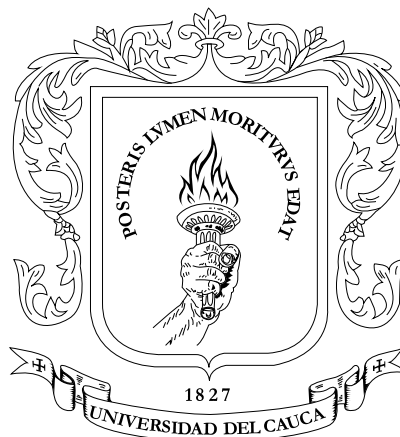


**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA MEZCLA RÁPIDA HIDRÁULICA EN
VERTEDORES FRONTALES A PARTIR DE PRUEBA DE JARRAS**



**DAYANA MILENA FIGUEROA MARTÍNEZ
JOHAN DAVID RAMÍREZ GUZMÁN**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTA DE INGENIERIA CIVIL
INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYÁN
2014**

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA MEZCLA RÁPIDA HIDRÁULICA EN
VERTEDORES FRONTALES A PARTIR DE PRUEBA DE JARRAS**

**DAYANA MILENA FIGUEROA MARTÍNEZ
JOHAN DAVID RAMÍREZ GUZMÁN**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL.**

**Director:
Msc. Javier Ernesto Fernández Mera**

**Codirector:
Ing. Mauricio Ramírez**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTA DE INGENIERIA CIVIL
INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYÁN
2014**

NOTA DE ACEPTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.

Jurado evaluador:

Msc. Alfonso Napoleón Zambrano.

Msc. John Calderón Ramírez.

Director:

Msc. Javier Fernández Mera.

Popayán, Agosto de 2014.

AGRADECIMIENTOS.

A DIOS creador del cosmos porque gracias a él todo es posible, a nuestras familias que son el pilar más importante en nuestras vidas, amigos y compañeros por el apoyo incondicional que nos brindaron en el transcurso de la carrera, a la empresa de acueducto y alcantarillado de Popayán por permitirnos realizar el trabajo de investigación en sus instalaciones, a las directivas, operarios y personal encargado de cada etapa en la PTAP El Tablazo, a nuestro director Msc. Javier Fernández Mera por el apoyo y colaboración, a nuestro Jurado Msc. Alfonso Napoleón y Msc. John Calderón por el interés en evaluar y corregir la presente investigación.

Muchas gracias a todas las personas que de alguna manera incentivaron nuestro aprendizaje.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. JUSTIFICACIÓN.....	12
3. OBJETIVOS.....	14
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1. COAGULACIÓN.....	15
4.2. MEZCLA RÁPIDA.....	15
4.2.1. Mezcladores hidráulicos por resalto hidráulico.....	16
4.2.2. Gradiente de velocidad.....	16
4.3. VALORACIÓN DE EFICIENCIA DE LA MEZCLA RÁPIDA (TECNOLOGÍA CEPIS).....	17
4.3.1. Geometría de la unidad y punto de aplicación de las sustancias químicas.....	17
4.3.2. Tiempo real de retención.....	18
4.3.3. Intensidad de la mezcla.....	18
4.3.4. Condiciones hidráulicas en interconexiones.....	18
4.4. PRUEBA DE JARRAS.....	18
4.5. ENSAYOS CON TRAZADORES.....	19
4.5.1. Sustancias trazadoras.....	19
4.5.2. Dosificación de sustancias trazadoras.....	19
4.6. MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCRIBIR Y ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO REAL DE UN REACTOR.....	20
4.6.1. Modelo Simplificado de Wolf y Resnick.....	20
4.6.2. Análisis de la Curva Concentración vs Tiempo.....	20
4.7. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA A PARTIR DE USO DE PRUEBA DE JARRAS.....	22
5. METODOLOGÍA.....	23
5.1. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS.....	23
5.2. DESARROLLO METODOLÓGICO.....	24
6. RESULTADOS Y ANALISIS.....	27
6.1. PARÁMETROS ÓPTIMOS.....	27

6.1.2.Determinación del gradiente teórico de floculación en la planta de tratamiento “El Tablazo”	27
6.1.3. Parámetros de trabajo obtenidos por medio de pruebas de jarras.	28
6.2. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA.....	30
6.2.1. Comportamiento de pH por muestra.	30
6.2.2.Comportamiento de color por muestra.	31
6.2.3.Comportamiento de turbiedad por muestra.	33
7. AJUSTES METODOLÓGICOS.	35
8. CONCLUSIONES.	37
9. RECOMENDACIONES.....	38
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las unidades de mezcla rápida.	16
Tabla 2. Resumen Estadístico para pH.....	300
Tabla 3. Sesgo y curtosis estandarizado para pH.....	311
Tabla 4 .Prueba de Kruskal-Wallis para pH.	311
Tabla 5. Resumen estadístico para color.....	322
Tabla 6 .Sesgo y curtosis estandarizada para color.	322
Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para color.	333
Tabla 8. Resumen estadístico para turbiedad.....	333
Tabla 9. Sesgo y curtosis estandarizada para turbiedad.	344
Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad.....	344

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Concentración del trazador en el efluente de un reactor.....	211
Figura 2. Estructura de muestreo.....	25
Figura 3. Tiempo y gradiente de floculación.	29
Figura 4. Curva de verificación de la eficiencia de sedimentación.	29
Figura 5. Gráfico de caja y bigotes para pH.....	31
Figura 6. Gráfico de Caja y bigotes para color.....	32
Figura 7. Gráfico caja y bigotes para turbiedad.	33
Figura 8. Vista frontal y en planta de la estructura para muestreo.	35
Figura 9. Montaje mangueras.....	36

INTRODUCCIÓN.

