desinfección que se realiza en la planta de tratamiento es por medio de cloro, el cloro líquido es dosificado por cloradores en forma de gas licuado a la masa de agua. En la planta existe una edificación donde se almacena cilindros de 907 Kg y se dosifica el cloro al agua filtrada.

El tanque de contacto de cloro tiene un diseño para un caudal de 1260 L/s con dimensión de 20 m de longitud x 12,6 m de ancho y 5 m de profundidad total. El tanque consta de 7 tabiques de 9,60 m de longitud a distancias de 2,5 m entre ejes, dejando espacios alternados de 3 m a fin de incrementar la longitud de recorrido del agua.

El tanque dispone de tapa de inspección, válvula de mariposa de desagüe de 8" de diámetro y elementos de aireación de 4" de diámetro

**Fotografía 7. Sala de Dosificación de Cloro**



*Fuente: (autor)*

## **4.2. Proceso De Coagulación – Mezcla Rápida**

La evaluación de este proceso incluye parámetros óptimos de dosis de coagulante, pH y tiempo y gradiente y tiempo de mezcla rápida.

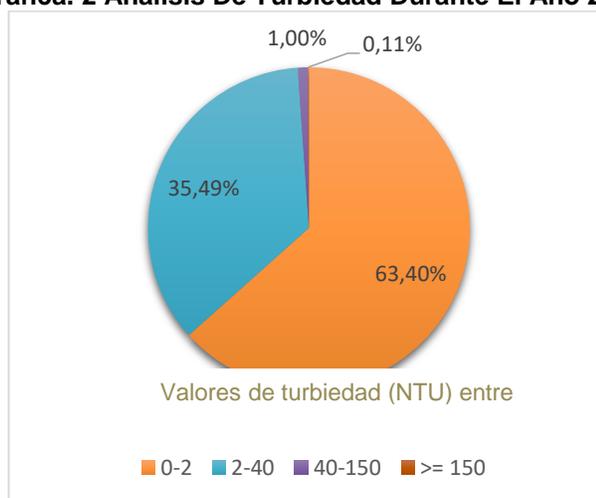
### **4.2.1. Análisis del agua cruda**

Se realizó un análisis estadístico de las características del agua cruda que llegaba a la planta durante el año 2016, desde el mes de enero hasta octubre, como se presenta en la Gráfica. 2

Se tomaron datos de turbiedades de agua cruda que fueron registradas en la planilla de la planta cada hora durante el año del 2015. De acuerdo con el análisis estadístico se obtuvo que el 63,4% la turbiedad está dentro del rango de 0 – 2 NTU, 35,5% entre 2-40 NTU, 1% entre 40-150 NTU y un 0,11% para turbiedades mayor de 150.

De acuerdo con lo anterior para determinar los parámetros óptimos se eligió 5 datos representativos, las turbiedades elegidas fueron 5, 12, 15, y 120 NTU

**Gráfica. 2 Análisis De Turbiedad Durante El Año 2016**



Fuente: (autor)

#### 4.2.2. Manejo y Almacenamiento De Sustancias Químicas

En la planta de tratamiento de agua potable se utiliza Policloruro de Aluminio, Cal y Cloro para el proceso de potabilización.

##### ➤ Policloruro de Aluminio (PAC10)

Es usado como coagulante, es una sal de alta basicidad con base en anión cloruro, con una densidad de 1,23 g/mL, pH a 25 °C = 2,5 y con porcentaje de  $Al_2O_3$  del 10.5%, es necesario el uso de guantes y tapabocas y evitar contacto con metales que pueden sufrir corrosión.

Este es almacenado en forma líquida en tanques de polietileno con capacidad de 30 m<sup>3</sup> y es dosificado por medio de bomba Netzch K500047 con motor Weg 1 HP y 1720 RPM el cual cuenta con un variador para regular la descarga del coagulante dependiendo de la dosis optima que es determinada por los operarios en la prueba de jarras. Es un coagulante muy versátil ya que funciona tanto para aguas blandas como para aguas turbias, es distribuido por Sulfoquímica S.A y es empleado cuando se presenta colores superiores a 18 U.P.C y turbiedades mayores a 2 NTU en el agua cruda.

##### ➤ Cal Hidratada

Es usada para estabilizar el pH del agua filtrada, es almacenado en una bodega de 4,5 m x 3,6 m x 6,4 m; ubicada en el edificio de filtros en sacos de 25 y 50 Kg. La aplicación se realiza por medio de un túnel a agua tratada por medio de un dosificador Omega Machine Universal Feeder Serial OU-1647 con capacidad de 50 kg, la descarga de cal es

manualmente y es realizado por el operario. Es necesario el uso de tapabocas y guantes pues se trata de una sustancia corrosiva a la piel, ojos y el tracto respiratorio.

➤ Cloro

El cloro es el desinfectante utilizado en la planta. Este producto es distribuido por Quimpac S.A. el cual lo suministra en estado gaseoso, envasados en contenedores de acero, con capacidad aproximada de 1 tonelada. Es almacenado en una bodega de 100 m<sup>2</sup> con capacidad de almacenar 10 cilindros. Esta sala de cloración cuenta con un sistema de neutralización, consta de un detector de fugas de gas el cual se activa con 3 ppm, de una alarma sonora, una torre lavadora de gases con solución de soda caústica estabilizada.

#### 4.2.3. Determinación De La Dosis Óptima De Coagulante

Las pruebas se realizaron con agua de diferentes turbiedades, las cuales llegaban directamente a la planta con el fin de trabajar con las características químicas y físicas reales del agua con diferentes dosis de Policloruro de Aluminio al 2%.

En las siguientes tablas (ver Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17) se consignan los resultados de las pruebas para la dosis óptima para diferentes calidades de agua cruda.

**Tabla 13. Resultado De Dosis Óptima Para Turbiedad Inicial De 5,22 NTU**

| Muestra    | Dosis de PAC (mg/L) | Turbiedad (NTU) | Color (UPC) | pH   |
|------------|---------------------|-----------------|-------------|------|
| Agua Cruda | -                   | 5,22            | 45          | 7,74 |
| 1          | 45                  | 3,46            | 30          | 7,25 |
| 2          | 50                  | 1,94            | 9           | 7,17 |
| 3          | 55                  | 0,98            | 8           | 7,16 |
| 4          | 60                  | 0,96            | 8           | 7,14 |
| 5          | 65                  | 0,89            | 7           | 7,10 |

Fuente: (autor)



**Tabla 14. Resultado De Dosis Óptima Para Turbiedad Inicial De 12,3 NTU**

| Muestra    | Dosis de PAC (mg/L) | Turbiedad (NTU) | Color (UPC) | pH   |
|------------|---------------------|-----------------|-------------|------|
| Agua Cruda | -                   | 12,3            | 60          | 7,0  |
| 1          | 60                  | 1,79            | 9           | 6,97 |
| 2          | 65                  | 0,68            | 8           | 6,95 |
| 3          | 70                  | 0,78            | 8           | 6,82 |
| 4          | 75                  | 0,77            | 8           | 6,81 |
| 5          | 80                  | 0,8             | 8           | 6,79 |

Fuente: (autor)

**Tabla 15. Resultado De Dosis Óptima Para Turbiedad Inicial De 15,4 NTU**

| Muestra    | Dosis de PAC (mg/L) | Turbiedad (NTU) | Color (UPC) | pH   |
|------------|---------------------|-----------------|-------------|------|
| Agua Cruda | -                   | 15,4            | 54          | 7,68 |
| 1          | 70                  | 0,96            | 9           | 6,97 |
| 2          | 75                  | 0,69            | 8           | 6,95 |
| 3          | 80                  | 0,47            | 8           | 6,82 |
| 4          | 85                  | 0,63            | 8           | 6,81 |
| 5          | 90                  | 0,78            | 8           | 6,79 |

Fuente: (autor)

**Tabla 16. Resultado De Dosis Óptima Para Turbiedad Inicial De 20,8 NTU**

| Muestra    | Dosis de PAC (mg/L) | Turbiedad (NTU) | Color (UPC) | pH   |
|------------|---------------------|-----------------|-------------|------|
| Agua Cruda | -                   | 20,8            | 108         | 7,57 |
| 1          | 75                  | 19,98           | -           | -    |
| 2          | 80                  | 1,46            | 15          | 6,81 |
| 3          | 85                  | 2,59            | 18          | 6,91 |
| 4          | 90                  | 0,81            | 9           | 6,87 |
| 5          | 95                  | 0,8             | 8           | 6,85 |

Fuente: (autor)



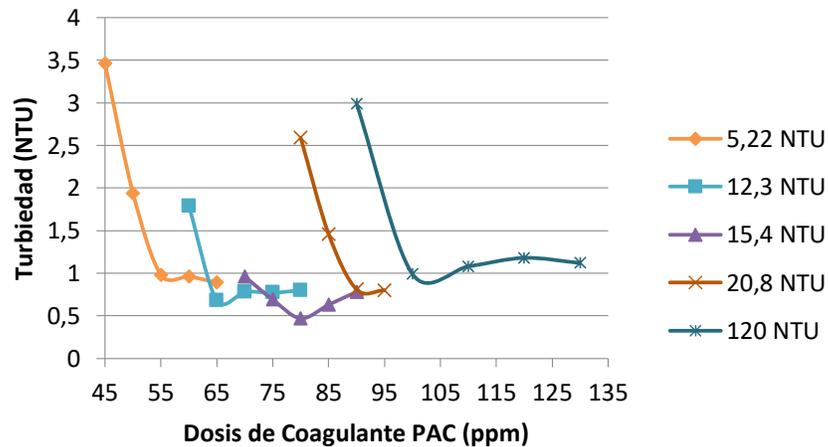
**Tabla 17. Resultado De Dosis Óptima Para Turbiedad Inicial De 120 NTU**

| Muestra    | Dosis de PAC (mg/L) | Turbiedad (NTU) | Color (UPC) | pH   |
|------------|---------------------|-----------------|-------------|------|
| Agua Cruda | -                   | 120             | 200         | 7,45 |
| 1          | 90                  | 2,99            | 15          | 7,27 |
| 2          | 100                 | 0,99            | 9           | 7,27 |
| 3          | 110                 | 1,08            | 12          | 7,1  |
| 4          | 120                 | 1,18            | 12          | 7,18 |
| 5          | 130                 | 1,12            | 12          | 7,11 |

Fuente: (autor)

El comportamiento de la turbiedad obtenida en cada uno de los ensayos se muestra en la Gráfica. 3.

**Gráfica. 3 Comportamiento De La Turbiedad A Diferentes Dosis De PAC**



Fuente: (autor)

De acuerdo con la Gráfica. 3 se obtiene la Tabla 18 en el cual se resumen las dosis óptimas para diferentes turbiedades iniciales de agua cruda.

**Tabla 18. Dosis Óptima Correspondiente A Diferentes Turbiedades Iniciales De Agua Cruda.**

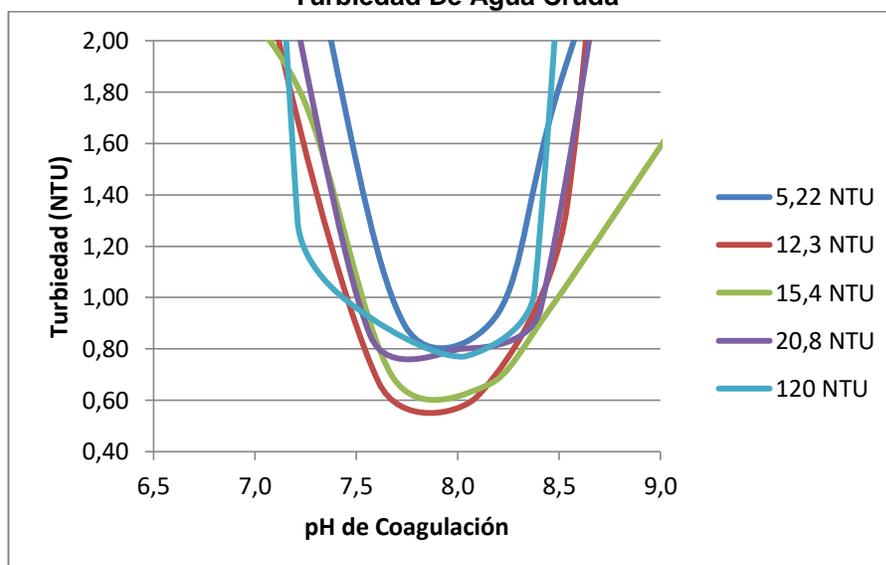
|                               |      |      |      |      |     |
|-------------------------------|------|------|------|------|-----|
| <b>Turbiedad Agua Cruda</b>   | 5,22 | 12,3 | 15,4 | 20,8 | 120 |
| <b>Color Agua Cruda</b>       | 45   | 60   | 54   | 108  | 200 |
| <b>Dosis Optima PAC (Ppm)</b> | 55   | 65   | 80   | 90   | 100 |

*Fuente: (autor)*

#### 4.2.4. Determinación Del pH Óptimo De Coagulación

En la Gráfica. 4 y Tabla 19 se consolidan los resultados obtenidos durante el ensayo, donde se relacionan diferentes valores de turbiedad de agua cruda con el pH óptimo para el pre tratamiento.

**Gráfica. 4 Relación De PH Óptimo Para El Pretratamiento Para Diferentes Valores De Turbiedad De Agua Cruda**



*Fuente: (autor)*

**Tabla 19. Resultados De Ensayo pH Óptimo De Coagulación**

| Agua Cruda: TURBIEDAD= 15,4NTU  |            |                 |                                  | Agua Cruda: TURBIEDAD= 20,8 NTU |                 |                                  | Agua Cruda: TURBIEDAD= 120 NTU |                 |                                  |
|---------------------------------|------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| N° de Jarra                     | pH Inicial | Turbiedad (NTU) | Eficiencia Remocional Tf/To *100 | pH Inicial                      | Turbiedad (NTU) | Eficiencia Remocional Tf/To *100 | pH Inicial                     | Turbiedad (NTU) | Eficiencia Remocional Tf/To *100 |
| 1                               | 6,7        | 2,30            | 14,94                            | 6,8                             | 3,44            | 16,54                            | 6,5                            | 12,40           | 59,62                            |
| 2                               | 7,2        | 1,79            | 11,62                            | 7,1                             | 2,52            | 12,12                            | 7,2                            | 1,30            | 6,25                             |
| 3                               | 7,7        | 0,69            | 4,48                             | 7,6                             | 0,85            | 4,09                             | 7,5                            | 0,99            | 4,76                             |
| 4                               | 8,2        | 0,66            | 4,29                             | 8,0                             | 0,80            | 3,85                             | 8,0                            | 0,77            | 3,70                             |
| 5                               | 8,5        | 0,95            | 6,17                             | 8,4                             | 0,96            | 4,62                             | 8,4                            | 1,03            | 4,95                             |
| 6                               | 9,2        | 1,80            | 11,69                            | 9,2                             | 4,76            | 22,88                            | 9,0                            | 8,90            | 42,79                            |
| Agua Cruda: TURBIEDAD= 5,22 NTU |            |                 |                                  | Agua Cruda: TURBIEDAD= 12,5 NTU |                 |                                  |                                |                 |                                  |
| N° De Jarra                     | pH Inicial | Turbiedad (NTU) | Eficiencia Remocional Tf/To *100 | pH Inicial                      | Turbiedad (NTU) | Eficiencia Remocional Tf/To *100 |                                |                 |                                  |
| 1                               | 6,7        | 5,00            | 95,79                            | 6,6                             | 4,53            | 36,83                            |                                |                 |                                  |
| 2                               | 7,4        | 2,10            | 40,23                            | 7,0                             | 2,42            | 19,67                            |                                |                 |                                  |
| 3                               | 7,7        | 0,89            | 17,05                            | 7,6                             | 0,67            | 5,45                             |                                |                 |                                  |
| 4                               | 8,2        | 1,05            | 20,11                            | 8,1                             | 0,61            | 4,96                             |                                |                 |                                  |
| 5                               | 8,5        | 1,82            | 34,87                            | 8,5                             | 1,36            | 11,06                            |                                |                 |                                  |
| 6                               | 9,1        | 3,23            | 61,88                            | 9,0                             | 5,98            | 48,62                            |                                |                 |                                  |

Fuente: (autor)

De los resultados anteriores se obtiene que el valor óptimo de pH que mayor remoción de turbiedad presenta es de 8,0 aproximadamente para el pretratamiento de coagulación, por lo que es necesario instalar un dosificador de cal antes de la dosificación del coagulante

#### 4.2.5. Mezcla Rápida

##### 4.2.5.1. Velocidad Media En La Canaleta Parshall

Para determinar la velocidad media se realizó el método del flotador, en la Tabla 20 se resumen los datos obtenidos durante la prueba.