El tratamiento de agua para consumo humano ha sido uno de los principales retos enfrentados a través de la historia para mejorar la calidad de vida, por esta razón es necesario su almacenamiento, calidad y distribución. En la actualidad este es un tema que ha adquirido gran importancia en la comunidad científica en la cual se han creado e implementado diferentes tipos de técnicas y tratamientos físicos, químicos y biológicos que tienen en cuenta las características del agua cruda con el fin de disminuir el porcentaje de enfermedades transmitidas por este medio (ROMERO, 2000). A menudo estas técnicas y tratamientos funcionan inadecuadamente por lo cual requieren actividades de mantenimiento y operación o necesitan ser optimizadas con el objetivo de ampliar la capacidad del sistema de tratamiento de agua potable; de aquí la importancia de evaluar las unidades que componen estos sistemas, verificando su funcionamiento real.

Uno de los procesos fisicoquímicos de tratamiento de agua es la coagulación, para que el coagulante se disperse uniformemente por todo el cuerpo de agua a tratar, se emplean unidades de mezcla rápida. Se debe tener en cuenta que si no hay coagulación óptima, disminuirá la eficiencia en los procesos consecutivos de tratamiento. En este sentido, el Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) propone una metodología para evaluar la mezcla rápida teniendo en cuenta principalmente parámetros hidráulicos y el uso de trazadores; sin embargo, los bajos tiempos de mezcla que presentan los dispositivos hidráulicos hacen de esta alternativa una opción poco utilizada y de baja confiabilidad. A diferencia de la metodología presentada por CEPIS, el uso de prueba de jarras para evaluar la mezcla rápida permite analizar la dispersión y homogenización del coagulante en el cuerpo de agua, lo cual indicará si el funcionamiento de esta unidad es adecuado.

El presente trabajo se enfoca en crear una propuesta metodológica para evaluar la mezcla rápida hidráulica generada por un vertedor frontal en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) utilizando prueba de jarras. La propuesta metodológica contempla la ejecución de muestreos de agua puntuales y simultáneos tomados justo a la salida de la etapa de mezcla rápida. La aplicación metodológica fue evaluada en la PTAP "El Tablazo" de la ciudad de Popayán. Los resultados obtenidos en la mezcla rápida de esta planta, según la metodología evaluada, demuestran una distribución homogénea del coagulante.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El agua es un elemento esencial, pues está viene siendo la base de la vida, aprovechada tanto en procesos metabólicos como su uso en diferentes actividades; cuando es destinada para consumo humano es necesario analizar y controlar tanto parámetros fisicoquímicos como microbiológicos con el fin de obtener agua potable de óptima calidad (CRUZ; PATIÑO; TORRES, 2009).

El estado de salud humana depende en un alto grado de la calidad de agua que se consume, según la organización mundial de la salud (OMS) las enfermedades relacionadas con el agua son de origen microbiológico y químico. Entre estas enfermedades se encuentra el dengue, diarrea, fluorosis, cólera, anemia, tiña, arsenicosis entre otras (OMS, 2013). La diarrea es una de las enfermedades que más afecta a la población por la falta de condiciones de saneamiento básico. La OMS estima que el 94 % de los casos de diarrea podrían evitarse a través de modificaciones del medio, como son las intervenciones para aumentar la disponibilidad de agua salubre y mejorar el saneamiento y la higiene (OMS, 2007).

En cuanto a la calidad de agua suministrada a nivel mundial, se ha cumplido la meta 7c de los Objetivos de Desarrollo de Milenio contemplados en el programa conjunto OMS/UNICEF de monitoreo del abastecimiento de agua y del saneamiento. En esta meta se propuso reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento; sin embargo, aún hay más de 780 millones de personas que carecen de acceso a fuentes mejoradas de agua potable y 2500 millones carecen de instalaciones de saneamiento mejoradas (UNICEF; OMS, 2012).

De acuerdo con la constitución política de Colombia uno de los principales fines del estado es la solución de las necesidades básicas insatisfechas, entre las que está el acceso al servicio de agua potable. Según la encuesta nacional de calidad de vida realizada por el DANE, la cobertura de acueducto tuvo en el total del país un leve aumento. En el año 2012, la cobertura de este servicio fue de 87,4% en los hogares colombianos, siendo 0,1 puntos porcentuales mayor al 2011, en las cabeceras, en 2012 registró un 97,0% de acceso a este servicio, representando 1,0 punto porcentual más de lo registrado en 2011. Por el contrario, la cobertura en el resto tuvo una disminución de 3,0 puntos porcentuales, al pasar de 56,3% en 2011 a 53,3% en 2012 (DANE, 2013).

A pesar de que la cobertura de acueducto a nivel nacional haya incrementado, esto no significa que el agua suministrada sea de buena calidad. Aproximadamente en el 50% de las plantas de Colombia se realiza un tratamiento adecuado y en el resto no, en zonas rurales solo el 9% de la población tiene

acceso a agua potable (OLAYA, 2009). El nivel de riesgo establecido según la clasificación del IRCA en Colombia en función del suministro de agua en conjunto entre los años 2007 a 2011, muestra los porcentajes según el nivel de riesgo del agua distribuida para consumo humano a partir de 187.211 muestras tomadas: el 57,99% no representó riesgo, el 10,66 % riesgo medio, el 1,46% mostró un riesgo bajo, el 21,94% se encontró en un nivel de riesgo alto y el 7,95% fue inviable sanitariamente (SIVICAP, 2012).

El hecho que en Colombia una gran cantidad de personas consuman agua entre los niveles de riesgo medio, alto e inviablemente sanitario; es una señal para prevenir riesgos, controlar, mejorar y vigilar la calidad de agua por medio de actividades que permitan proporcionar agua potable en diferentes zonas del país (SIVICAP, 2012).

2. JUSTIFICACIÓN.

Contar con un abastecimiento de agua de buena calidad (Potable), se debe a muchos factores los cuales deben interactuar conjuntamente. Entre estos factores se presenta: un eficiente sistema administrativo que responda oportunamente a las necesidades del sistema, un sistema de tratamiento seleccionado y operado de forma adecuada, operadores con la capacitación para el desarrollo de sus actividades, usuarios conformes con el servicio, dispuestos y con capacidad de pagar las tarifas requeridas para el buen funcionamiento del sistema, entre otras (OLAYA, 2009).

El funcionamiento eficiente de los sistemas de tratamiento de agua depende a su vez de muchos factores como el contar con unidades bien diseñadas, construidas de forma adecuada, actividades de operación y mantenimiento realizadas acorde con los riesgos y procesos del sistema, equipos de laboratorio y dosificación que permitan las labores de operación, unidades de tratamiento que puedan ser operadas a los caudales que requieren los usuarios, los cuales en su mayoría deben ser evaluados ya sea para mejorar la calidad del agua suministrada o para desarrollar proyectos de optimización de los procesos con el fin de ampliar la capacidad del sistema.

La supervisión de los sistemas de tratamiento involucran la evaluación hidráulica de los procesos con el uso de trazadores y determinación de gradientes, el desarrollo de pruebas de jarras para determinación de dosis, mediciones de la calidad del agua, comportamiento de la duración de carrera en los filtros. Actualmente hay pocas técnicas para evaluar la mezcla rápida, por ejemplo una de las más recomendadas es la que propone CEPIS en el manual III de Evaluación de plantas de tecnología apropiada, esta tecnología es también recomendada para evaluar las PTAP de filtrado rápido en la zona rural colombiana (CABALLERO, 2011). Esta metodología es completa, pero en la evaluación de la mezcla rápida, el uso de métodos hidráulicos o trazadores, dificulta determinar el tiempo de retención hidráulico, dado que la mezcla rápida se da en tiempos relativamente bajos (1-2 s) .

En general la mayoría de las (PTAP) en Colombia usan procesos de coagulación – floculación (SENA, 2007), siendo este un proceso eficiente, claro está, bajo condiciones adecuadas tanto de mantenimiento como su buen manejo. En la mezcla rápida se efectúa la primera fase de coagulación química, la coagulación es el proceso más importante en una planta de filtración rápida; de ella depende la eficiencia de todo el sistema. No importa que los demás procesos sean muy eficientes; si la coagulación es defectuosa, la eficiencia final del sistema es baja

(BVSA, 2004). La mezcla rápida se puede efectuar por medio de sistemas hidráulicos o mecánicos; en Colombia la mayoría son de tipo hidráulico.

Entre los mezcladores hidráulicos se pueden citar por su simplicidad y eficiencia, los siguientes: Canales con cambio de pendiente o rampas, canaleta Parshall, vertederos rectangulares, vertederos triangulares, difusores e inyectores. En los tres primeros mezcladores la turbulencia que ocasiona la mezcla es producida por la generación de un resalto hidráulico que causa un gradiente de velocidad de alrededor de 1.000 s^{-1} . Estas unidades tienen la ventaja de que, además, involucran la medición del caudal de ingreso a la planta (BVSA, 2004).

Es importante tener en cuenta que si no hay un adecuado funcionamiento en la unidad de mezcla rápida, los tratamientos posteriores a este, estarán comprometidos de forma directa minimizando la eficiencia de la PTAP, por lo tanto es necesario desarrollar metodologías que permitan su evaluación y faciliten su optimización.

3. OBJETIVOS.

3.1. OBJETIVO GENERAL.

- Evaluar una metodología propuesta por el grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca para la evaluación del proceso de mezcla rápida hidráulica.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar una metodología propuesta para determinar la homogeneidad a escala real de una mezcla rápida hidráulica con vertedor frontal.
- Generar ajustes a la metodología propuesta de mezcla rápida hidráulica.

4. MARCO TEÓRICO.

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y del mundo en el que vivimos. Tiene una gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en la naturaleza. Esta influencia no solo se debe a sus propiedades fisicoquímicas como molécula bipolar sino también a los constituyentes orgánico e inorgánicos que se encuentran en ella (CEPIS/OPS, 2004).

4.1. COAGULACIÓN.

Las aguas naturales o residuales contienen sustancias disueltas que pueden ser orgánicas e inorgánicas, algunas son muy pequeñas y es difícil eliminarlas por sedimentación, estas partículas pequeñas tienen carga eléctrica superficial que suelen ser generalmente negativas, estas partículas se repelen entre ellas impidiendo aglomerarse y formar partículas con mayor peso que sedimenten. Para neutralizar esta carga eléctrica es necesario adicionar un electrólito y eliminar las partículas formadas por decantación.

Mediante el proceso de coagulación se neutralizan las cargas del coloide anulando las fuerzas electroestáticas repulsivas. Los coagulantes más usados para neutralizar son a base de sales de aluminio o hierro, de forma que los cationes trivalentes del coagulante equilibren las cargas (ACOSTA, 2006).