**Tabla 20. Resultados Del Método Del Flotador**

|                  | Tiempo Promedio (S) | Lamina (M) | Distancia Recorrida (M) | Velocidad Superficial (M/S) | Velocidad Media (M/S) | Nf    | Flujo        |
|------------------|---------------------|------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------|--------------|
| Canal Entrada    | 1,67                | 0,680      | 2,9                     | 1,74                        | 1,39                  | 0,538 | Subcrítico   |
| Zona Convergente | 0,65                | 0,650      | 1,64                    | 2,51                        | 2,01                  | 0,795 | Subcrítico   |
| Garganta         | 0,28                | 0,370      | 0,61                    | 2,15                        | 1,72                  | 0,905 | Subcrítico   |
| Zona Divergente  | 0,32                | 0,370      | 0,92                    | 2,88                        | 2,30                  | 1,207 | Supercrítico |
| Canal De Salida  | 0,40                | 0,210      | 1,05                    | 2,63                        | 2,10                  | 1,461 | Supercrítico |

Fuente: (autor)

No se determinaron las velocidades puntuales, si no las velocidades medias a lo largo del canal de entrada, canaleta Parshall y en el canal de salida, por medio del ensayo del flotador, en este ensayo se presenta un flujo Subcrítico hasta la sección de la garganta, es decir con un régimen lento durante la zona de convergencia, al salir de la garganta se presenta un flujo supercrítico, con un régimen más rápido con gran turbulencia lo cual influye en el comportamiento del flujo al paso por la canaleta pasando de un flujo Subcrítico a supercrítico.

#### 4.2.5.2. Condiciones Hidráulicas De La Canaleta Parshall

Para la evolución del diseño de la canaleta Parshall los resultados obtenidos se comparan con los criterios de diseño para mezcladores rápidos para RAS 2000 y AWWA

**Tabla 21. Medidas de la Canaleta Parshall.**

|   | REAL  | TEORICO |
|---|-------|---------|
| W | 0,895 | 0,915   |
| A | 1,650 | 1,677   |
| B | 1,600 | 1,645   |
| C | 1,208 | 1,22    |
| D | 1,600 | 1,572   |
| E | 0,920 | 0,915   |
| F | 0,600 | 0,61    |
| G | 0,900 | 0,915   |
| K | 0,076 | 0,076   |
| N | 0,230 | 0,229   |

Fuente: (autor)



**Tabla 22. Condiciones Hidráulicas Reales Y Teóricas De La Canaleta Parshall**

| Condiciones Hidráulicas   | Teórico | Real    |
|---|---------|---------|
| Altura De Agua (m)  | 0,570   | 0,570   |
| Caudal (m <sup>3</sup> /s)  | 0,900   | 0,900   |
| Velocidad En La Sección De Medición (m/s)                             | 1,167   | 1,157   |
| Caudal Especifica En La Garganta De La Canaleta (m <sup>3</sup> /s/m) | 0,984   | 1,006   |
| Carga Hidráulica (m)  | 0,868   | 0,868   |
| Velocidad Antes Del Resalto (m/s)                                     | 3,415   | 3,414   |
| Altura De Agua Antes Del Resalto (m)                                  | 0,288   | 0,295   |
| Numero De Froude  | 2,031   | 2,009   |
| Altura Del Resalto (m)  | 0,696   | 0,702   |
| Velocidad En El Resalto (m/s)   | 1,413   | 1,432   |
| Altura En La Sección De Salida De La Canaleta (m)                     | 0,543   | 0,548   |
| Velocidad En La Sección De Salida (m/s)                               | 1,359   | 1,360   |
| Perdida De Carga En El Resalto (m)                                    | 0,103   | 0,098   |
| Tiempo De Mezcla (s)  | 0,660   | 0,644   |
| Gradiente De Velocidad (s <sup>-1</sup> )                             | 1200,18 | 1182,55 |

Fuente: (autor)

Para realizar la evaluación del diseño en la canaleta se realizó de a partir de las medidas teóricas y reales; Con los resultados obtenidos se evalúa con los parámetros de diseño que propone RAS 2000 y AWWA. Los datos conseguidos se consolidan en la Tabla 23.

**Tabla 23. Evaluación Del Diseño Canaleta Parshall.**

|                        | RAS 2000          | AWWA                  | Teórico | Real    |
|------------------------|-------------------|-----------------------|---------|---------|
| Caudal                 | -                 |                       | 900 L/s | 900L/s  |
| Numero De Froude       | 1,7-2,5 / 4,5-9,0 |                       | 2,031   | 2,009   |
| Ho/W                   | 0,4 - 0,8         |                       | 0,62    | 0,64    |
| Tiempo De Mezcla       | < 1 s             |                       | 0,66 s  | 0,64 s  |
| Gradiente De Velocidad | 1000 - 2000 s-1   | 700-1300<br>3000-5000 | 1200,18 | 1182,55 |
| Sumergencia            | ≤0,7              |                       | 0,68    | 0,68    |

Fuente: (autor)



La canaleta Parshall cuenta con un ancho de garganta  $W= 0,9$  m la altura de la lámina de agua fue  $h_o=0,57$  m con un caudal de entrada de 900L/s. las condiciones Hidráulicas evaluadas anteriormente se obtuvo un numero de Froude de 2, gradiente de  $1182,55$   $S^{-1}$  con un tiempo de mezcla de 0,64 segundos y una valor de Sumergencia de 0,68 estos resultados son satisfactorios ya que cumplen con los parámetros estipulados por RAS 2000 y AWWA.

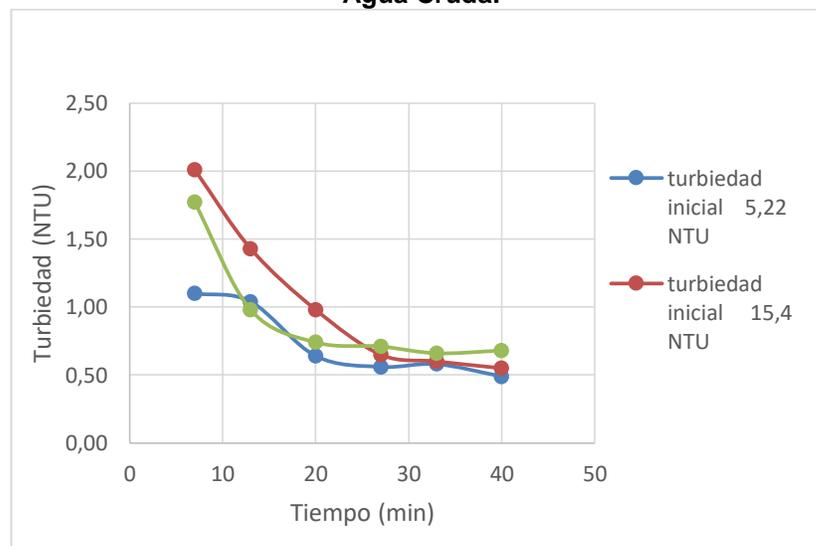
En el RAS 2000 estipulan que la velocidad recomendada en la garganta debe ser mayor a 2 m/s y la velocidad de la salida del efluente debe ser mayor 0,75 m/s, la canaleta cumple con estos dos parámetros siendo para la velocidad en la garganta y salida del efluente 3,4 y 1,36 m/s respectivamente.

#### 4.2.6. Proceso De Floculación

##### 4.2.6.1. Tiempo Y Gradiente Óptimo De Mezcla Lenta

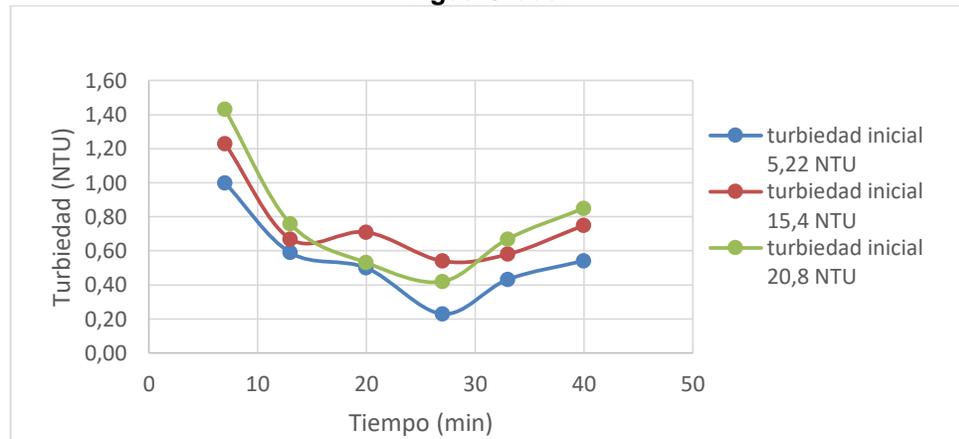
Para la determinación del tiempo y gradiente óptimo de floculación se trabajaron con diferentes turbiedades de agua cruda y se aplicó los datos óptimos de dosis concentración y pH obtenidos anteriormente. Se emplearon diferentes gradientes de acuerdo a las velocidades de agitación de las paletas 20, 30 40 y 50 RPM variando los tiempos (7, 13, 20,27 y 33 min). Los resultados se presentan en las siguientes graficas (ver Gráfica. 5, Gráfica. 6, Gráfica. 7 y Gráfica. 8)

**Gráfica. 5 Resultados De Turbiedad Remanente A 20 RPM Con Diferentes Características De Agua Cruda.**



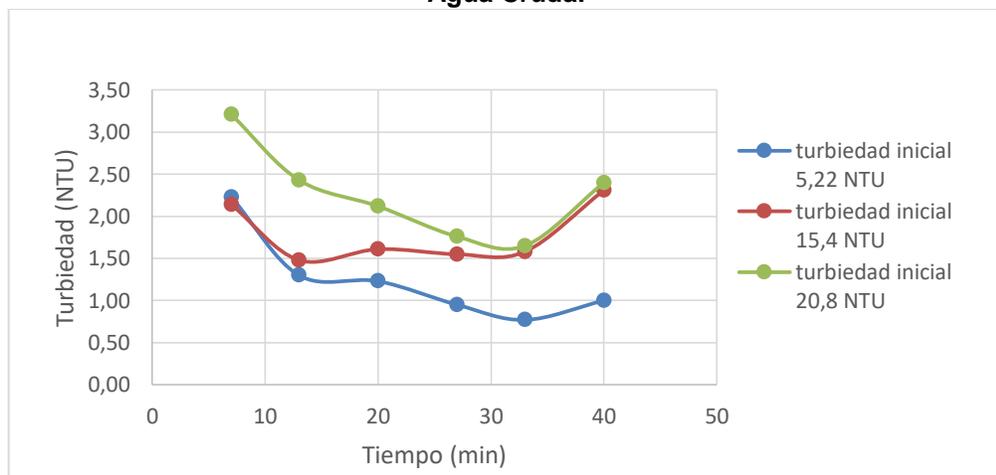
Fuente: (autor)

**Gráfica. 6 Resultados De Turbiedad Remanente A 30 RPM Con Diferentes Características De Agua Cruda.**



Fuente: (autor)

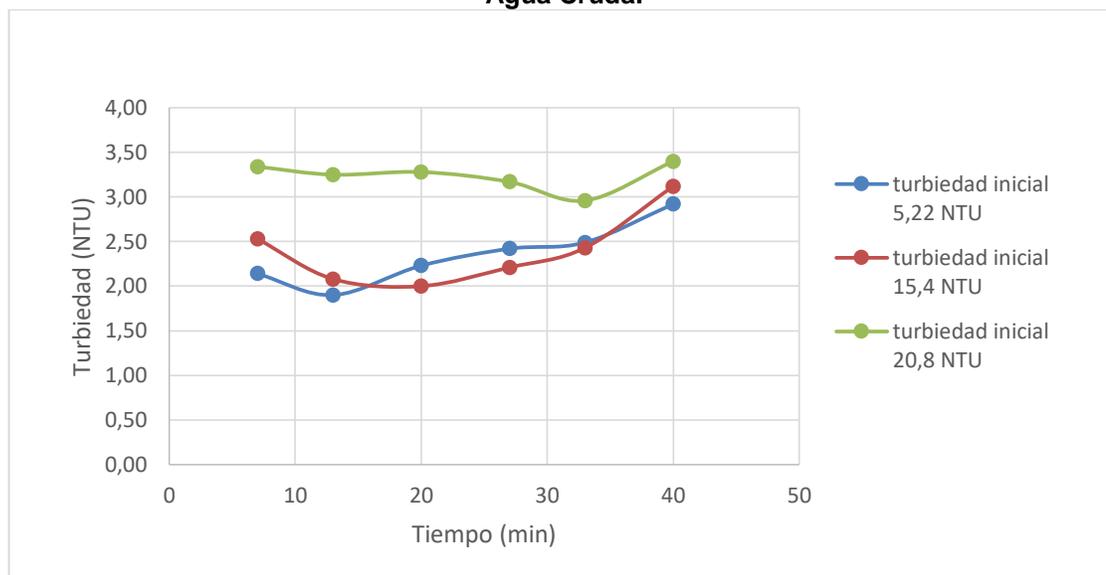
**Gráfica. 7 Resultados De Turbiedad Remanente A 40 RPM Con Diferentes Características De Agua Cruda.**



Fuente: (autor)



**Gráfica. 8 Resultados De Turbiedad Remanente A 60 RPM Con Diferentes Características De Agua Cruda.**



Fuente: (autor)

Con los resultados anteriores utilizando turbiedades de agua cruda de 5, 15 y 20 NTU con sus respectivas dosis optima y utilizando gradientes de  $12 \text{ s}^{-1}$ ,  $23 \text{ s}^{-1}$ ,  $34 \text{ s}^{-1}$  y  $45 \text{ s}^{-1}$ , la eficiencia de remoción fueron 93,5 %, 96,6%, 87,44% y 81,99% respectivamente. Presentando mejores resultados en eficiencia gradientes de 12 y  $23 \text{ s}^{-1}$  en un tiempo entre 27 - 32 minutos.

#### 4.2.6.2. Análisis Hidráulico

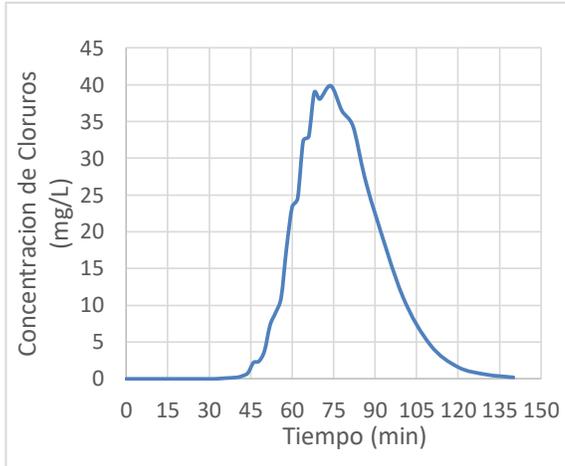
Para el análisis se emplea modelos para flujos no ideales los cuales son Método de la Curva de Tendencia Central, Modelo de Wolf Resnick, Modelo de Dispersión Axial y Modelo de Tanques en Serie. Con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico y el tipo de flujo que predomina en cada uno de los floculadores.

##### 4.2.6.2.1. Método de la Curva de Tendencia de la Concentración del Trazador

En la Gráfica. 9 Gráfica. 10 se presentan la curva de concentración de trazador vs tiempo obtenida en los ensayos de trazadores. En la Tabla 24 se sintetiza los parámetros para el análisis de la curva de tendencia y en la Tabla 25 se presenta los parámetros calculados recomendado por (CEPIS, 2004b).

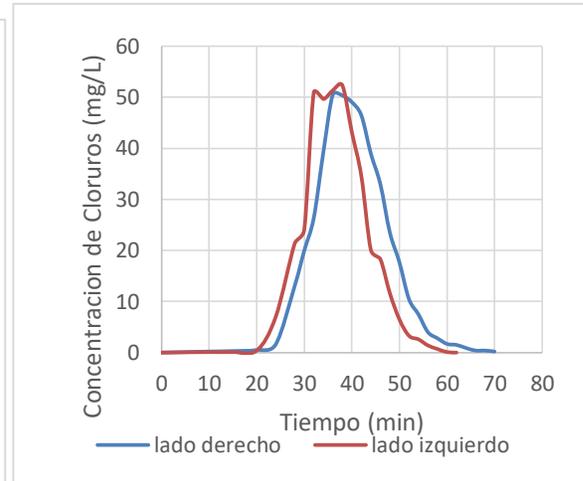


**Gráfica. 9 Curva De Concentración De Trazador Vs Tiempo para la unidad hidráulica.**



Fuente: (autor)

**Gráfica. 10 curva de concentración trazador vs tiempo para la unidad nueva**



Fuente: (autor)

**Tabla 24. Parámetros Del Método De Curva De Tendencia**

|            | Unidad Hidráulica | Unidad Nueva lado derecho | Unidad Nueva lado izquierdo |
|------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
| <b>Ti</b>  | 40 min            | 28 min                    | 24 min                      |
| <b>To</b>  | 86,89 min         | 38,4 min                  | 38,4 min                    |
| <b>Tm</b>  | 68,26 min         | 38,74 min                 | 35,8 min                    |
| <b>Tp</b>  | 74 min            | 36 min                    | 38 min                      |
| <b>Tc</b>  | 33 min            | 15,7 min                  | 12,6 min                    |
| <b>Tb</b>  | 60,9 min          | 29,4 min                  | 27,1 min                    |
| <b>T90</b> | 85,99 min         | 47,98 min                 | 47,98 min                   |
| <b>T10</b> | 56,61 min         | 30,54 min                 | 30,54 min                   |

Fuente: (autor)



**Tabla 25. Análisis De Las Curvas De Tendencia Del Trazador**

|         | Unidad Hidráulica | Unidad Nueva lado derecho | Unidad Nueva lado izquierdo | Interpretación  |
|---------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|---|
| Ti / To | 0,46              | 0,75                      | 0,63                        | Ti/To= 0 flujo mezcla completa<br>Ti/To= 1 flujo pistón<br>ti/to<0,3 (cortocircuito)            |
| Tm / To | 0,78              | 1,0                       | 0,93                        | Tm/To < 1 cortocircuito<br>Tm/To > 1 acumulación de trazador – zona muerta                      |
| Tp / To | 0,85              | 0,94                      | 0,99                        | Tp/To= 0 flujo mezcla completa<br>Tp/To= 1 flujo pistón   |
| Tc / To | 0,37              | 0,40                      | 0,33                        | Tc/To ≈ 0,7 relacionado con corrientes de inercia o turbulencia - predominio de mezcla completa |
| Tb / To | 0,70              | 0,76                      | 0,71                        | Tb/To ≈ 2,3 relacionado con corrientes de inercia o turbulencia - predominio de mezcla completa |
| E       | 0,36              | 0,63                      | 0,42                        | e ≥ 2,3 flujo mezcla completa<br>e= 0 flujo pistón  |
| Im      | 1,52              | 1,57                      | 1,53                        | Im < 2 flujo pistón   |
| 1/ im   | 65,79 %           | 63,69 %                   | 65,35 %                     | Eficiencia volumétrica del porcentaje de reactor que se comporta como flujo pistón              |

Fuente: (autor)

Para la Unidad Hidráulica el valor de  $t_i/t_o$  igual a 0,46, esto hace referencia a la presencia de flujos tanto de flujo pistón como de flujo mezclado, la relación  $t_p/t_o$  igual 0,85 cercano a 1 y el valor de excentricidad = 0,36 cercano a cero indican la presencia de flujo pistón, las relaciones de  $t_c/t_o$ ,  $t_b/t_o$  iguales a 0,37 y 0,7 son inferiores a 0,7 y 2,3 respectivamente lo que indican también la tendencia a flujo pistón aunque por los valores obtenidos pueden existir algunas recirculaciones internas. El valor de  $t_m/t_o$  siendo menor que 1 permite establecer la presencia de cortocircuitos ya que tiempo de retención real (74 min) es menor al teórico (86,9 min), lo que afecta la eficiencia en el floculador.