La coagulación generalmente se basa en reacciones químicas y físicas entre el coagulante, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua, empieza cuando se adiciona el coagulante y solo dura fracciones de segundo (ARBOLEDA VALENCIA, 2000).

4.2. MEZCLA RÁPIDA.

El objetivo de esta etapa es maximizar la turbulencia logrando una óptima distribución del coagulante, este debe ser dispersado homogéneamente para que el proceso alcance eficiencias altas. A partir de esta mezcla se neutralizan las cargas negativas de los coloides. Para realizar la mezcla rápida se cuentan con unidades mecánicas o hidráulicas, en los mezcladores mecánicos la turbulencia proviene de una fuente externa generalmente un motor eléctrico.

Como parámetro operacional se debe tener en cuenta la agitación de la masa del agua con el fin de esparcir homogéneamente el coagulante, esta agitación se evalúa por medio del gradiente de velocidad y el tiempo durante el cual debe agitarse el agua. Estos parámetros dependen del tipo de coagulación, ya sea por adsorción o por barrido (CEPIS/OPS, 2004).

La eficiencia del proceso de mezcla rápida depende tanto de variables físicas como químicas. Entre las características químicas están la dosis agregada, concentración, el tipo de coagulante y las propiedades del agua; entre las variables físicas está el tiempo e intensidad de la mezcla inducida por la energía disipada por unidades mecánicas o por hidráulicas.

Tabla 1. Clasificación de las unidades de mezcla rápida.

Mecánicas	Retro mezcladores en línea.	
Hidráulicas.	Resalto hidráulico.	<ul style="list-style-type: none"> • Canaleta Parshall. • Canal de fondo inclinado. • Vertedor rectangular.
	En línea.	<ul style="list-style-type: none"> • Difusores (tuberías canales) y • Inyectores • Estáticos
	Caídas.	<ul style="list-style-type: none"> • Orificios • Vertederos triangulares
	Contracciones.	<ul style="list-style-type: none"> • Medidor Venturi • Reducciones • Orificios ahogados
	Velocidad o cambio de flujo.	<ul style="list-style-type: none"> • Línea de bombeo • Codos

Fuente: (CEPIS/OPS 2004).

4.2.1. Mezcladores hidráulicos por resalto hidráulico.

Los mezcladores hidráulicos pueden emplearse cuando se dispone de suficiente cabeza o energía en el flujo de entrada. Los parámetros de diseño básicos son: el tiempo de retención y el gradiente de velocidad.

4.2.2. Gradiente de velocidad.

Según la ecuación de Camp y Stein el gradiente de velocidad en un líquido newtoniano depende de la potencia (p) disipada por unidad de volumen (V) y el coeficiente de viscosidad (μ). La potencia disipada en cualquier dispositivo de

mezcla hidráulica es igual al producto de la pérdida de carga (H) por el caudal (Q), convertida en peso del líquido por unidad de tiempo.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * H}{\mu * T}}$$

Donde:

γ = Peso específico del agua en kg/m³

μ = Coeficiente de viscosidad en kg s/m²

H = Pérdida de carga en m

T = Tiempo de retención en s

4.3. VALORACIÓN DE EFICIENCIA DE LA MEZCLA RÁPIDA (TECNOLOGÍA CEPIS).

Para determinar el comportamiento de las unidades de mezcla rápida, el Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) recomienda en el manual III de Evaluación de plantas de tecnología apropiada, efectuar los siguientes ensayos: Geometría de la unidad; punto de aplicación de las sustancias químicas; determinación del tiempo de mezcla; determinación de la intensidad de la mezcla; condiciones hidráulicas de las obras de interconexión.

A continuación se explica cómo se desarrollan estos ensayos e interpretan los resultados para el caso de la evaluación de la mezcla rápida por resalto hidráulico (CEPIS, 2005).

4.3.1. Geometría de la unidad y punto de aplicación de las sustancias químicas.

Consiste en determinar si la unidad fue correctamente proyectada, observar si el resalto es estable y si el coagulante se distribuye uniformemente por toda la zona de turbulencia, esto puede asegurar una mezcla homogénea e instantánea del coagulante con la masa del agua.

Para modificar condiciones en el agua cruda como baja alcalinidad o un pH fuera del rango óptimo para coagular, se adicionan compuestos químicos como hidróxido de cal. Para distribuir las sustancias químicas en orden correcto en primer lugar se adiciona la cal, segundo el coagulante y por último el polímero.

4.3.2. Tiempo real de retención.

El tiempo real de retención se puede establecer de dos maneras; por medio de ensayo con trazadores u obteniendo el volumen del resalto y el caudal real que está ingresando en ese momento a la planta. La relación de volumen por caudal dará el tiempo de retención de mezcla.

El resultado de este tiempo está relacionado con el tipo de coagulación que se desarrolla; si el mecanismo de coagulación es por adsorción el tiempo de mezcla debe ser inferior a un segundo, si la coagulación es de barrido este tiempo puede variar desde menos de un segundo hasta cerca de 7 segundos.

4.3.3. Intensidad de la mezcla.

Para establecer el gradiente de velocidad de la unidad de mezcla rápida de tipo hidráulico se deben determinar:

- Directamente la pérdida de carga (H).
- El tiempo de retención (T), mediante trazadores o determinando el volumen del resalto (V) y el caudal de operación (Q).
- La temperatura del agua. Con este valor se escoge una relación de $\sqrt{\nu/\mu}$ y se reemplaza este valor en la ecuación de gradiente de velocidad (Ecuación de Camp y Stein).

El rango óptimo de gradiente de velocidad en unidades de mezcla por resalto hidráulico es aproximadamente 1000s^{-1} .

4.3.4. Condiciones hidráulicas en interconexiones.

Para determinar las condiciones hidráulicas entre la interconexión en la red de las unidades de mezcla rápida o los floculadores se debe medir el caudal, los tiempos reales de retención, la pérdida de carga y gradiente de velocidad. Se recomienda que los gradientes de velocidad adecuados en las estructuras de interconexión no excedan 100s^{-1} , valores superiores pueden ser perjudiciales.

4.4. PRUEBA DE JARRAS.

La prueba de jarras es un método usado con el fin de simular procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio para así lograr tener parámetros de diseño adecuados o parámetros para determinar y evaluar condiciones óptimas en una planta de tratamiento de agua potable.

El equipo consta de un agitador múltiple capaz de generar turbulencia en 6 jarras, la velocidad de agitación se obtiene en revoluciones por minuto (RPM). Por medio de esta prueba se pueden obtener parámetros óptimos como dosis óptima de coagulante, pH óptimo, tiempo óptimo y gradiente óptimo de floculación, tiempo óptimo de sedimentación.

Los parámetros químicos e hidráulicos que interfieren en este proceso son: pH, temperatura, concentración del coagulante, secuencia de aplicación de las sustancias químicas, grado de agitación, tiempo de sedimentación (ACOSTA, 2006).

4.5. ENSAYOS CON TRAZADORES.

Los ensayos con trazadores han sido utilizados para cuantificar la distribución de flujos en reactores en paralelo y para evaluar la eficiencia hidráulica de diferentes estructuras de distribución y recolección de agua en las unidades de tratamiento. Ellos permiten estudiar los efectos de modificaciones a estructuras existentes confrontando los efectos de estos cambios en los resultados de las pruebas (Pérez y Galvis, 1990).

Para visualizar el funcionamiento de una unidad desde el punto de vista hidráulico, es conveniente utilizar una sustancia trazadora que pueda inyectarse en la entrada de la unidad y simultáneamente, se comenzará, a registrar la concentración del trazador a la salida (CEPIS, 2005).

4.5.1. Sustancias trazadoras.

El uso de estas sustancias está ligado particularmente en la evaluación de prototipos por su efecto adverso en la calidad de agua, ahora bien, entre las sustancias que han sido utilizadas como trazadoras en el estudio de estructuras de tratamiento se incluyen las siguientes (Pérez y Galvis, 1990):

- Colorantes como fluoresceína, rodamina, rodamina WT.
- Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros, nitratos de litio o de sodio.
- Ácidos como clorhídrico y benzoico.
- Isótopos radiactivos.

4.5.2. Dosificación de sustancias trazadoras.

La inclusión de sustancias trazadoras en PTAP es válida para el análisis de periodos de residencia y características hidráulicas, estas se usan dosificando de manera continua o instantánea.

4.5.2.1. *Dosificación Instantánea.*

En este tipo de dosificación, se agrega el total del trazador en una sola dosis en el afluente del reactor y en un punto que garantice buena mezcla. Ante las limitaciones prácticas de dosificar de manera instantánea se recomienda que esto se haga en tiempos tan cortos como sea posible ojalá inferiores a $T_0/30$, donde T_0 corresponde al tiempo teórico de retención (Pérez y Galvis, 1990).

4.5.2.2. *Dosificación Continua.*

En la dosis continua la aplicación del trazador es iniciada de manera abrupta y se mantiene constante durante unas dos o tres veces el valor del T_0 , después de lo cual se suspende también de manera abrupta (Pérez y Galvis, 1990).

4.6. MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCRIBIR Y ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO REAL DE UN REACTOR.

Es posible utilizar diversos criterios, modelos y procedimientos para el estudio de las características de flujos no ideales. Entre los modelos matemáticos más conocidos se encuentra el método de Wolf y Resnick, el modelo de reactores en serie completamente mezclados (Pérez y Galvis, 1990) y el modelo de dispersión axial (Levenspiel y Octave, 2004).

A pesar de que existen estos modelos, su utilización es complicada, para evaluar la mezcla rápida ya que los tiempos de retención son relativamente cortos, necesitando así, equipos de respuesta inmediata.

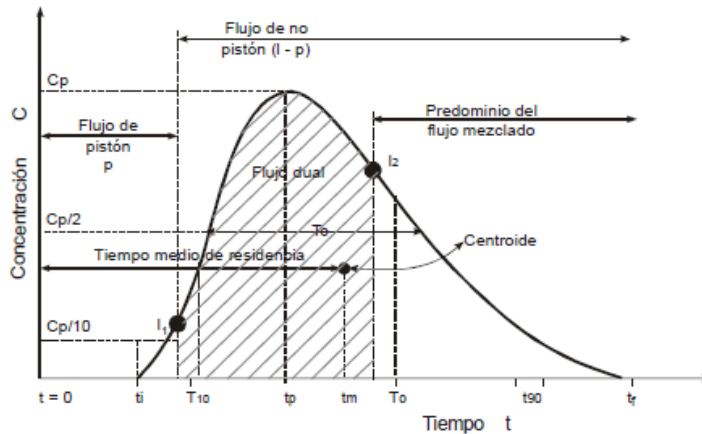
4.6.1. Modelo Simplificado de Wolf y Resnick.

Este modelo matemático permite incluir las siguientes características hidráulicas: Flujo mezclado, flujo a pistón, espacio muerto. No incluye de manera explícita la evaluación de cortocircuitos y supone que la preparación y ejecución del ensayo se ha realizado de tal manera que no hay errores en la estimación del caudal o del volumen del reactor para el cálculo de T_0 , ni retrasos en los tiempos de respuesta en el desarrollo de la práctica (Pérez y Galvis, 1990).