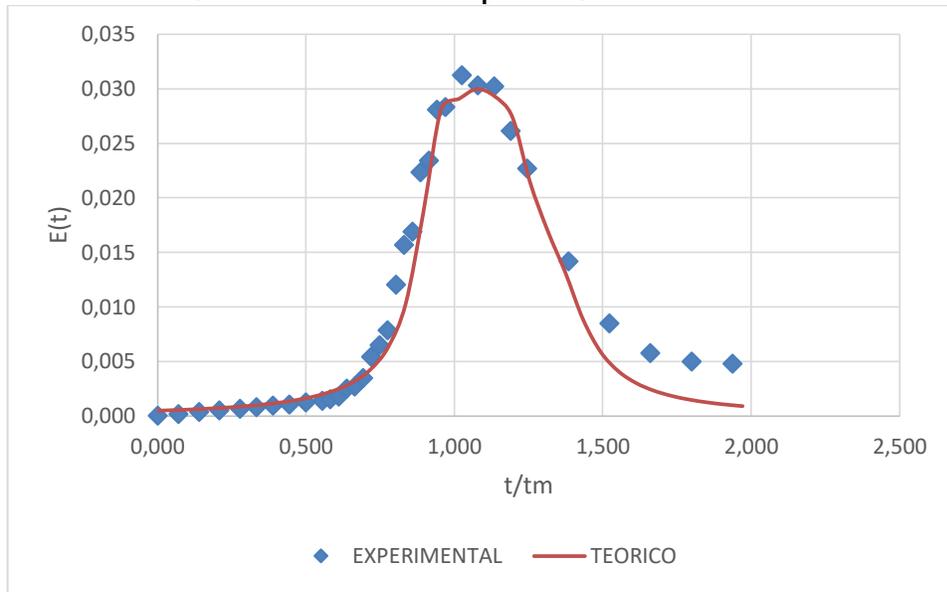
En la Unidad Nueva para ambos lados tanto derecho como izquierdo tiende principalmente el flujo pistón, no se presenta espacios muertos ni cortocircuitos apreciables, que podrían afectar el tiempo de retención, ya que los tiempos de retención teórico y real sean relativamente iguales, esto permite predecir una buena eficiencia en el floculador.



#### 4.2.6.2.2. Modelo de dispersión axial

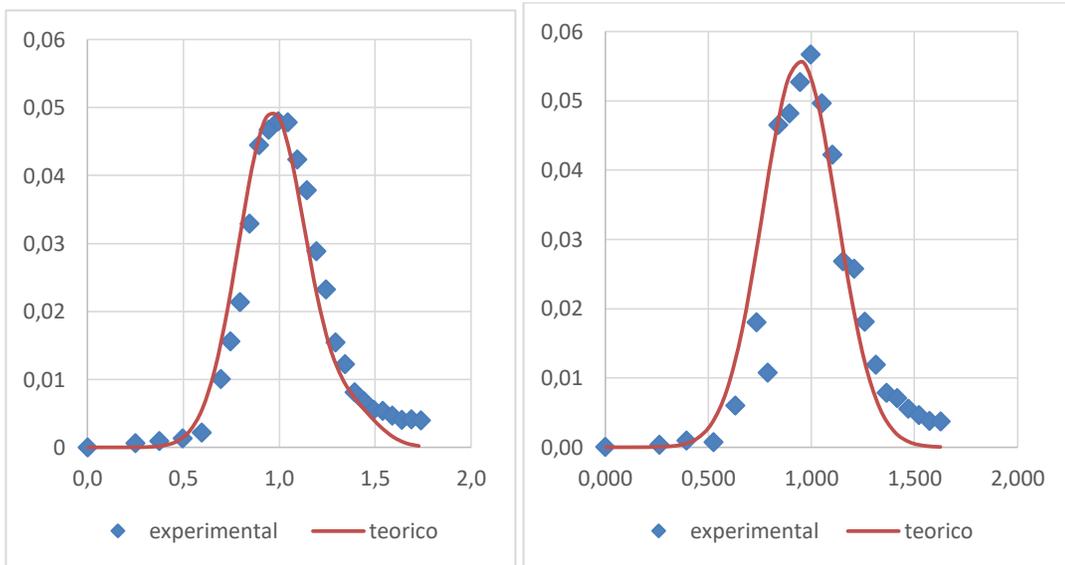
En la Gráfica. 11 y Gráfica. 12 se obtiene las curvas por dispersión teóricas y reales de cada uno de los floculadores y en la Tabla 26 se resumen los valores obtenidos por este método

**Gráfica. 11 Modelo De Dispersión Unidad Hidráulica**



Fuente: (autor)

**Gráfica. 12 Modelo De Dispersión Unidad Nueva**



a. Lado Derecho

Fuente: (autor)

b. Lado Izquierdo

Fuente:(autor)

**Tabla 26. Resultados Del Modelo De Dispersión**

|                                     | Unidad Hidráulica | Unidad Nueva lado derecho | Unidad Nueva lado izquierdo |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Tiempo retención experimental (min) | 68,92             | 40,52                     | 37,34                       |
| $\sigma^2$ (min <sup>2</sup> )      | 395,45            | 83,41                     | 62,53                       |
| $\sigma^2_{\theta}$                 | 0,08              | 0,05                      | 0,04                        |
| Dispersión (D/ $\mu$ L)             | 0,02              | 0,01                      | 0,01                        |

Fuente: (autor)

El grado de dispersión se calcula a partir de las ecuaciones por Levenspiel quien define el número de dispersión como (D/ $\mu$ L). Inicialmente se calculó la varianza ( $\sigma^2$ ) usando los resultados obtenidos en el ensayo de trazadores y posteriormente se calculó la expresión  $\sigma^2_{\theta}$  usando el tiempo de retención hidráulico real.

Para el floculador de la Unidad Hidráulica y la Unidad Nueva se puede observar que en la Gráfica. 11 y Gráfica. 12 la curva tiene tendencia gaussiana y el modelo real se ajusta al teórico, esto es debido a que el modelo funciona relativamente bien ya que su funcionamiento tiene la presencia de flujo pistón dentro de la Unidad, para el parámetro de dispersión (D/ $\mu$ L) la Unidad Hidráulica obtiene un valor de 0,02 esto indica que tiende a un grado de dispersión intermedia por lo que hace existencia de un régimen combinado de flujo pistón y mezcla completa; para la Unidad Nueva en ambos lados se obtiene un valor de 0,01 lo que confirma que el floculador presenta una tendencia de un régimen de flujo pistón.

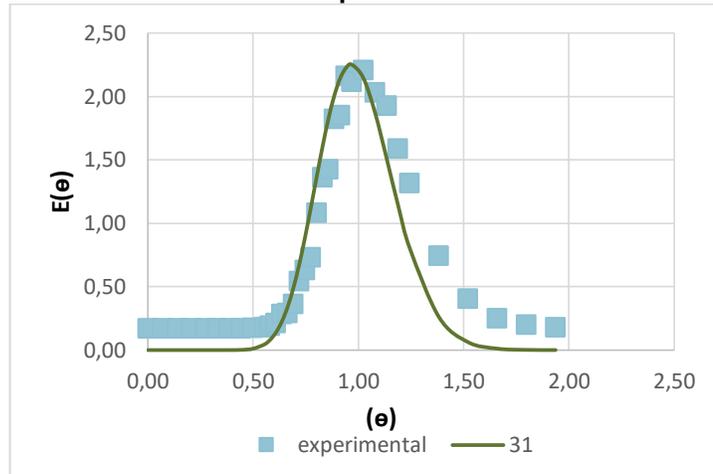
#### 4.2.6.2.3. Modelo de tanques en serie

Además del modelo de dispersión, el modelo de tanques en serie es otro modelo para representar el flujo no ideal. Este modelo supone que el reactor puede representarse por varios tanque de mezcla completa del mismo tamaño en serie. Si el número de tanques es grande, el flujo será más aproximado a un flujo pistón. Por el contrario si el número de tanques es pequeño, la respuesta se aparta de dicho flujo y se inclina más hacia mezcla completa. (Levenspiel, 1981).

En las siguientes gráficas (ver Gráfica. 13y Gráfica. 14) se obtiene la comparación de la distribución entre el modelo de tanque en serie y los valores experimentales para cada Unidad

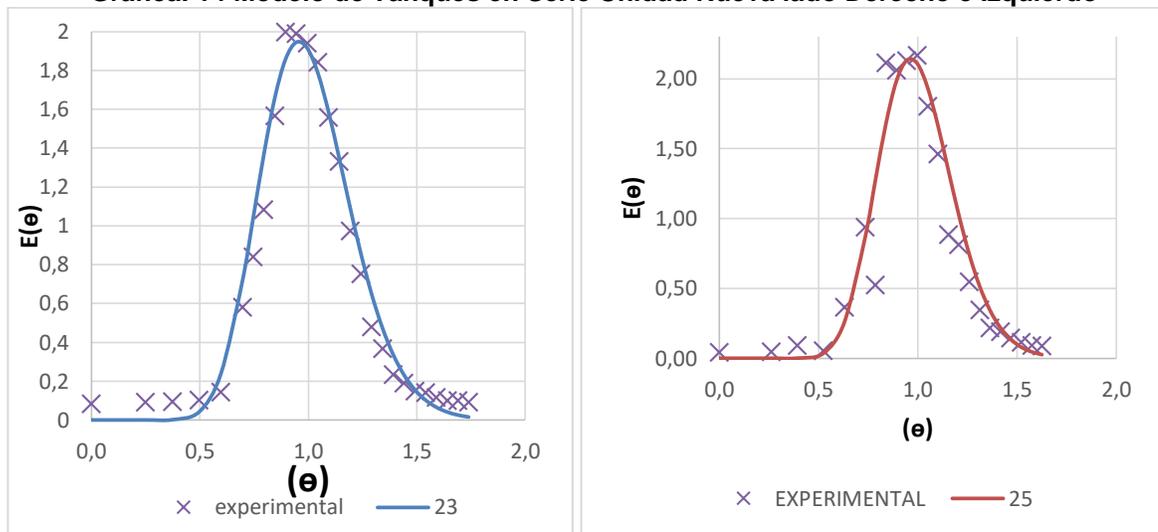


**Gráfica. 13 Modelo de Tanques en Serie Unidad Hidráulica**



Fuente: (autor)

**Gráfica. 14 Modelo de Tanques en Serie Unidad Nueva lado Derecho e Izquierdo**



a. Lado Derecho

Fuente: (autor)

b. Lado Izquierdo

Fuente:(autor)

De acuerdo con el modelo matemático, el predominio del régimen hidráulico con flujo pistón se incrementa a medida que aumenta el número de tanques en serie; para el número de tanque mayor a 20 el flujo en el reactor es una tendencia de régimen pistón. El análisis de correlación de las curvas teóricas con la curva experimental indicó que la Unidad Hidráulica presento mayor correlación del 96% con el tanque en serie número 31, a pesar de que el número de tanques es grande, el porcentaje de correlación no es el adecuado para el predominio con tendencia de flujo pistón, lo que ratifica la presencia del flujo dual. En el caso de la Unidad Nueva para lado derecho y lado izquierdo la mayor



correlación con un valor de 98,2% y 97,5 % se presentó en los tanques 23 y 25 respectivamente, por lo que se corrobora el predominio total de flujo pistón en el floculador de esta Unidad.

#### 4.2.6.2.4. Método de Wolf Resnick

Este modelo matemático permite cuantificar el porcentaje de flujo pistón, mezcla completa y zonas muertas que se presenta en la operación de un reactor. En la Tabla 27 se presenta los resultados.

**Tabla 27. Resultados Del Modelo De Wolf Resnick**

|                 | Unidad Hidráulica | Unidad Nueva lado derecho | Unidad Nueva lado izquierdo |
|-----------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
| $\Theta$        | 0,66              | 0,9                       | 0,84                        |
| Tan $\alpha$    | 2,17              | 2,43                      | 2,86                        |
| % Pistón        | 76,74 %           | 83,41 %                   | 84,67%                      |
| % Zonas Muertas | 13,99 %           | 0%                        | 0%                          |
| % Mezclado      | 23,26 %           | 16,59 %                   | 15,33 %                     |

Fuente: (autor)

Con los resultados obtenidos se ratifica con los modelos anteriores que en la Unidad Hidráulica se presenta flujo dual con predominio de flujo pistón (76,74%) sobre el flujo de mezcla (23,26%), se presenta el 14 % de zonas muertas. Para la Unidad Nueva se tiene un predominio de flujo pistón alrededor del 84% y un flujo de mezcla del 15%, sin presencia de espacios muertos, lo que señala un buen comportamiento en el floculador.

#### 4.2.6.3. Perdidas de carga a través de orificios y gradientes de velocidad para floculadores hidráulicos

##### 4.2.6.3.1. Unidad Hidráulica



**Tabla 28. Perdidas de carga y gradientes en el floculador de la Unidad Hidráulica**

| -<br>orificio N° | dimensiones |        | área  | caudal | velocidad | hf     | gradiente |
|------------------|-------------|--------|-------|--------|-----------|--------|-----------|
|                  | base        | altura | m2    | m3/s   | m/s       | m      | s-1       |
| <b>sector 1</b>  |             |        |       |        |           |        |           |
| <u>1</u>         | 1           | 1      | 1     | 0,08   | 0,0800    | 0,0009 | 6,12      |
| <u>2</u>         | 0,9         | 0,4    | 0,36  | 0,08   | 0,2222    | 0,0086 | 18,88     |
| <u>3</u>         | 0,9         | 0,45   | 0,405 | 0,08   | 0,1975    | 0,0066 | 16,49     |
| <u>4</u>         | 0,9         | 0,52   | 0,468 | 0,08   | 0,1709    | 0,0047 | 14,00     |
| <u>5</u>         | 0,9         | 0,52   | 0,468 | 0,08   | 0,1709    | 0,0047 | 14,00     |
| <u>6</u>         | 0,9         | 0,7    | 0,63  | 0,08   | 0,1270    | 0,0025 | 10,07     |
| <b>sector 2</b>  |             |        |       |        |           |        |           |
| <u>7</u>         | 1           | 1,4    | 1,4   | 0,16   | 0,1143    | 0,0018 | 8,38      |
| <u>8</u>         | 1,5         | 1,4    | 2,1   | 0,16   | 0,0762    | 0,0008 | 5,52      |
| <u>9</u>         | 1,5         | 1,4    | 2,1   | 0,16   | 0,0762    | 0,0008 | 5,52      |
| <u>10</u>        | 1,5         | 1,5    | 2,25  | 0,16   | 0,0711    | 0,0007 | 5,14      |
| <u>11</u>        | 1,5         | 1,6    | 2,4   | 0,16   | 0,0667    | 0,0006 | 4,81      |
| <u>12</u>        | 1,5         | 1,5    | 2,25  | 0,16   | 0,0711    | 0,0007 | 5,14      |

Fuente: (autor)

#### 4.2.6.3.2. Unidad Nueva

**Tabla 29. Perdidas de carga y gradientes de velocidad en el floculador de la Unidad Nueva**

| -<br>orificio N° | dimensiones |        | área | caudal | velocidad | hf     | gradiente |
|------------------|-------------|--------|------|--------|-----------|--------|-----------|
|                  | base        | altura | m2   | m3/s   | m/s       | m      | s-1       |
| <u>1</u>         | 0,6         | 0,6    | 0,36 | 0,11   | 0,3056    | 0,0157 | 41,79     |
| <u>2</u>         | 2           | 0,5    | 1    | 0,11   | 0,1100    | 0,0019 | 14,39     |
| <u>3</u>         | 2           | 0,5    | 1    | 0,11   | 0,1100    | 0,0019 | 14,39     |
| <u>4</u>         | 2           | 0,5    | 1    | 0,11   | 0,1100    | 0,0019 | 14,39     |
| <u>5</u>         | 2           | 0,6    | 1,2  | 0,11   | 0,0917    | 0,0012 | 11,74     |
| <u>6</u>         | 2           | 0,6    | 1,2  | 0,11   | 0,0917    | 0,0012 | 11,74     |
| <u>7</u>         | 2           | 0,6    | 1,2  | 0,11   | 0,0917    | 0,0012 | 11,74     |
| <u>8</u>         | 2           | 0,6    | 1,2  | 0,11   | 0,0917    | 0,0012 | 11,74     |
| <u>9</u>         | 2           | 0,8    | 1,6  | 0,11   | 0,0688    | 0,0007 | 8,57      |
| <u>10</u>        | 2           | 0,8    | 1,6  | 0,11   | 0,0688    | 0,0007 | 8,57      |
| <u>11</u>        | 2           | 0,8    | 1,6  | 0,11   | 0,0688    | 0,0007 | 8,57      |
| <u>12</u>        | 2           | 0,8    | 1,6  | 0,11   | 0,0688    | 0,0007 | 8,57      |

Fuente: (autor)



**Tabla 30. Evaluación del gradiente de las Unidades de Floculación**

| Floculador        | Gradiente con caudal de operación (s <sup>-1</sup> ) | RAS   | Gradiente optimo en ensayo de pruebas de jarras (s <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|--|-------|--|
| Unidad Hidráulica | 12,11  | 20-70 | 12-23  |
| Unidad Nueva      | 11,58  |       |  |

Fuente: (autor)

El gradiente de velocidad está en función del caudal, el área de orificio y tiempo de retención, en la Tabla 28 y Tabla 29 se observa una variación de forma descendiente en el gradiente entre cada compartimiento, esta disminución es debido a que en el diseño del floculador el área de cada orificio aumenta a través de las cámaras por lo que se disminuye el gradiente a la salida de la Unidad, este comportamiento es recomendado por ARBOLEDA.