4.6.2. Análisis de la Curva Concentración vs Tiempo.

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumentan con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, lo que origina una curva tal como se indica en la figura 1.

Figura 1. Concentración del trazador en el efluente de un reactor.



Fuente: CEPIS, 2005

Existen los siguientes parámetros principales:

- t_i : tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
- t_{10} : tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador.
- t_p : tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.
- t_m : tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.
- t_0 : tiempo medio de retención ó tiempo teórico de retención = V/Q .
- t_{90} : tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.
- t_r : tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.
- C_0 : concentración inicial.
- C_p : concentración máxima a la salida.

Se pueden utilizar los siguientes criterios:

- Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo de pistón y a 0 para el flujo mezclado.
Si el valor de la relación t_i/t_0 es ($< 0,3$), puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito hidráulico).
- Si la relación t_m/t_0 es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de t_m , haciendo $t_m > t_0$.
- t_p/t_0 , indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo de pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado.

Cuando la relación t_p/t_0 se aproxima a 1 y $t_i/t_0 > 0,5$, se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado.

4.6.3. Índice de Morril.

Este autor encontró que al acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en porcentajes y dibujados en papel que tenga escala de probabilidades en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtenía aproximadamente una línea recta.

El segmento comprendido entre el 10% y el 90% es el más regular y por eso Morril sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión. Así:

$$\text{índice de Morril} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}}$$

4.7. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA A PARTIR DE USO DE PRUEBA DE JARRAS.

En la metodología planteada en la presente investigación, para evaluar la mezcla rápida a escala real; en primer lugar se debe establecer una ubicación en la PTAP para tomar los muestreos, una vez definida la ubicación se define el número de muestreos, distancia y profundidad de estos. Luego, se construye una estructura, que por medio de sifón hidráulico, permita tomar las muestras de agua coagulada. Por otro lado, se deben definir unos parámetros de trabajo con el fin de obtener variables de floculación y sedimentación que sirven para realizar las pruebas de jarras bajo condiciones similares.

Para evaluar la dispersión y homogeneización en la mezcla rápida se toman varias muestras puntuales de agua coagulada proveniente de la estructura de muestreo. Estas muestras son sometidas a ensayos de jarras, después del proceso de sedimentación y floculación se miden parámetros como turbiedad, color y pH. Finalmente se comparan estos parámetros por medio de pruebas estadísticas, si la mezcla rápida está funcionando adecuadamente, se esperaría que los resultados sean similares.

5. METODOLOGÍA.

5.1. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS.

En lo que respecta a la evaluación de la mezcla rápida, el grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental propuso analizar variables a escala real con el fin de adquirir resultados confiables. Dichas variables son la dispersión del coagulante y homogeneización de la mezcla rápida.

La presente investigación se desarrolló en la PTAP “El Tablazo”, la cual se encuentra ubicada en el sector nororiental del perímetro urbano y es encargada de potabilizar la mayor parte del agua que consume la ciudad de Popayán. Durante la implementación fueron llevados a cabo varios experimentos basados en pruebas de jarras que permitieron obtener resultados que posteriormente se analizaron estadísticamente.

El funcionamiento de los procesos de tratamiento en la PTAP “El Tablazo” es principalmente hidráulico. Las fuentes hídricas de abastecimiento son el río Piedras y el río Cauca. Esta planta está conformada por un aireador de cascada tipo escalera de 7 gradas, el agua aireada es conducida mediante un canal hacia un vertedero rectangular de 1,58 m de ancho.

El caudal afluente (aproximadamente de 800 L/s) es monitoreado por medio de un sistema automático en tiempo real, también puede verificarse el caudal mediante la ecuación de patronamiento del vertedero rectangular.

Como coagulante se usa sulfato de aluminio tipo B granulado que se suministra por medio de un equipo de dosificación tipo seco, usualmente se dosifica cuando el agua cruda llega con turbiedad superior a 5 UNT. El coagulante se distribuye por gravedad, hacia una unidad de mezcla rápida, usando un múltiple distribuidor con un promedio de 2,0 L/s. La mezcla rápida se efectúa por resalto hidráulico en un vertedor rectangular frontal.

Después de la mezcla rápida el caudal entrante se distribuye en dos canales hacia 4 floculadores. Cada floculador está dividido en 3 módulos, el flujo es horizontal y controlado por medio de compuertas. El agua floculada pasa a un proceso de sedimentación, donde hay 4 sedimentadores, la primera zona corresponde a una sedimentación convencional, seguida de la sedimentación de alta tasa con placas inclinadas de asbesto cemento.

El agua sedimentada pasa a un proceso de filtración, son 8 filtros rápidos de flujo descendente con lecho filtrante mixto de arena y antracita. La PTAP cuenta con un

sistema de dosificación de cloro gaseoso, dosificación de cal para ajustar el pH y tres tanques de almacenamiento. El agua potable se distribuye por gravedad a la zona baja de la ciudad.

5.2. DESARROLLO METODOLÓGICO.

Una vez conocido el funcionamiento de la PTAP “El Tablazo”, para analizar la dispersión y homogeneidad del coagulante en la mezcla rápida, de forma experimental, se planteó construir una estructura que por medio de sifón hidráulico permita obtener agua coagulada. En este sentido se establecieron los siguientes ítems que facilitaron el desarrollo de la metodología:

- Definir una ubicación para toma de muestras
- Establecer un número de puntos de muestreo
- Establecer una distancia de separación entre los puntos de muestreo
- Definir una profundidad, dentro del canal, de los puntos de muestreo
- Construir una estructura que permita tomar los muestreos
- Definir unos parámetros de trabajo con los cuales se realizan las pruebas de jarras

Teniendo en cuenta los anteriores ítems; para determinar la ubicación de la toma de muestreos, se tuvo en cuenta que no hubieran alteraciones de la distribución del coagulante en el cuerpo de agua debido a la repartición de caudal, por lo tanto, los muestreos fueron tomados a la salida de la mezcla rápida antes que el caudal sea distribuido hacia los floculadores.

En cuanto al número de puntos de muestreo y su distancia de separación, estos se distribuyeron de forma uniforme y un número por medio del cual se pueda comparar la distribución del coagulante. Dado que el canal, en este caso en particular, mide 1,58 m de ancho, se instalaron tres puntos para toma de muestras; el primero fue ubicado en el centro del canal, el segundo y tercer punto fueron ubicados a 0,50 m a la derecha e izquierda del punto central respectivamente.

Para ubicar los puntos a una profundidad dentro canal, se tuvo en cuenta que estos deben ser tomados en puntos fijos que garanticen la toma de muestras cuando el caudal sea bajo (menor a 500 L/s), dado que la profundidad del canal mide 1,68 m, los puntos se dispusieron a una altura respecto a la cota de fondo del canal de 0,30 m.

Con las medidas anteriormente planteadas, se construyó una estructura de muestreo que consta de 3 tubos de hierro galvanizado con diámetro de 3/4 de pulgada y un largo de 1,38 m, codos de PVC, una estructura de soporte de 1,90 m y mangueras de 30 m de longitud con diámetro de 3/8 de pulgada (Figura 2).

Figura 2. Estructura de muestreo.



La estructura se situó a la salida de la mezcla rápida y se comprobó que el flujo de agua fuese continuo por las tres mangueras, esto se realizó por medio de un sifón hidráulico. Luego se constató que el caudal fuera similar en cada manguera, para esto se midió simultáneamente el tiempo en el que se llenaron de agua coagulada 3 jarras de 2 L con cada manguera respectivamente; en el caso de que no hubiera el mismo caudal simplemente se varió la altura a la salida de las mangueras con el fin de obtener la misma carga hidráulica, para así, garantizar que las jarras se llenaran al mismo tiempo.

Por otro lado, para evaluar la mezcla rápida es importante realizar análisis previos que permitan desarrollar la metodología bajo condiciones similares, en este sentido se planteó establecer parámetros de trabajo como tiempo de floculación, gradiente de floculación y tiempo de sedimentación. Se sugirieron tres posibles formas para obtener estos parámetros:

- Trabajar con los parámetros óptimos, con los que se realizan las pruebas de jarras en la planta
- Trabajar con los parámetros reales de la planta
- Realizar pruebas de jarras

Para establecer la mejor opción que permita obtener los parámetros de trabajo en la PTAP “El Tablazo”, se revisaron los parámetros óptimos planteados por la planta para realizar prueba de jarras, se estimó el gradiente de floculación de la planta, también se realizaron pruebas de jarras para obtener los parámetros óptimos de tiempo de floculación, gradiente de floculación y tiempo de sedimentación.

El gradiente de floculación estimado de la planta se obtuvo utilizando la ecuación de gradiente de mezcla para floculadores hidráulicos. Se midió el caudal, la pérdida de carga en los floculadores, la temperatura del agua; además se determinó el volumen de agua en las unidades de floculación. La pérdida de carga

en los floculadores se determinó midiendo la diferencia de niveles entre la entrada y salida en cada floculador utilizando una manguera de 3/8 de pulgada, este procedimiento se realizó en las 4 unidades de floculación.

Para obtener los parámetros de trabajo por medio de pruebas de jarras, se determinó tiempo de floculación, gradiente de floculación y tiempo de sedimentación.

Una vez ubicada la estructura, se procedió a ejecutar las pruebas de jarra utilizando los parámetros de trabajo, con los cuales se obtuvo la información sobre la dispersión y homogeneización del coagulante. Se realizaron 38 pruebas de jarras, por cada prueba se llenaron 3 jarras cuadradas de 2L con agua coagulada proveniente de las mangueras 1,2 y 3 (A, B y C), respectivamente. Los parámetros fisicoquímicos que se midieron fueron pH, turbiedad y color tanto en agua cruda como en agua sedimentada.

Los equipos utilizados fueron:

- Floculador E&Q para realizar pruebas de jarras
- Turbidímetro HACH 2100 Q para determinar la turbiedad
- Espectrofotómetro Spectroquant Nova 60 Merck para medir color
- pH-metro digital HACH HQ40d

Por último, los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente, con el fin de comprobar la homogeneidad de las muestras y por ende chequear el funcionamiento de la mezcla rápida. Para comparar los resultados adquiridos con la metodología planteada, se usó el software estadístico "statgraphics". Se realizó una comparación entre los datos obtenidos por los tres puntos de muestreo correspondientes a las jarras A, B y C tomando como variables dependientes los parámetros fisicoquímicos medidos (pH, Color y Turbiedad).

Por cada variable dependiente se realizaron varias pruebas estadísticas. En primer lugar se calculó el promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, se obtuvieron los valores mínimo, máximo y rango. También se realizaron gráficos de caja y bigotes como una representación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo, como la dispersión y simetría.