Para las Unidades con un caudal de operación de 160L/s y 220 L/s y un tiempo de retención de 67 y 34 min para los floculadores de las Unidades Hidráulica y Nueva se obtuvieron el valor de gradiente en 12,11 y 11,58 s<sup>-1</sup> respectivamente; al evaluar los gradientes se obtiene que los floculadores no cumplen con los parámetros establecidos por el RAS gradientes entre 20 y 70 s<sup>-1</sup>, sin embargo el gradiente varía con la calidad del agua y realizando los ensayos de tratabilidad en las pruebas de jarras en el laboratorio se concluyó que el gradiente óptimo a trabajar para el tipo de agua que llega a la planta es de 12- 23 s<sup>-1</sup> por lo que cumple con los parámetros optimizado hallados anteriormente en función de la calidad del agua cruda.

Las velocidades a través de las secciones de cada Unidad se encuentran por debajo del rango recomendado de la norma Ras 2000 que es de 0,2 a 0,6 m/s. dichas velocidades permiten una agitación constante y moderada que hacen chocar las partículas para que se adhieran unas a otras, haciendo crecer el floc al punto que se empieza a depositar en la unidad formando zonas muertas, afectando la eficiencia de la unidad.

#### 4.2.6.3.3. Gradiente de velocidad en las Unidades Permutit 1 y 2

Utilizando los datos suministrados por el personal operativo de la planta respecto a las características de los juegos de paletas existentes, los gradientes teóricos de cada unidad se presentan en la Tabla 31 :



**Tabla 31. Calculo de potencias teóricas y gradientes de velocidad en floculadores mecánicos**

| RPM (n) | Potencia Unitaria (Kgm/s) | Gradiente (s-1) | Parámetro de gradiente del RAS |
|---------|---------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1       | 0,05                      | 0,18            | 15- 75 s <sup>-1</sup>         |
| 2       | 0,41                      | 1,47            |                                |
| 3       | 1,38                      | 4,96            |                                |
| 4       | 3,26                      | 11,77           |                                |
| 5       | 6,37                      | 22,98           |                                |
| 6       | 11,00                     | 39,71           |                                |
| 7       | 17,47                     | 63,06           |                                |
| 8       | 26,08                     | 94,12           |                                |

Fuente: (autor)

A partir del gradiente recomendado por el RAS y el hallado en las pruebas de tratabilidad, el variador deberá funcionar entre 4 y 5 RPM. La potencia máxima será de 26,08 Kgm/s. no se realizó una medición experimental ya que no se contaba con un vatímetro el cual se miden la potencia con el fin de determinar el gradiente real dentro de la Unidad.

#### 4.2.7. Proceso de sedimentación

##### 4.2.7.1. Determinación de la eficiencia

La determinación de eficiencia se realizó en base a los registros que se llevó durante el año 2016. Dicho registro se realiza tomando muestra del agua que llega a la planta y a la salida de cada una de las Unidades cada hora, determinando la eficiencia en función del agua cruda y en función del agua sedimentada. Los resultados son los siguientes:

##### 4.2.7.1.1. En función de la calidad del agua cruda

Los datos presentados en la Tabla 32 y Gráfica. 15 corresponden a la información recolectada en las planillas del año 2016, se agruparon en rangos de turbiedades de agua cruda y se establecieron a su vez los correspondientes a la calidad de agua sedimentada en cada Unidad.

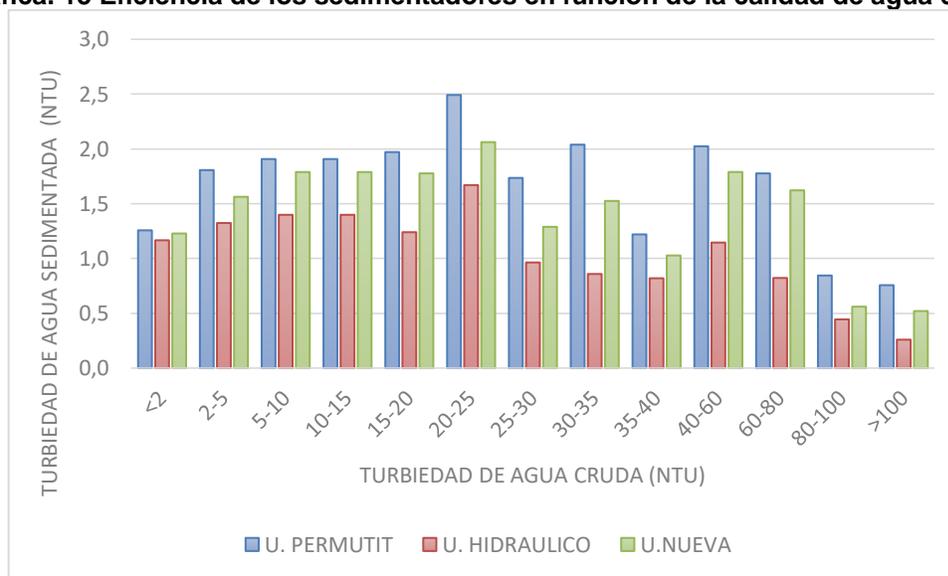


**Tabla 32. Datos de agua cruda y clarificada de cada una de las Unidades**

| Rangos de turbiedad de agua cruda | Frecuencia | Turbiedad media (NTU) |             |               |          |
|-----------------------------------|------------|-----------------------|-------------|---------------|----------|
|                                   |            | Agua cruda            | U. Permutit | U. Hidráulico | U. Nueva |
| <2                                | 4643       | 1,399                 | 1,257       | 1,166         | 1,228    |
| 2-5                               | 1703       | 2,890                 | 1,806       | 1,324         | 1,563    |
| 5-10                              | 475        | 11,932                | 1,907       | 1,399         | 1,789    |
| 10-15                             | 208        | 11,932                | 1,907       | 1,399         | 1,789    |
| 15-20                             | 99         | 16,648                | 1,971       | 1,240         | 1,776    |
| 20-25                             | 46         | 22,126                | 2,491       | 1,670         | 2,061    |
| 25-30                             | 25         | 27,323                | 1,735       | 0,964         | 1,289    |
| 30-35                             | 28         | 32,597                | 2,038       | 0,859         | 1,525    |
| 35-40                             | 10         | 37,836                | 1,220       | 0,820         | 1,028    |
| 40-60                             | 34         | 47,118                | 2,024       | 1,146         | 1,789    |
| 60-80                             | 28         | 68,216                | 1,776       | 0,823         | 1,622    |
| 80-100                            | 9          | 89,300                | 0,845       | 0,445         | 0,561    |
| >100                              | 12         | 194,287               | 0,757       | 0,260         | 0,521    |

Fuente: (autor)

**Gráfica. 15 Eficiencia de los sedimentadores en función de la calidad de agua cruda.**



Fuente: (autor)

De la Gráfica. 15 se analizan que las Unidades en general tiene una buena eficiencia pues la turbiedad de agua sedimentada no pasa de 2,5 NTU hacia los filtros, siendo más eficiente la Unidad Hidráulica con un porcentaje del 91,93 % seguida de la Unidad Nueva con 89,73 % y por último la Unidad Permutit con 87,20 %. Las condiciones críticas en

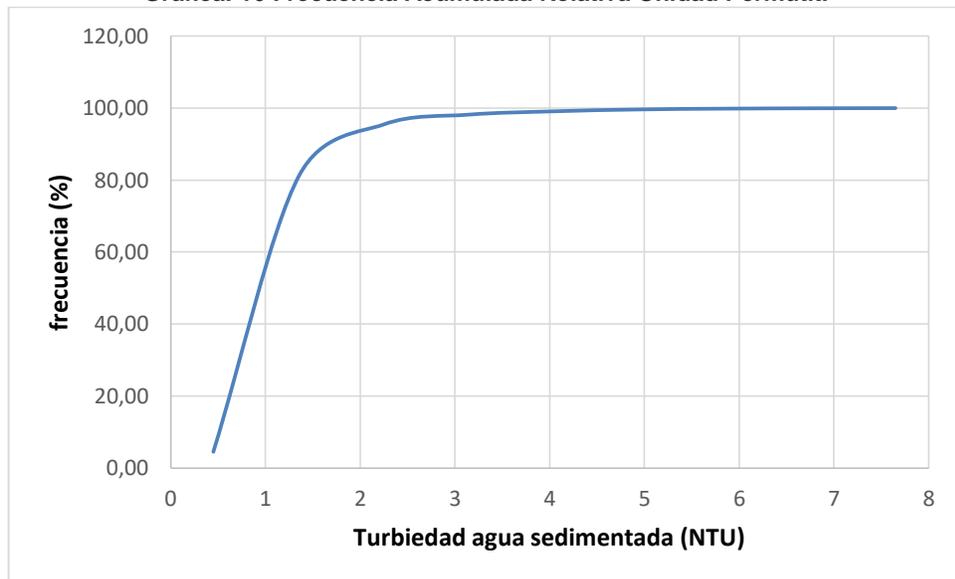


operación se presentan cuando el agua cruda tiene una turbiedad entre 5-10NTU la eficiencia en los sedimentadores son alrededor del 83% esto es debido a que en esas situaciones el floc es muy liviano y la sedimentación no es completa.

#### 4.2.7.1.2. En función de la calidad de agua sedimentada

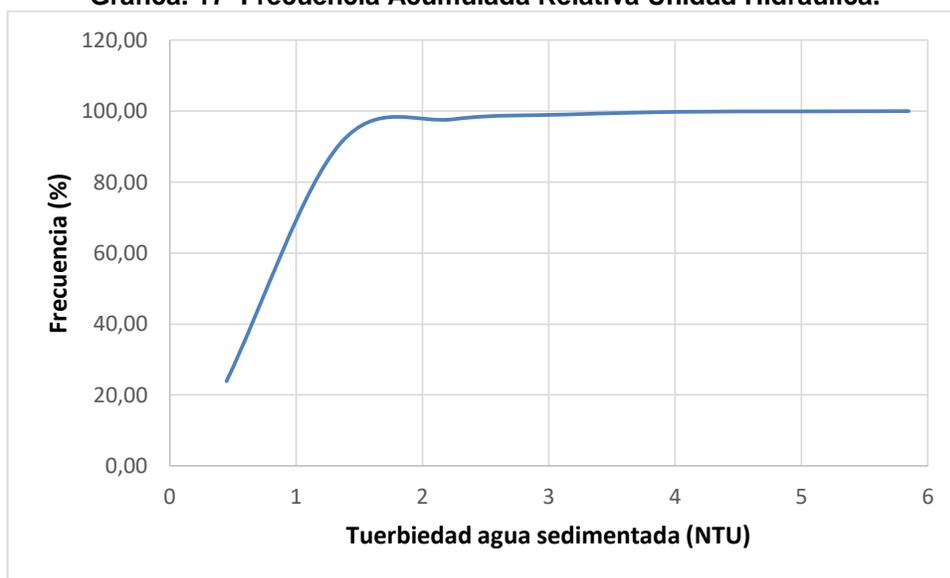
Para este análisis se tomaron los datos de turbiedad registrados en la planilla 2016, los datos se agrupan en rangos predeterminados, y se determina la frecuencia de ocurrencia en el periodo establecido Los resultados se consignan en la Gráfica. 16, Gráfica. 17 y Gráfica. 18

Gráfica. 16 Frecuencia Acumulada Relativa Unidad Permutit.



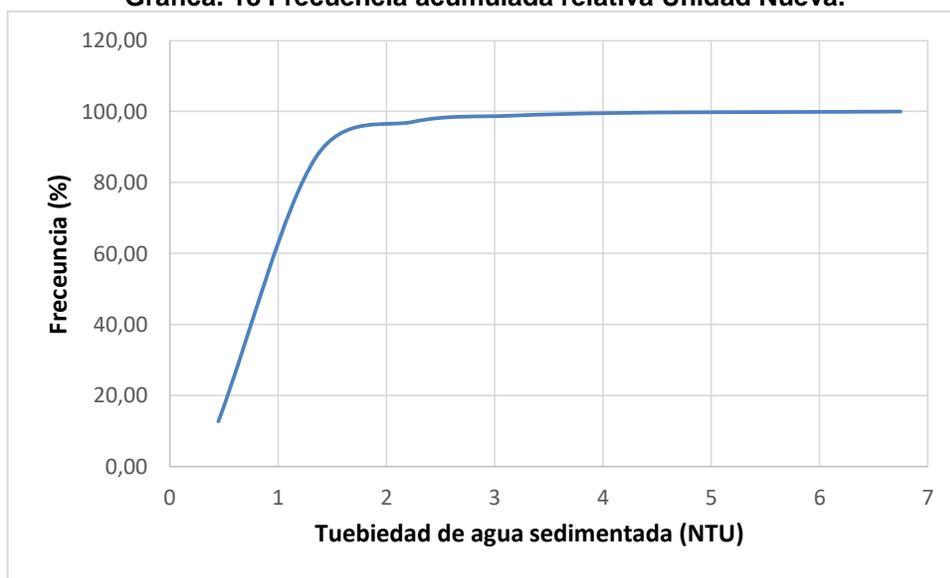
Fuente: (autor)

**Gráfica. 17 Frecuencia Acumulada Relativa Unidad Hidráulica.**



Fuente: (autor)

**Gráfica. 18 Frecuencia acumulada relativa Unidad Nueva.**

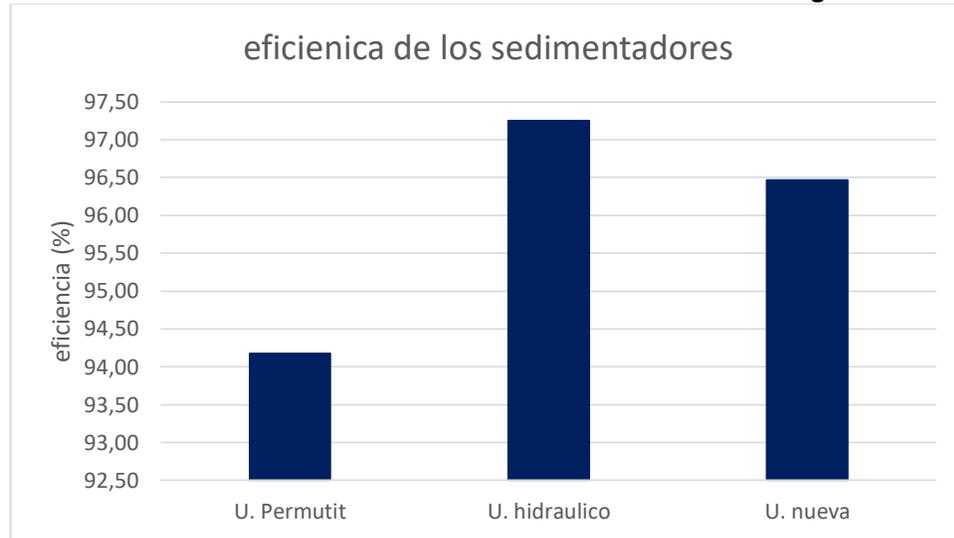


Fuente: (autor)



Apartar de las gráficas anteriores se construye la Gráfica. 19 que muestra el comportamiento de los sistemas de sedimentación, indicando la eficiencia que estos tiene para que su efluente presente valores de turbiedad menor a 2 NTU

**Gráfica. 19 Eficiencia De Cada Unidad A Partir De La Calidad De Agua Clarificada**



Fuente: (autor)

Esta grafica evidencia con mayor claridad que el comportamiento de los sedimentadores tiene un muy buen comportamiento con una eficiencia del 94,2%, 97,3%, 96,5% para las Unidades Permutit, hidráulica y Nueva respectivamente.

#### 4.2.7.1.3. En función de la carga superficial

En la Tabla 33 se halla la carga de superficial teórica y real

**Tabla 33. Carga superficial en las unidades de sedimentación**

|                         | profundidad (m) | tiempo de retención teórico (min) | tiempo de retención real (min) | carga superficial teórica (m3/m2/día) | carga superficial (m3/m2/día) |
|-------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| U. Hidráulica Derecho   | 4,7             | 94,53                             | 112                            | 71,60                                 | 60,43                         |
| U. Hidráulica Izquierdo | 4,7             | 94,53                             | 111                            | 71,60                                 | 60,97                         |
| U. Nueva Derecho        | 4,8             | 85,75                             | 74                             | 80,61                                 | 93,41                         |
| U. Nueva Izquierdo      | 4,8             | 85,75                             | 80                             | 80,61                                 | 86,40                         |

Fuente: (autor)



Con los valores hallados de carga superficial para la unidad Hidráulica es de  $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$  y para la Unidad nueva lado derecho e izquierdo es de 93 y  $86 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$  respectivamente, al evaluarlo con los parámetros recomendados por el RAS ambas unidades se encuentran por debajo de lo sugerido que es de  $120 - 185 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$ . Al calcular la eficiencia con respecto al valor teórico y real se obtiene que para la unidad hidráulica del 84,4% en ambos lados y para la unidad nueva su eficiencia no es buena debido a que la carga superficial es mayor a la teórica.

El tiempo de retención para el RAS en sedimentadores de alta tasa varía entre 10 – 15 min este tiempo se cumple si se maneja el caudal de diseño que son 350 L/s para unidad hidráulica y 340 L/s para la unidad nueva. En operación se manejan caudales de 160- y 220 L/s respectivamente por lo que el tiempo de retención aumenta 5 veces y 4 veces en las unidades con respecto al tiempo de retención estipulado por el RAS.

A pesar de que los parámetros de diseño de tiempo de retención y carga superficial no cumplen con los valores del RAS, la eficiencia de las unidades es buenas ya que los resultados con respecto al promedio de turbiedad de agua clarificada presentan turbiedades menores a 2NTU que es lo recomendado según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos

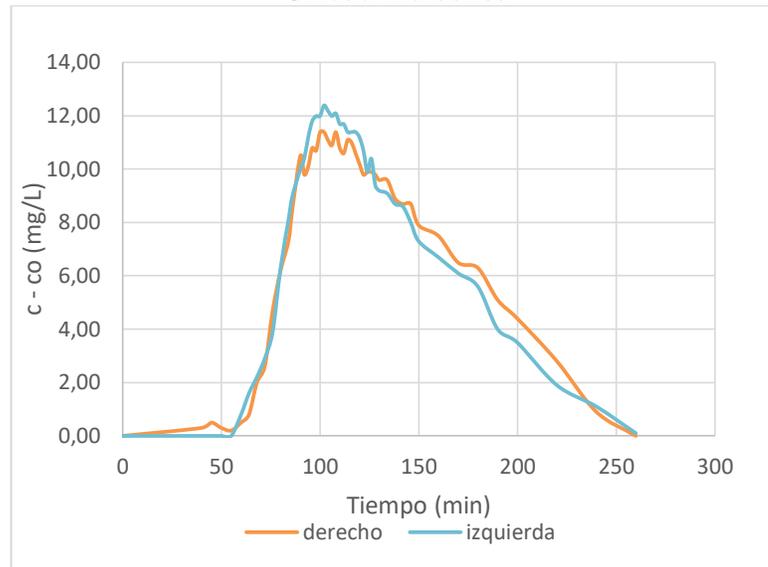
#### **4.2.7.2. Características Hidráulicas de los sedimentadores**

##### **4.2.7.2.1. Método de la Curva de Tendencia de la Concentración del Trazador**

En la Gráfica. 20, Gráfica. 21, Gráfica. 22 y Gráfica. 23 se presentan la curva de concentración de trazador vs tiempo obtenida en los ensayos de trazadores. En la Tabla 34 se sintetiza los parámetros para el análisis de la curva de tendencia y en la Tabla 35 se presenta los parámetros calculados recomendado por (CEPIS, 2004b).

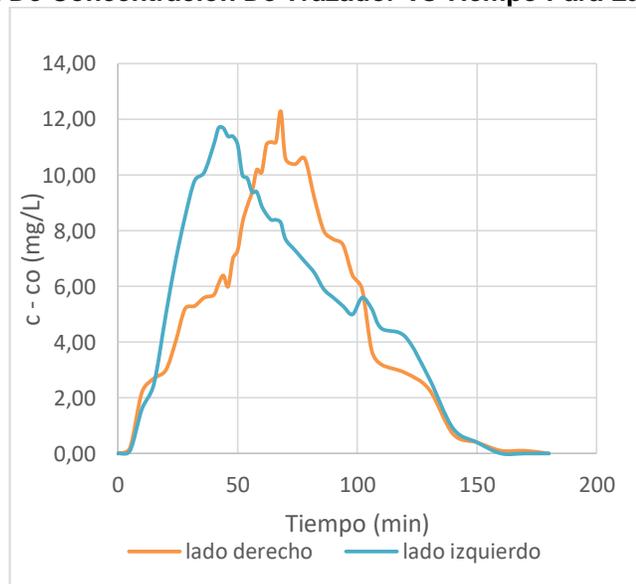


**Gráfica. 20 Curva De Concentración De Trazador Vs Tiempo Para El Sedimentador De La Unidad Hidráulica**



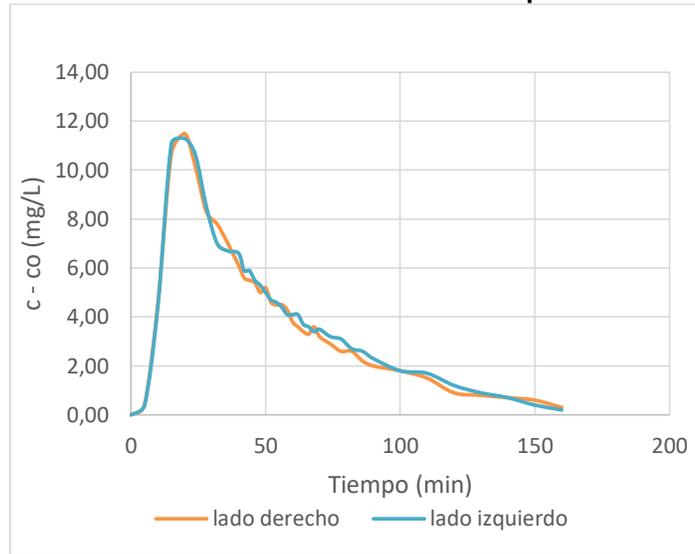
Fuente: (autor)

**Gráfica. 21 Curva De Concentración De Trazador Vs Tiempo Para La Unidad Permutit 1**



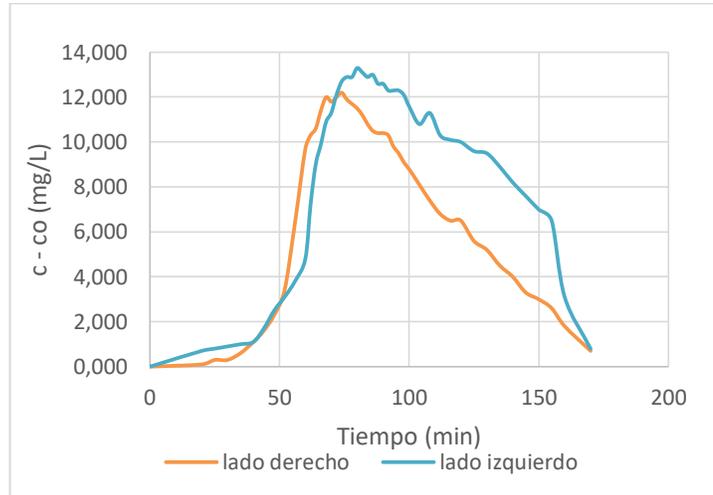
Fuente: (autor)

**Gráfica. 22 Curva De Concentración De Trazador Vs Tiempo Para La Unidad Permutit 2**



*Fuente: (autor)*

**Gráfica. 23 Curva De Concentración De Trazador Vs Tiempo Para El Sedimentador De La Unidad Nueva**



*Fuente: (autor)*

**Tabla 34. Parámetros Del Método De Curva De Tendencia**

|     | Unidad<br>Hidráulica<br>lado<br>derecho | Unidad<br>Hidráulica<br>lado<br>izquierdo | Unidad<br>Nueva<br>lado<br>derecho | Unidad<br>Nueva<br>lado<br>izquierdo | Unidad<br>Permutit 1<br>lado<br>derecho | Unidad<br>Permutit 1<br>lado<br>izquierdo | Unidad<br>Permutit 2<br>lado<br>derecho | Unidad<br>Permutit 2<br>lado<br>izquierdo |
|-----|---|---|------------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|---|
| Ti  | 64                                      | 64  | 44                                 | 44                                   | 20                                      | 20  | 10                                      | 10  |
| To  | 94,7                                    | 94,7                                      | 59,3                               | 59,3                                 | 107,1                                   | 107,1                                     | 85,7                                    | 85,7                                      |
| Tm  | 112,5                                   | 111,3                                     | 82,2                               | 88,2                                 | 61,9                                    | 54,2                                      | 43,22                                   | 43,7                                      |
| Tp  | 102                                     | 102                                       | 74                                 | 80                                   | 68                                      | 43  | 20                                      | 20  |
| Tc  | 106,4                                   | 106,4                                     | 67                                 | 92,7                                 | 57,4                                    | 63,7                                      | 29,1                                    | 34,3                                      |
| Tb  | 171,2                                   | 168,3                                     | 123,4                              | 123,8                                | 128,5                                   | 137,4,                                    | 106,5                                   | 113,6                                     |
| T90 | 150,1                                   | 146,8                                     | 119,6                              | 132,8                                | 94,4                                    | 95,5                                      | 75,3                                    | 76,6                                      |
| T10 | 85,8                                    | 85,8                                      | 60,9                               | 64,1                                 | 33,6                                    | 29,9                                      | 14,6                                    | 14,76                                     |

Fuente: (autor)

**Tabla 35. Análisis De Las Curvas De Tendencia Del Trazador**

|         | Unidad<br>Hidráulica<br>lado<br>derecho | Unidad<br>Hidráulica<br>a lado<br>izquierd<br>o | Unidad<br>Nueva<br>lado<br>derecho | Unidad<br>Nueva<br>lado<br>izquierd<br>o | Unidad<br>Permutit<br>1 lado<br>derecho | Unidad<br>Permutit<br>1 lado<br>izquierd<br>o | Unidad<br>Permutit<br>2 lado<br>derecho | Unidad<br>Permutit<br>2 lado<br>izquierd<br>o |
|---------|---|---|------------------------------------|--|---|---|---|---|
| ti / to | 0,67                                    | 0,67  | 0,74                               | 0,74                                     | 0,19                                    | 0,19  | 0,12                                    | 0,11  |
| tm / to | 1,18                                    | 1,17  | 1,38                               | 1,48                                     | 0,58                                    | 0,5   | 0,50                                    | 0,51  |
| tp / to | 1,08                                    | 1,08  | 1,24                               | 1,34                                     | 0,63                                    | 0,4   | 0,20                                    | 0,23  |
| tc / to | 1,10                                    | 0,88  | 1,12                               | 1,56                                     | 0,54                                    | 0,59  | 0,33                                    | 0,4   |
| tb / to | 1,8                                     | 1,7   | 2,07                               | 2,08                                     | 1,19                                    | 1,2   | 1,2                                     | 1,3   |
| e       | 1,05                                    | 1,26  | 0,94                               | 0,74                                     | 1,45                                    | 1,37  | 1,51                                    | 1,52  |
| im      | 1,75                                    | 1,71  | 1,96                               | 2,07                                     | 2,8                                     | 3,1   | 5,16                                    | 5,2   |
| 1/ im   | 57,1%                                   | 58,5%   | 51,02%                             | 48,31%                                   | 35,71 %                                 | 32,25%  | 19,37%                                  | 19,23%  |

Fuente: (autor)

El comportamiento del trazador para cada una de las Unidades tiene un desplazamiento hacia la izquierda, indicando que existe la presencia de cortocircuitos o zonas muertas dentro de los sedimentadores pues no cumple con una curva Gaussiana. Evaluando los parámetros de la tabla 17 para la Unidad Hidráulica y la Unidad Nueva presentan resultados que conllevan a similares comportamientos. Para los valores de  $tp/to > 1$ ,  $im < 2$  y  $1/im$  indican la presencia de flujo pistón con un porcentaje del 58% y 49% respectivamente; la relación  $ti/to$  entre valores de  $0 - 1$ ,  $e \approx 1$  y el porcentaje de 58% Unidad Hidráulica y 49 % Unidad Nueva demuestran que en los sedimentadores tiene presencia tanto de flujo pistón como de flujo mezclado es decir predomina un flujo mixto. En los valores de  $tc/to > 0,7$  y  $tb/to \approx 2,3$  están relacionado con las corrientes de turbulencia dentro del sedimentador confirmando la presencia de flujo mezclado. La



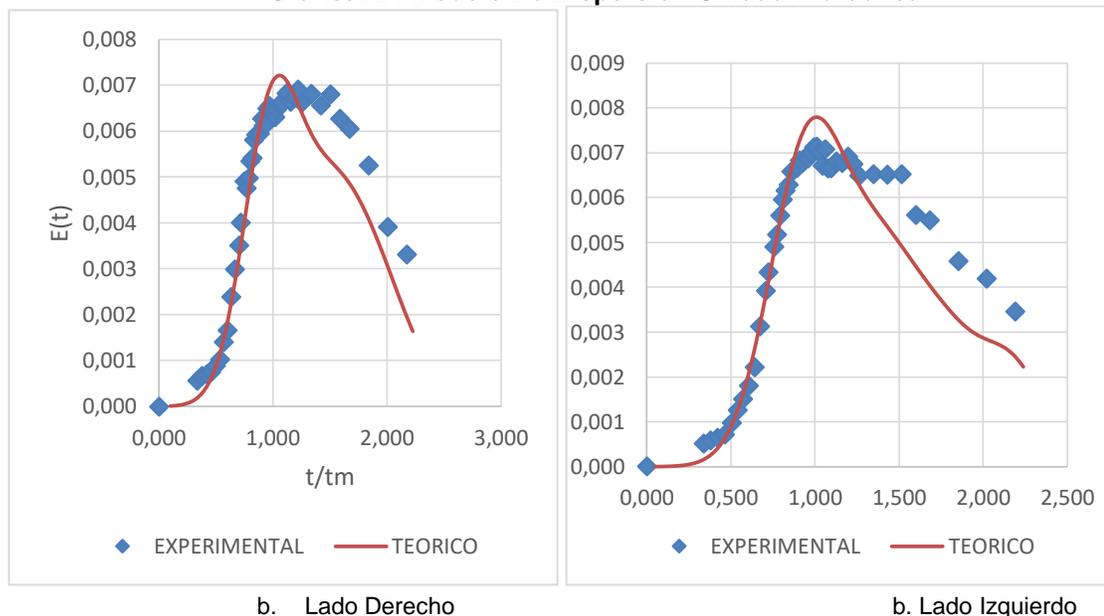
presencia de zonas muertas lo indica la relación  $t_m/t_o > 1$  y es debido a la acumulación de lodos en el interior de los sedimentares ocasionando que el tiempo de retención real de los sedimentadores sea mayor al tiempo teórico

Para las Unidades mecánicas Permutit 1 y 2 predomina el flujo mezclado y gran presencia de cortocircuitos, las relaciones de  $t_p/t_o \approx 0$ ,  $t_i/t_o \approx 0$  y  $i_m > 2$  confirman un flujo totalmente de mezcla además  $1/i_m$  indica que tan solo el 33% y 19 % es de flujo pistón. Siendo el tiempo de retención real menor que el tiempo teórico provoca la presencia de cortocircuitos originando en la fase de floculación por los agitadores mecánicos que pueden estar impulsando el agua que entra a la Unidad hacia el efluente de la misma. Por otra parte los operarios confirman que hace más de 10 años no se realiza un mantenimiento a las paletas pues no todas están completas pues se han fracturado en el transcurso de los años.

#### 4.2.7.2.2. Modelo de dispersión axial

En la Gráfica. 24, Gráfica. 25, Gráfica. 26 y Gráfica. 27 se obtiene las curvas por dispersión teóricas y reales de cada uno de los sedimentadores de las Unidades y en la Tabla 36 se resumen los valores obtenidos por este método.

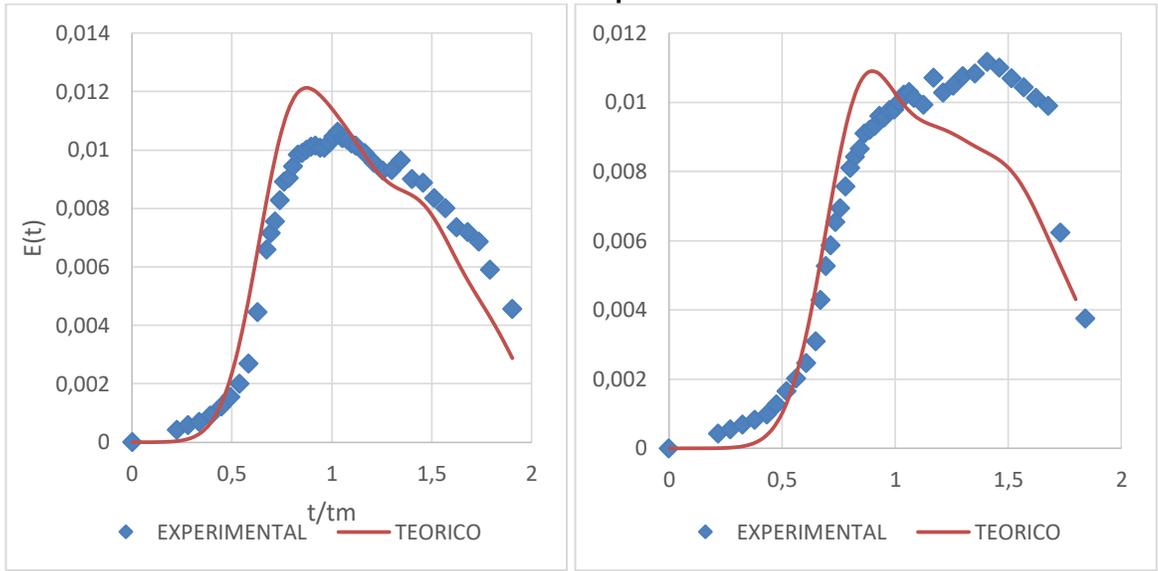
**Gráfica. 24 Modelo De Dispersión Unidad Hidráulica**



Fuente: (autor)



**Gráfica. 25 Modelo De Dispersión Unidad Nueva**

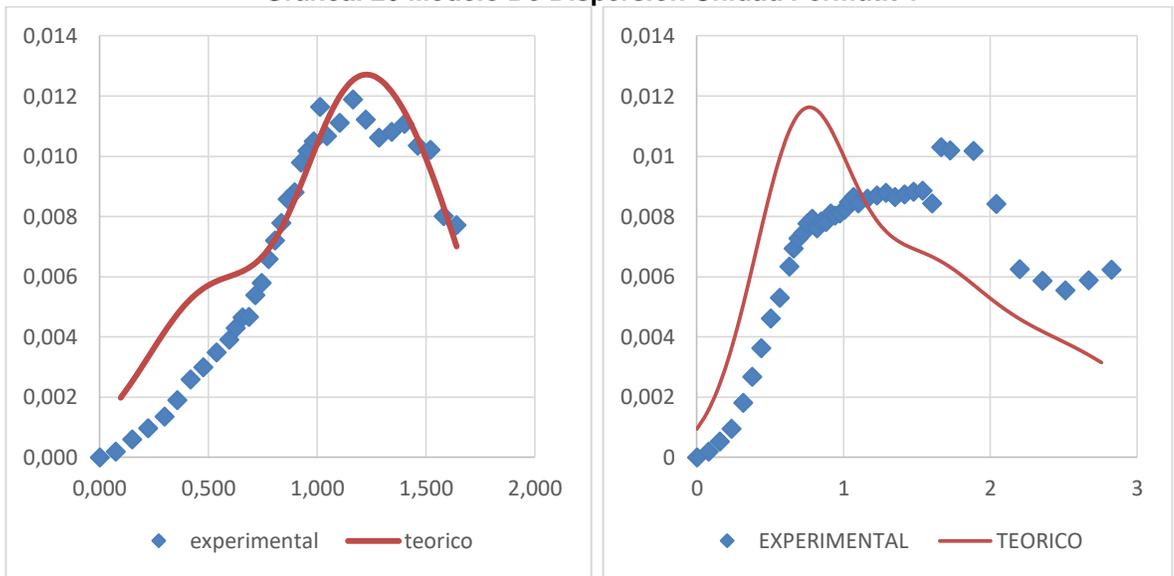


a. Lado Derecho

b. Lado Izquierdo

Fuente: (autor)

**Gráfica. 26 Modelo De Dispersión Unidad Permutit 1**



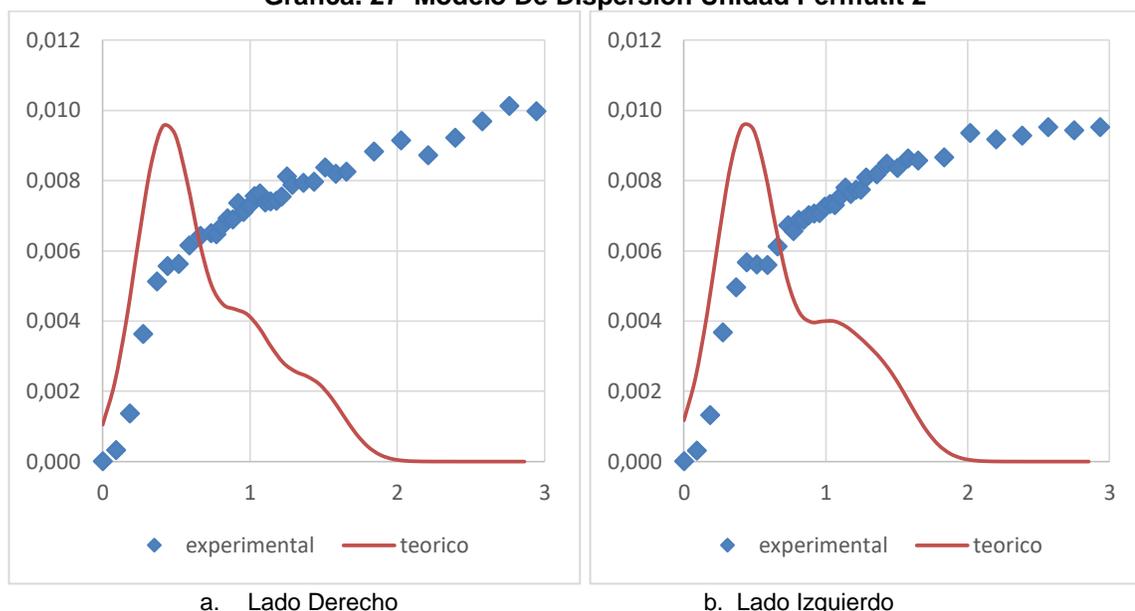
a. Lado Derecho

b. Lado Izquierdo

Fuente: (autor)



**Gráfica. 27 Modelo De Dispersión Unidad Permutit 2**



Fuente: (autor)

**Tabla 36. Resultados Del Modelo De Dispersión**

|                                | Unidad Hidráulica a lado derecho | Unidad Hidráulica a lado izquierdo | Unidad Nueva lado derecho | Unidad Nueva lado izquierdo | Unidad Permutit 1 lado derecho | Unidad Permutit 1 lado izquierdo | Unidad Permutit 2 lado derecho | Unidad Permutit 2 lado izquierdo |
|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| To exp (min)                   | 117,22                           | 116,19                             | 87,29                     | 92,37                       | 65,59                          | 63,69                            | 65,59                          | 63,69                            |
| $\sigma^2$ (min <sup>2</sup> ) | 1399,67                          | 1318,21                            | 815,26                    | 895,35                      | 988,29                         | 1119,53                          | 988,29                         | 1119,53                          |
| $\sigma^2\theta$               | 0,10                             | 0,09                               | 0,106                     | 0,105                       | 0,229                          | 0,137                            | 0,229                          | 0,137                            |
| Dispersión (D/ $\mu$ l)        | 0,026                            | 0,025                              | 0,027                     | 0,027                       | 0,063                          | 0,073                            | 0,107                          | 0,105                            |

Fuente: (autor)

Para la Unidad Hidráulica y la Unidad Nueva se observa en la Gráfica. 24 y Gráfica. 25 la tendencia de la línea experimental se intenta ajustar con la línea de teórica pero no es completamente, ese ajuste se da solo en la primera parte cuando se llega a la máxima concentración esa dispersión al final de la curva se debe a cortocircuitos a la salida de la unidad, evaluando el parámetro de dispersión del comportamiento teórico al experimental es de 0,025 para la Unidad Hidráulica y 0,027 para la Unidad Nueva indicando un grado



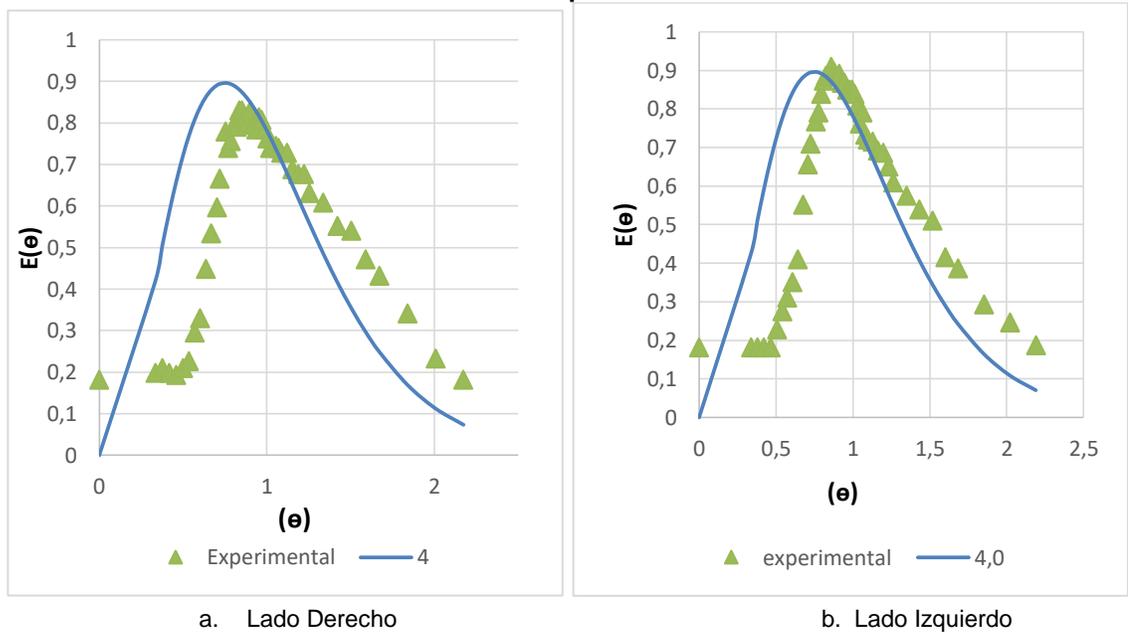
de dispersión intermedio lo que se confirma que en ambas Unidades predomina un régimen combinado de flujo pistón y mezclado.

En la Unidades Permutit 1 y 2, la línea experimental presenta una consolución desplazado hacia la derecha, este comportamiento se debe a un cortocircuito, y operacionalmente se explica debido a que las paletas de agitación no se le han realizado mantenimiento desde hace 10 años, pues las paletas no están completas debido al transcurso de los años se han deteriorado hasta el punto de quebrarse, afectando la eficiencia de la unidad. Y es evidenciado en el momento que se está coagulando zonas en el que el floc no sedimenta sino que sube hasta la superficie de la canaleta de recolección generando una nubosidad, permitiendo pasar agua con turbiedad hacia los filtros, aumentado el tiempo de carrera y el tiempo de lavado a los filtros convencionales y autolavados. Evaluando el parámetro de dispersión fue de 0,07 para Permutit 1 y 0,1 para Permutit 2 demostrando que estas unidades no predomina el régimen de flujo pistón.

#### 4.2.7.2.3. Modelo de tanques en serie

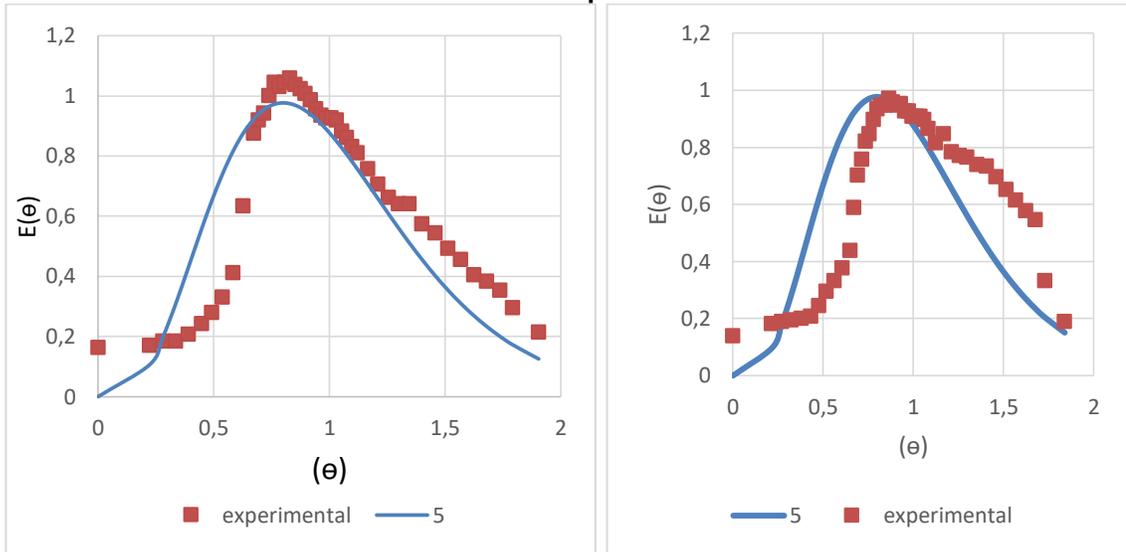
En las siguientes graficas se obtiene la comparación de la distribución entre el modelo de tanque en serie con el número de tanque con mayor ajuste al valor experimental y el comportamiento experimental para cada Unidad.

**Gráfica. 28 Modelo de Tanques en Serie Unidad Hidráulica**



Fuente: (autor)

**Gráfica. 29 Modelo de Tanques en Serie Unidad Nueva**

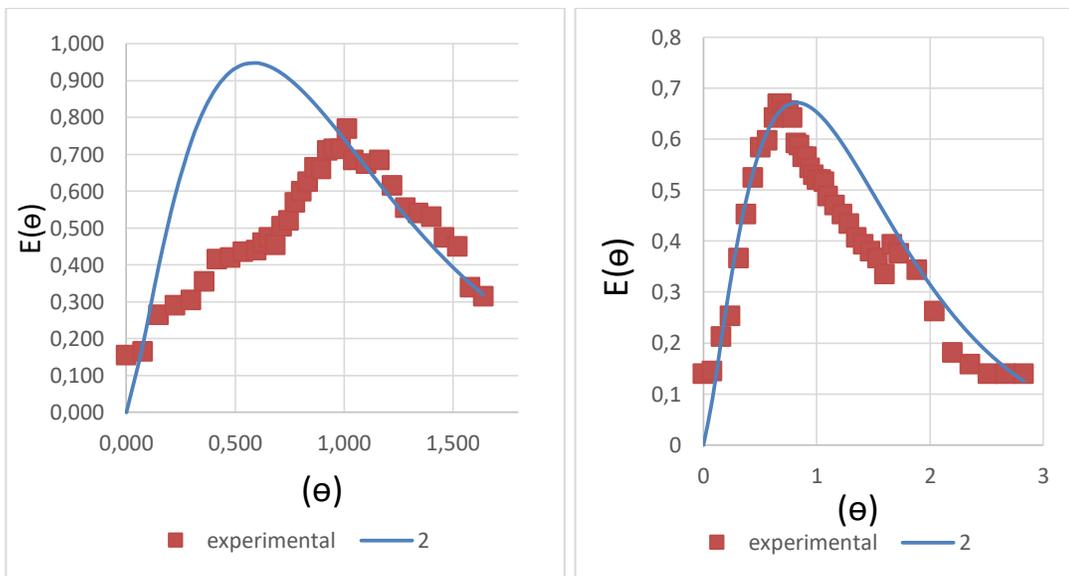


a. Lado Derecho

b. Lado Izquierdo

Fuente: (autor)

**Gráfica. 30 Modelo de Tanques en Serie Unidad Permutit 1**



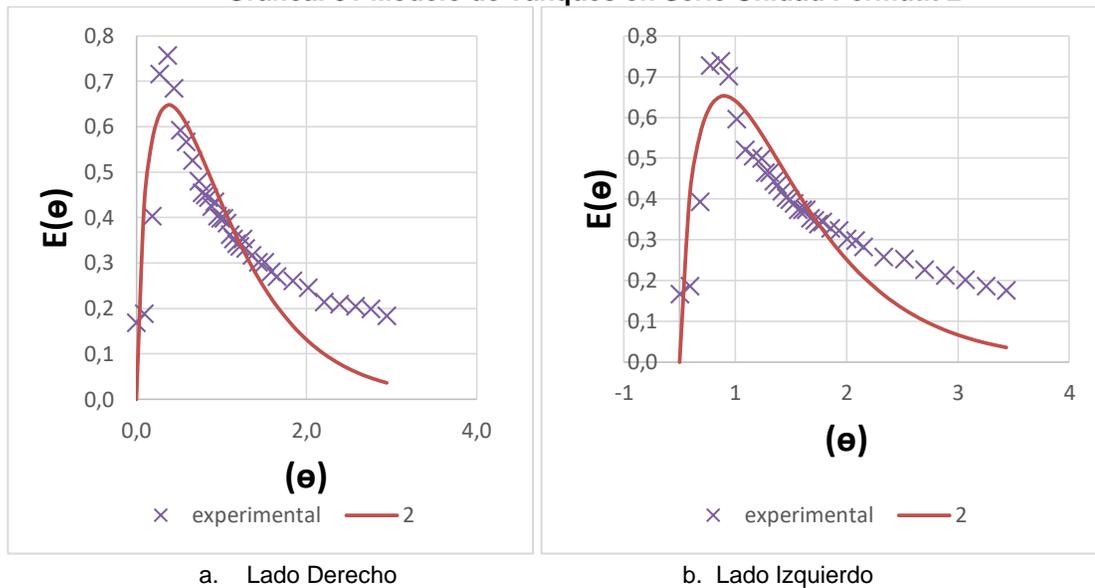
a. Lado Derecho

b. Lado Izquierdo

Fuente: (autor)



**Gráfica. 31 Modelo de Tanques en Serie Unidad Permutit 2**



Fuente: (autor)

El análisis de correlación de las curvas teóricas con la curva experimental, Índico que la Unidad Hidráulica presento mayor correlación 63% para el tanque en serie número 4 en ambos, debido al número ratifica la presencia del flujo dual para dicha Unidad. En el caso de la Unidad Nueva la mayor correlación se presentó con valores del 88% % para el tanque número 5 para cada lado, por lo que se corrobora el mayor predominio de flujo dual en esta Unidad. Las Unidades Permutit 1 y 2 el valor con mayor correlación fue en el tanque 2 con un porcentaje del 47 % lado derecho y 67,5 % lado izquierdo y 89,3% para ambos lados. Debido al número tan pequeño de tanques en serie para ambas Unidades mecánicas el régimen de flujo que se maneja es totalmente de mezcla completa.

#### 4.2.7.2.4. Método de Wolf Resnick

Este modelo matemático permite cuantificar el porcentaje de flujo pistón, mezcla completa y zonas muertas que se presenta en la operación de un reactor. Los resultados se presentan en la Tabla 37

**Tabla 37. Resultados Del Modelo De Wolf Resnick**

|                 | Unidad Hidráulica lado derecho | Unidad Hidráulica a lado izquierdo | Unidad Nueva lado derecho | Unidad Nueva lado izquierdo | Unidad Permutit 1 lado derecho | Unidad Permutit 1 lado izquierdo | Unidad Permutit 2 lado derecho | Unidad Permutit 2 lado izquierdo |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| $\Theta$        | 0,98                           | 0,99                               | 0,98                      | 1,14                        | 0,4                            | 0,34                             | 0,29                           | 0,23                             |
| Tan $\alpha$    | 1,47                           | 1,61                               | 1,47                      | 2,3                         | 1,63                           | 1,78                             | 1,40                           | 1,43                             |
| % Pistón        | 76,91 %                        | 78,59 %                            | 76,91 %                   | 69,26 %                     | 60,11 %                        | 58,26 %                          | 48,27 %                        | 49,65 %                          |
| % Zonas Muertas | 27,47 %                        | 26,01 %                            | 27,42 %                   | 29,07 %                     | 33,46 %                        | 41,64 %                          | 39,92 %                        | 39,57 %                          |
| % Mezclado      | 23,19 %                        | 21,41 %                            | 23,19 %                   | 30,74 %                     | 39,89 %                        | 41,74 %                          | 53,48 %                        | 50,35 %                          |

Fuente: (autor)

Para la Unidad Hidráulica, Nueva Permutit 1 y Permutit 2 se obtuvieron porcentajes de flujo pistón iguales a 77,7%, 73,1%, 59,1% y 48,9%; respectivamente lo que se concluye que para la Unidad Hidráulica y la Unidad Nueva predomina el flujo pistón lo que representa una buena eficiencia pues el porcentaje de régimen es mayor del 60%. Para Permutit 1 y 2 se presenta un flujo dual, es decir con régimen de flujo pistón y mezclado dentro de cada una de las Unidades.

Todas las Unidades presentan zonas muertas con porcentajes de 27% ambos lados para la Unidad Hidráulica, 27% lado derecho y 29% lado izquierdo para la Unidad Nueva, 33% lado derecho y 41% lado izquierdo para la Unidad Permutit 1 y 39% ambos lados para la Unidad Permutit 2. Los resultados anteriores son debido a la acumulación de lodos en la estructura afectando la eficiencia de las Unidades.

La causa de lodos en las unidades se debe a que en el momento lavado no hay control sobre la descarga de los lodos ya que no hay tratamiento para ello. Dejando el tiempo de descarga a opción de cada operario.

#### 4.2.7.3. Zona de entrada

##### 4.2.7.3.1. Unidad Permutit 1 y 2

Para dichas Unidades no se evalúa ya que el agua pasa de la zona de floculación a la zona de sedimentación sin pasar por ningún canal ni orificios, solamente asciende de la zona de floculación hacia las colmenas en cada una de las Unidades.



#### 4.2.7.3.2. Unidad Hidráulica

La distribución del agua floculada en los compartimentos de sedimentación se realiza mediante sendos ductos de sección trapezoidal con sección inicial de 1,6 m de base mayor, 0,3 m de base menor y 1,3 m de altura, provistos de 34 orificios de distribución de 0,15 m x 0,4 m.

#### 4.2.7.3.3. Unidad Nueva

La distribución del agua floculada en los compartimentos de sedimentación se realiza mediante sendos ductos de sección trapezoidal con sección inicial de 1,85 m de base mayor, 0,35 m de base menor y 1,5 m de altura, provistos de 54 orificios de distribución de diámetro de 6 pulgadas cada 0,5 m. Los resultados se expresan en la Tabla 38:

**Tabla 38. Características de entrada en las Unidades**

|                      | Caudal<br>(m <sup>3</sup> /s) | Numero<br>de<br>orificios | área de<br>orificios<br>(m <sup>2</sup> ) | radio<br>hidráulico<br>(m) | velocidad<br>(m/s) | gradiente<br>(s <sup>-1</sup> ) |
|----------------------|-------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Unidad<br>Hidráulica | 0,08                          | 34                        | 0,06                                      | 0,05                       | 0,04               | 2,35                            |
| Unidad Nueva         | 0,11                          | 45                        | 0,0182                                    | 0,37                       | 0,13               | 5,55                            |

Fuente: (autor)

Para la Unidad Hidráulica y Unidad Nueva se obtuvieron velocidades de 0,03 y 0,13 m/s y gradientes de 4,87 y 10,97 s<sup>-1</sup> respectivamente, las condiciones Hidráulicas recomendadas entre la conexión de floculadores y decantadores es generalmente velocidades sobre 0,15 m/s y gradientes entre 10 -15 s<sup>-1</sup> o igual gradiente al que se tenga en el último tramo del floculador (ARBOLEDA, 2000). En la tabla 38 se observa que los gradientes son menores al valor recomendado pero si tienen valores menores al último tramo del floculador de cada Unidad (5,14 y 8,57 s<sup>-1</sup>), en los valores de las velocidades en los orificios son más bajas a lo indicado, debido a lo anterior se explica la existencia de depósitos de lodos que generan zonas muertas dentro de cada decantador.



#### 4.2.7.4. Zona de sedimentación

##### 4.2.7.4.1. Carga unitaria en vertedero

Los resultados para cada unidad de sedimentación se presentan en la Tabla 39.

**Tabla 39. Perdida de carga unitaria en las unidades**

|               | Caudal (m <sup>3</sup> /s) | numero de canaletas | longitud de canal (m) | perdida de carga unitaria (m <sup>3</sup> /h) |
|---------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|---|
| U. Hidráulica | 0,08                       | 13                  | 5                     | 4,43  |
| U. Nueva      | 0,1                        | 12                  | 3,6                   | 8,33  |
| U. Permutit 1 | 0,08                       | 9                   | 4,9                   | 6,52  |
| U. Permutit 2 | 0,1                        | 9                   | 4,9                   | 8,16  |

Fuente: (autor)

En la tabla anterior se observa que las pérdidas de carga por vertedero están dentro de los valores recomendados por (ARBOLEDA, 2000) los cuales deben ser menor a 12 m<sup>3</sup>/h

##### 4.2.7.4.2. Volumen perdido en la zona de sedimentación

Se determina a él volumen con base a la carga lineal en vertedero y velocidad de aproximación, los resultados son presentados en la Tabla 40. Se encuentra que en la Unidad hidráulica tiene un volumen perdido total del 1,2 % y la unidad nueva del 0,10 % dentro del sedimentador

**Tabla 40. Volumen perdido de las unidades hidráulicas**

| Unidad de Sedimentación | Caudal (m <sup>3</sup> /s) | Área de Sedimentación (m <sup>2</sup> ) | Inclinación de placas (°)         | Espesor de la placa (m) | Largo de la placa (m) |
|-------------------------|----------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| U. Hidráulica           | 0,08                       | 110,8                                   | 60                                | 0,008                   | 1,2                   |
| U. Nueva                | 0,11                       | 125,76                                  | 60                                | 0,005                   | 1,2                   |
| Unidad de Sedimentación | velocidad (m/s)            | carga unitaria m <sup>3</sup> /d        | volumen perdido (m <sup>3</sup> ) |                         |                       |
| U. Hidráulica           | 0,02                       | 4,43                                    | 3,13                              |                         |                       |
| U. Nueva                | 0,10                       | 8,33                                    | 0,31                              |                         |                       |

Fuente: (autor)



#### 4.2.8. Proceso de filtración

La filtración se da por medio de 10 filtros autolavados y 4 convencionales, los espesores de los lechos son suministrados por los planos se han tomado de los planos definitivos de construcción 8/41 a 13/41 del contrato de obra N° 403 de 2092 “ampliación y optimización planta de tratamiento Regivit – armenia “y las propiedades de los materiales granulares fueron suministrados por el proveedor de la planta obteniendo la Tabla 41:

**Tabla 41. Parámetros de filtros autolavados y convencionales**

|   | filtros<br>convencionales | filtros<br>autolavados |
|---|---------------------------|------------------------|
| Caudal de operación por filtro (m3/s)   | 0,125                     | 0,076                  |
| Número de filtros                       | 4                         | 10                     |
| ancho de cada filtro (m)                | 1,51                      | 3,81                   |
| Largo de cada filtro (m)                | 1,02                      | 7,25                   |
| altura de cada filtro (m)               | 3,88                      | 4,7                    |
| Tasa promedio de filtración (m3/m2/día) | 239,47                    | 236,47                 |
| Velocidad de filtración (cm/s)          | 0,28                      | 0,27                   |
| <b>LECHO DE ARENA</b>                   |                           |                        |
| Espesor de lecho (m)                    | 0,15                      | 0,305                  |
| tamaño efectivo (cm)                    | 0,06                      |                        |
| coeficiente de uniformidad              | 1,4                       |                        |
| porosidad                               | 0,55                      |                        |
| Perdida de carga (cm)                   | 1,4                       | 2,76                   |
| <b>LECHO DE ANTRACITA</b>               |                           |                        |
| Espesor de lecho (m)                    | 0,5                       | 0,457                  |
| tamaño efectivo (cm)                    | 0,11                      |                        |
| coeficiente de uniformidad              | 1,4                       |                        |
| porosidad                               | 0,55                      |                        |
| Perdida de carga (cm)                   | 1,39                      | 1,22                   |
| <b>GRAVA</b>                            |                           |                        |
| Espesor de lecho (m)                    | 0,2                       | 0,305                  |
| Perdida de carga (cm)                   | 1,1                       | 0,071                  |
| <b>PERDIDA LOCALIZADA</b>               |                           |                        |
| Perdida localizada total (cm)           | 40                        | 95,2                   |
| Pérdida total (m)                       | 2,14                      | 9,54                   |

Fuente: (autor)

Los parámetros establecidos por la norma Ras 200 y CEPIS indican que la tasa de filtración óptima depende de las características del lecho filtrante, las condiciones de



operación de la planta y calidad del agua que se desea producir. La tasa de filtración debe de estar en un rango de 150 a 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día, para ambos filtros se obtuvieron tasas de filtración de 240 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día con caudales de operación de 500 L/s para filtros convencionales y 760 L/s para filtros autolavados por lo que se encuentran en el rango de la norma del RAS 2000.

#### 4.2.9. Proceso de Desinfección

##### 4.2.9.1. Demanda de cloro

El agua utilizada para el análisis fue tomada a la salida de los filtros autolavados y convencionales, se adiciona diferentes dosis de cloro y se realiza análisis de cloro residual a diferentes tiempos 15, 30 y 60 minutos. Los resultados se muestran en la Tabla 42:

**Tabla 42. Condiciones del agua en la planta y dosis de coagulante aplicado**

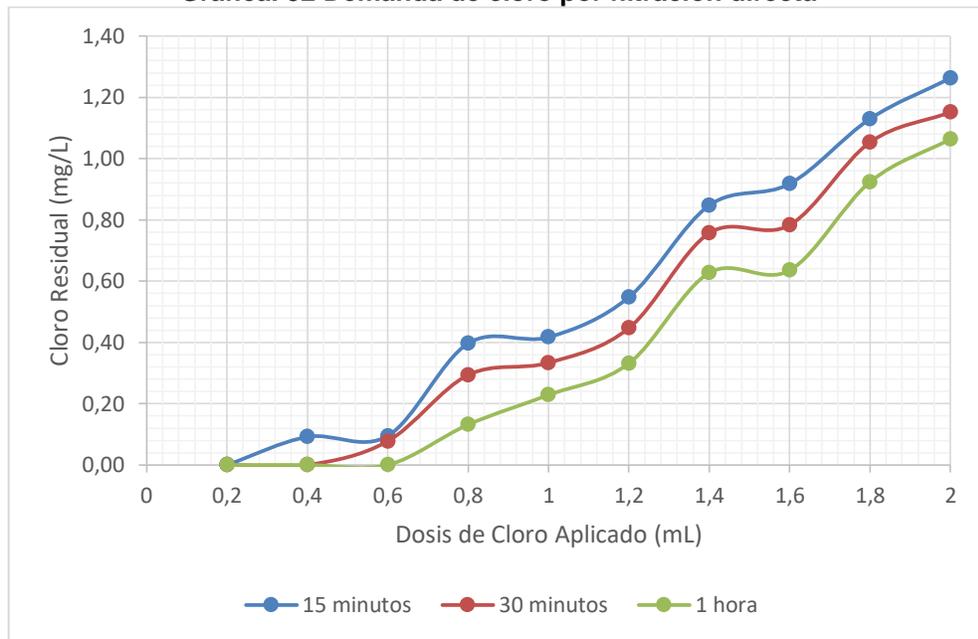
|                         | cruda | tratada | convencionales | autolavados |
|-------------------------|-------|---------|----------------|-------------|
| <b>turbiedad</b>        | 1,5   | 0,4     | 0,5            | 0,6         |
| <b>color</b>            | 15    | 8       | 15             | 12          |
| <b>pH</b>               | 7,94  | 7,61    | 7,77           | 7,54        |
| <b>dosis coagulante</b> | PAC   | 0       |                |             |

**Tabla 43. Condiciones del agua en la planta y dosis de coagulante aplicado**

|                               | cruda | tratada | convencionales | autolavados |
|-------------------------------|-------|---------|----------------|-------------|
| <b>turbiedad</b>              | 5     | 0,3     | 0,3            | 0,3         |
| <b>color</b>                  | 36    | 2       | 2              | 3           |
| <b>pH</b>                     | 7,63  | 6,82    | 6,86           | 6,85        |
| <b>dosis coagulante (ppm)</b> | PAC   | 60      |                |             |

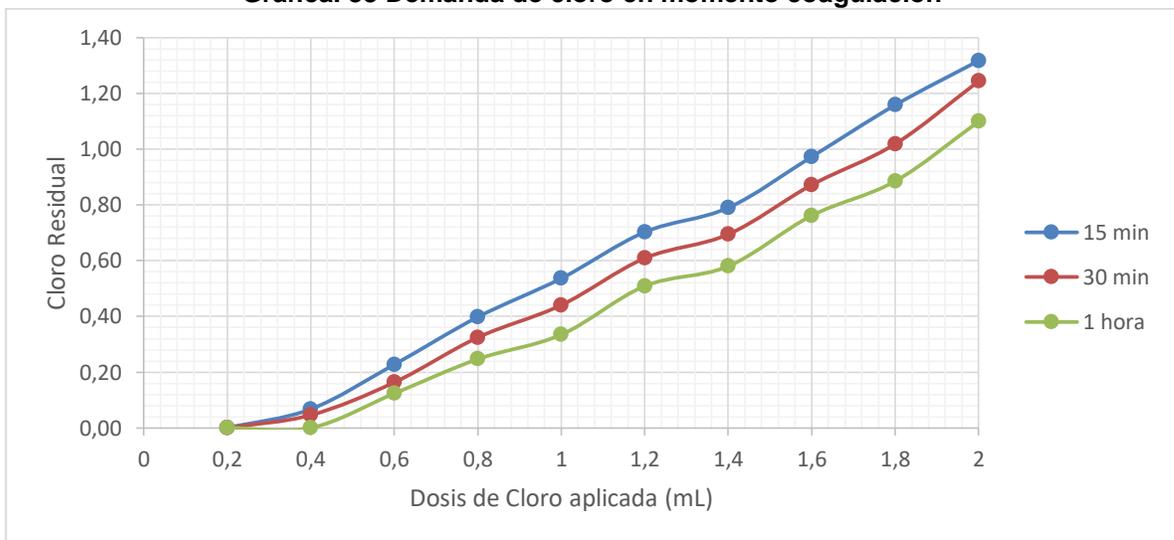


**Gráfica. 32 Demanda de cloro por filtración directa**



Fuente: (Autor)

**Gráfica. 33 Demanda de cloro en momento coagulación**



Fuente: (Autor)

El tiempo de contacto en el tanque de cloro es de 1 hora por los que se determina el punto de quiebre hasta ese tiempo para analizar la dosificación de cloro. El punto de quiebre difiere en el momento que se está coagulando el agua y cuando se realiza filtración directa, en el momento de coagular las partículas de carga orgánica se quedan



en los sedimentadores por lo que la concentración disminuye y por ende el punto de quiebre es menor, generalmente en 1,4 mg/L Cl<sup>-</sup>, por el contrario cuando el agua tiene un tratamiento por filtración directa el punto de quiebre aumenta entre 1,6 -1,7 mg/L de Cl<sup>-</sup>.

Es de gran importancia establecer el punto de quiebre para la dosificación de cloro ya que teniendo cloro residual durante el recorrido en la red distribución garantiza que no haya existencia de protozoos, virus, bacterias, coliformes totales y fecales, mesófilos en la calidad del agua.



## 5. CONCLUSIONES

### 1. coagulación y mezcla rápida

Al realizar el análisis estadístico durante el año 2016 se encontró que el 63,4 % en los valores de las turbiedades del agua cruda es menor a 2 NTU, lo que indica que la fuente hídrica que recibe la planta es de muy buena calidad ya que llega turbiedades por debajo a las exigidas en el resolución 2115 del 2017. El 35,49% comprende turbiedades entre 2-40 NTU y tan solo el 1,11% presentan turbiedades mayores a 40 NTU

Para turbiedades mayor a 2 NTU implican la variación de dosis optima de PAC entre un rango de 55 – 100 ppm y valores de pH entre 7,5 – 8,0. Los resultados obtenidos en el ensayo de jarras es un estimativo, por lo que se debe realizar pruebas de jarras cada vez que la calidad del agua cruda presente cambios.

Para el caudal de operación de 900L/s la canaleta Parshall y la mezcla rápida presenta una buena eficiencia ya que el número de Froude, la relación entre la altura y el ancho de la garganta, tiempo de mezcla, velocidad en la garganta, gradiente de velocidad y sumergencia se encuentran entre los rangos de la Norma RAS 2000.

### 1. Floculación

Para la calidad de agua que llega a la planta se obtuvieron tiempos óptimos que oscilan entre 27-32 minutos, con gradientes de velocidad óptimos valores entre 12-23 s<sup>-1</sup> respectivamente.

Los tiempos de retención del floculador de la unidad hidráulica par aun flujo de 160L /s es de 68,26 minutos, este tiempo no cumple ni con la norma Ras 2000 ni con el tiempo optimo encontrado en el laboratorio, afectando el comportamiento hidráulico ya que es necesario un caudal mayor de operación en esta unidad.

La Unidad Hidráulica en el análisis hidráulico con un caudal de operación de 160 L/s se encontró cortocircuitos y zonas muertas dentro de la unidad. En la evaluación de los modelos matemáticos para flujo no ideal, se determinó que la unidad presenta un régimen con predominio de flujo pistón, con un porcentaje del 77% sobre el flujo de mezcla del 23%; obteniendo una dispersión intermedia de 0,02 y un número de tanques en serie igual a 31 con un coeficiente de correlación del 96%.

La Unidad Nueva tiene un buen funcionamiento, con un caudal de operación de 220 L/s, en la prueba con trazadores se determinó que no presenta cortocircuitos ni zonas muertas dentro de la unidad. En la evaluación del régimen de flujo a partir de los modelos



matemáticos se deduce que dentro de la unidad predomina el régimen de flujo pistón con un porcentaje del 88% sobre 15% de flujo mezclado; dispersión intermedia de 0,01 y un número de tanques en serie entre 32 y 35 con un coeficiente de correlación del 98%.

El tiempo retención y gradiente de velocidad para las dos unidades Hidráulica y Nueva no cumplen con la normativa del Ras 2000, pues los gradientes son menores del rango de 20-70 s<sup>-1</sup>. Sin embargo los valores obtenidos son más cercanos a los obtenidos en la prueba de jarras

Las velocidades entre las secciones de la unidades de tipo hidráulico son menores al rango de 0,2-0,6 m/s incumpliendo con la norma Ras 2000.

Para las Unidades Permutit 1 y 2 no se logró realizar una prueba de trazadores en el floculador pero se evaluó teóricamente el variador de velocidad de los agitadores que se deben trabajar entre 4 y 5 RPM

## 2. Sedimentación

Los valores de la carga superficial y el tiempo de retención no cumplen con la normativa Ras 2000 que esta entre un rango de 120 -185 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día y 10 – 15 min

El análisis de los comportamientos estadísticos de los sedimentadores permiten concluir de manera muy similar la eficiencia de las unidades de sedimentación ya sea en función de la calidad del agua cruda o del agua sedimentada, con un porcentaje de 94% para Permutit 97% para unidad hidráulica y 96 para unidad nueva

La eficiencia de la Unidad hidráulica es regular, el porcentaje de cortocircuitos y zonas muertas es debido a la baja velocidad que hay en la entrada del sedimentador lo que genera depósitos de lodo reduciendo el volumen perdido del 1,2%. El grado de dispersión de 0,025 y el número de tanque en serie tan bajo indican que el régimen es de flujo mezclado; el 76 % es de flujo pistón el 23% es de flujo mezclado. En la zona de salida la pérdida de carga es menor a 12 m<sup>3</sup>/h cumpliendo con lo recomendado.

La Unidad nueva tiene una eficiencia buena el porcentaje de cortocircuitos y zonas muertas es generado por concentraciones de lodo depositados en el fondo, el volumen perdido total es de 0,1%. El grado de dispersión del 0,027 y el bajo de números de tanque indican régimen de flujo mixto, 75% flujo pistón y 25 % flujo mixto. En la zona de salida la pérdida de carga cumplen con lo recomendado

Permutit 1 y 2 hidráulicamente maneja un régimen de flujo de mezcla, las curvas de dispersión experimental no se ajustan a la teórica presentando grande zonas de cortocircuito debido al valor de dispersión mayor a 0,05, y se explica ya que las malas condiciones en las que se encuentran los agitadores mecánicos reducen la eficiencia de las unidades produciendo grandes cortocircuitos dentro de las unidades mecánicas



afectando su eficiencia. En la zona de salida la pérdida de carga cumplen con lo recomendado.

Los tiempos de retención real de las unidades mecánicas halladas por el método de trazadores son casi la mitad del tiempo teórico representado los cortocircuitos que existen dentro de estas unidades; para las unidades Nueva e hidráulica el tiempo de retención real es mayor 1,2 veces del tiempo teórico representando las zonas muertas en las unidades.

### 3. Filtración

La tasa de filtración y las pérdidas de carga total de los filtros convencionales y autolavados se encuentran en el rango de la norma de Ras 2000 que es de 150 a 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día y pérdidas mínimo de 2 metros respectivamente.

### 4. Cloración

La dosis aplicar del cloro varía dependiendo del tratamiento que se lleve a cabo del agua para filtración directa el cloro residual esta entre 1,6 -1,7 mg/L Cl<sup>-</sup>, para tratamiento convencional coagulando con PAC se reduce a 1,4mg/L Cl<sup>-</sup>.

El valor aceptable de cloro residual libre en cualquier punto de distribución deberá ser entre 0,3 y 2,0 mg/L según la resolución 2115 del 2007

La importancia de mantener el cloro residual en el punto de quiebre de la demanda asegura que el agua se encuentre libre principalmente de microorganismos de Giardia y Cryptosporidium garantizando la salud de la población



## 6. RECOMENDACIONES

- Debido a que en este año se ha presentado varias ocasiones donde el agua cruda llega con alcalinidad muy baja entre 18-22 mg/L CaCo<sub>3</sub>, es necesario implementar cal en la entrada de la canaleta Parshall para optimizar el proceso de coagulación, además se debe determinar la concentración en el dosificador de Cal por medio la descarga en ml/s.
- En condiciones de operación cuando se presenta en el agua cruda turbiedades entre 2-10 NTU y color entre 20 – 50 UPC, en las unidades de sedimentación el floc no sedimenta sino que empieza a quedar suspendido pasando al efluente causando aumento de lavados en los filtros, debido a lo anterior se recomienda realizar pruebas de jarras con polímeros o coagulantes para dichas condiciones con el fin de brindarle peso al floc y evitar la suspensión de este.
- Realizar drenados a las unidades de 5 min por lo menos 4 veces al día para evitar zonas muertas por acumulación de lodos en cada una de ellas y aumentar su eficiencia
- Determinar en las unidades mecánicas Permutit 1 y 2 el gradiente real en el que trabajan dichas unidades
- Realizar mantenimiento a los módulos de sedimentación ya que se encuentran en malas condiciones
- Realizar mantenimiento a los agitadores mecánicos de las unidades Permutit 1 y 2
- Aumentar la velocidad de la unidad hidráulica para aumentar gradiente y velocidad de flujo y evitar la acumulación de lodos en los orificios entre floculador sedimentador
- Realizar reformas en el diseño de la unidad hidráulica pues el caudal de diseño es de 350 L/s y solo ingresa 160 L/s desaprovechando volumen útil en la unidad
- Se recomienda realizar ensayos de velocidad de filtrado y velocidad de lavado para filtros autoclaves y convencionales
- La dosis de cloro para la desinfección del agua y asegurar el cloro residual libre es necesario realizar la pruebas de demanda de cloro frecuentemente



## 7. NOMENCLATURA

### VARIABLES Y PARAMETROS

$\nu$ : viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

$^{\circ}C$ : grados centígrados

$\mu$ : viscosidad absoluta ( $Kgm/m^2-s$ )

A, B, C, D, E, F, G, K, N: parámetros que depende de  $w$  de la tabla 10

A: área ( $m^2$ )

A: área total ( $m^2$ )

A: largo de la placa (m)

Ao: área de los orificios ( $m^2$ )

Cd: coeficiente de descarga;

Ce: coeficiente de porosidad

Co: concentración, mg/L o g/m<sup>3</sup>

Cp: concentración máxima

De: diámetro del lecho

e: espesor de las placas (m)

En: Energía específica (m)

f: coeficiente de Kozeny

G: gradiente de velocidad  $s^{-1}$

g: valor de la gravedad ( $m/s^2$ ;  $cm/s^2$ )

H: profundidad del sedimentador ( $m^3/s$ )

h1: altura del agua antes del resalto (m):

h2: Altura en el resalto (m):



$h_3$ : altura en la sección de salida de la canaleta (m):

$h_f$ : pérdida de carga por accesorios (m)

$h_f$ : pérdida de carga (m)

$h_f$ : pérdida de carga por lecho (m)

$h_o$ : altura de agua en la sección de

$h_p$ : Pérdida de carga en el resalto (m):

$I$ : grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

$k$ : constante de la tabla 9 que depende de  $w$

$K_k$ : Constante de corrección

$k$ : coeficiente de pérdida

$L$ : altura del lecho (m)

$L$ : longitud del canal recolector

$n$ : constante de la tabla 9 que depende  $w$

$N$ : es el número de tanques en serie

$n$ : número de revoluciones por minuto

$n$ : coeficiente de rugosidad

$N$ : Numero de filtro

$n$ : velocidad de rotación

$N$ : número de orificios

$N_f$ : número de Froude:

$\Theta$ : Angulo de inclinación de las placas

$P_e$ : peso del trazador por añadir al reactor, Kg

$P_o$ : potencia teórica:



Po: porosidad

q: carga lineal del vertedero ( $m^3/h$ )

q: carga superficial ( $m^3/m^2/día$ )

Q: caudal ( $m^3/s$ , L/s)

q: Caudal específico en la garganta de la canaleta ( $m^3/s/m$ )

r: distancia de cada paleta al eje de giro

RAS 2000: reglamento técnico del sector potable y saneamiento básico

$R_h$ : radio hidráulico (m)

S: sumergencia

T: Tiempo de mezcla en el resalto (s):

T<sub>10</sub>: tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador

T<sub>90</sub>: tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador

T<sub>c</sub>: tiempo en que la concentración es mayor que la mitad de la concentración máxima

T<sub>f</sub>: tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador en el reactor

T<sub>i</sub>: tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente

T<sub>m</sub>: tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total de trazador

T<sub>o</sub>: tiempo de retención (min)

T<sub>o</sub>: tiempo teórico de retención

T<sub>p</sub>: tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración

t<sub>p</sub>: velocidad de filtración (m)

t<sub>p</sub>: tasa de filtración ( $m^3/m^2$  día)

V: volumen  $m^3$ ,  $cm^3$

v: velocidad de filtración (m/s)



V: velocidad (m/s)

v1: Velocidad antes del resalto (m/s):

V1: Volumen perdido en la zona de sedimentación (m<sup>3</sup>)

v2: velocidad en el resalto

v3: velocidad en la sección de salida de la canaleta (m/s)

Vo: velocidad a través de las placa (m/s)

Vo: velocidad de aproximación (m/h)

W: ancho de la garganta Parshall (m)



## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arboleda, V. (1969). Manual De Tratamiento De Aguas Potables. Caracas.
- Castany, G., & Margat, J. (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie.
- CEPIS. (2004a). Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría TOMO I Vol. 1. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsatrfulltext/tratamiento/manuall/tomol/filtrarap1.html>
- CEPIS. (2004b). Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría TOMO II.
- Guyonvarch, E., Ramin, E., Kulahci, M., & Plósz, B. G. (2015). iCFD: Interpreted Computational Fluid Dynamics – Degeneration of CFD to one-dimensional advection-dispersion models using statistical experimental design – The secondary clarifier. *Water Research*, 83, 396-411. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.012>
- Hidrosan, & Ltda. (2010). Consultoria de estudios y diseños para la optimización y rehabilitación de los componentes del sistema de producción de agua potable del acueducto de Armenia.
- ICONTEC. (2001). Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras. Norma Técnica Colombiana. Gestión Ambiental. Agua. Bogotá, 2001. p. 9-10.
- JOANY SÁNCHEZ MOLINA, S. C. G. (2009). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN REACTOR AEROBIO Y UN REACTOR ANAEROBIO, EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE PEQUEÑA ESCALA. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 65-79.
- Keinath, T., Ryckman, M., Dana, C., & D, H. (1977). Activated Sludge- Unified Design and Operation. *Journal of Environmental Engineering*, 103, 829-849.
- Krebs, P. (1995). Success and Shortcomings of Clarifier Modeling. *Water Science Technology*, 31.
- Levenspiel, O. (1998). *Chemical reaction engineering*: Wiley.
- Molina, J. S. (2010). Modelamiento de las condiciones hidraulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domesticas. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellin, repositorioun:2010. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2006/1/8646493.2010.pdf>
- Patiño, P., Cruz, C., Torres, P., & Laín, S. (2012). Hydrodynamic evaluation of a hydraulic clarifier through. *Ingeniería e Investigación*, 32, 77-82.
- Pérez Carrión, J. M. (2004). El agua. Calidad y tratamiento para consumo humano. Manual I, Serie Filtración Rápida. Programa Regional HPE/CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Lima.



- Pérez, J., Rincón, N., & Bracho, N. (2011). Evaluación de la adsorción de rodamina WT, litio y cloruro en reactores por carga inoculados con lodo anaerobio. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 74-84.
- Pineda, G. K. M., & Rincon, L. S. B. (2003). Evaluación de la planta de potabilización de agua empresas públicas de Armenia - Quindío. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, repositorioun: 1079.
- RAS. (2000). Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000. In R. 2000 (Ed.). Retrieved from [http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/5\\_Sistemas\\_de\\_potabilizacion.pdf](http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/5_Sistemas_de_potabilizacion.pdf).
- Romero Justina, A. E. (2008). Evaluación de la calidad del agua potable en cuatro plantas potabilizadoras. Managua.
- Sánchez, A. O. (2015). EVALUACIÓN DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA CON UN MODELO DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (DFC). Universidad Autónoma de México. Retrieved from <http://hdl.handle.net/123456789/1568>
- Valencia, J. A., & A.R.Soto. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua: McGraw Hill.
- Vargas L., P. C. (2004). El agua. Calidad y tratamiento para consumo humano. Manual III, Serie Filtración Rápida. Programa Regional HPE/CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Lima.
- Water Environment, F., Water Pollution Control, F., American Water Works, A., & American Public Health, A. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater. v.



## 9. ANEXOS

### a. Planos de cada proceso de la planta