Luego se realizaron pruebas estadísticas para analizar si los datos obtenidos provienen de una distribución normal, por lo tanto se obtuvieron medidas de deformación como curtosis estandarizada y sesgo estandarizado. Una vez establecida la distribución de los datos, se realizaron pruebas estadísticas no paramétricas para comparar los datos.

6. RESULTADOS Y ANALISIS.

6.1. PARÁMETROS ÓPTIMOS.

Para obtener los parámetros de trabajo a nivel de prueba de jarras se planteó trabajar con los parámetros de trabajo de la planta, para lo cual se estimó el gradiente y el tiempo teórico de floculación de la PTAP el Tablazo.

6.1.2. Determinación del gradiente teórico de floculación en la planta de tratamiento “El Tablazo”.

La determinación del gradiente teórico de floculación se realizó por medio de la ecuación [1] de gradiente de mezcla usando la siguiente información:

- Caudal promedio de entrada a la planta=676,48 L/s
- Temperatura del agua cruda: 17 °C
- Relación $\sqrt{\nu/\mu}$ para 17 °C= 2998
- Largo de cada floculador = 120 m
- Ancho de cada floculador = 0,63 m
- Altura de la lámina del agua = 3,19 m
- Pérdidas de carga (H) :
 - H Floculador 1 = 0,576 m
 - H Floculador 2 = 0,601m
 - H Floculador 3 = 0,577 m
 - H Floculador 4 =0,567m

Para tener una aproximación del caudal afluente a cada floculador se dividió el caudal principal en 4, con las medidas obtenidas de los floculadores se calculó el volumen, y con la relación volumen-caudal se obtuvo el tiempo de retención hidráulico:

Caudal por cada floculador = 169,12 L/s

Volumen en cada floculador = 241164L

$$T = \frac{V}{Q} = \frac{241164 L}{169,12 L/s} = 1425,99 s$$

Una vez obtenidos los datos se reemplazaron en la ecuación [1] de gradiente de mezcla, los gradientes obtenidos se presentan a continuación:

Floculado 1= 59,78s-1
Floculador 2= 61,55 s-1
Floculador 3= 60,31 s-1
Floculador 4= 59,78 s-1

El gradiente de floculación en los 4 floculadores fue menor que el gradiente máximo recomendado para floculadores (100 s^{-1}), sin embargo al utilizar este gradiente de velocidad en las pruebas de jarras, no hubo una buena remoción de turbiedad y color que permita realizar una comparación entre los puntos de muestreo. Por esta razón se decidió hacer pruebas de jarras y obtener gradiente de floculación, tiempo de floculación y tiempo de sedimentación que sirvan como parámetros base en las pruebas de jarras para la evaluación de la PTAP. Los resultados se muestran a continuación.

6.1.3. Parámetros de trabajo obtenidos por medio de pruebas de jarras.

En la obtención de tiempo y gradiente de floculación se realizaron cuatro pruebas de jarras. Los gradientes con los que se efectuaron las pruebas de jarras fueron 40, 30, 22 y 13 s^{-1} respectivamente. En todas las pruebas realizadas los tiempos de floculación fueron 5,10,13,15, 20, 25 y 30 minutos por cada jarra y con 15 minutos de tiempo de sedimentación, una dosificación de sulfato de aluminio de 22 mg/L, los datos obtenidos se muestran en Anexo A tablas N° I - VI.

Tal como se puede apreciar en la figura 3, la tendencia de las curvas indica que el gradiente y tiempo de floculación más adecuado es 22 s^{-1} y 20 minutos respectivamente.

Con los parámetros obtenidos de floculación de 22 s^{-1} de gradiente en 20 minutos, se realizaron otras pruebas de jarras para obtener el tiempo de sedimentación. Para ello se evaluaron los siguientes tiempos de sedimentación: 1,3,5,8,12,15,18,21,25,30,35 y 40 min. Los resultados obtenidos se muestran en anexos (tabla N° V, VI), en la figura 4 se muestra la curva de sedimentabilidad obtenida a partir de los resultados.

Figura 3. Tiempo y gradiente de floculación.

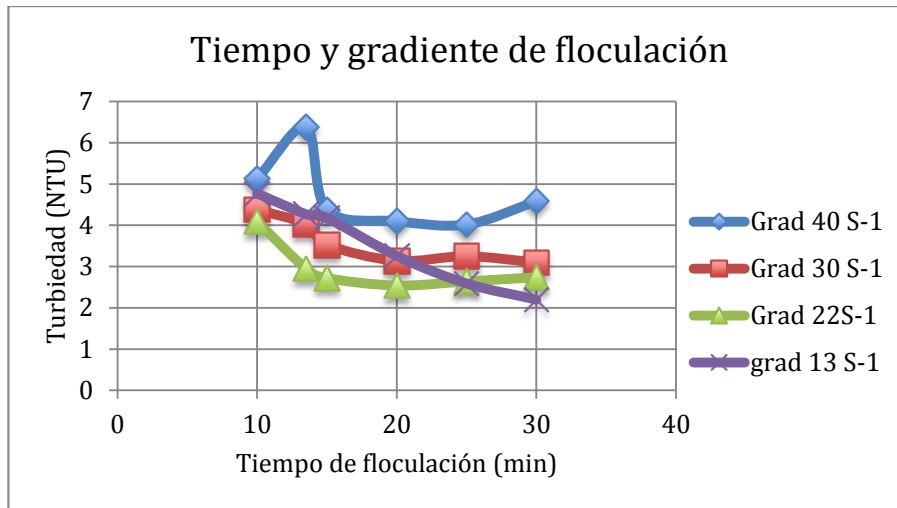
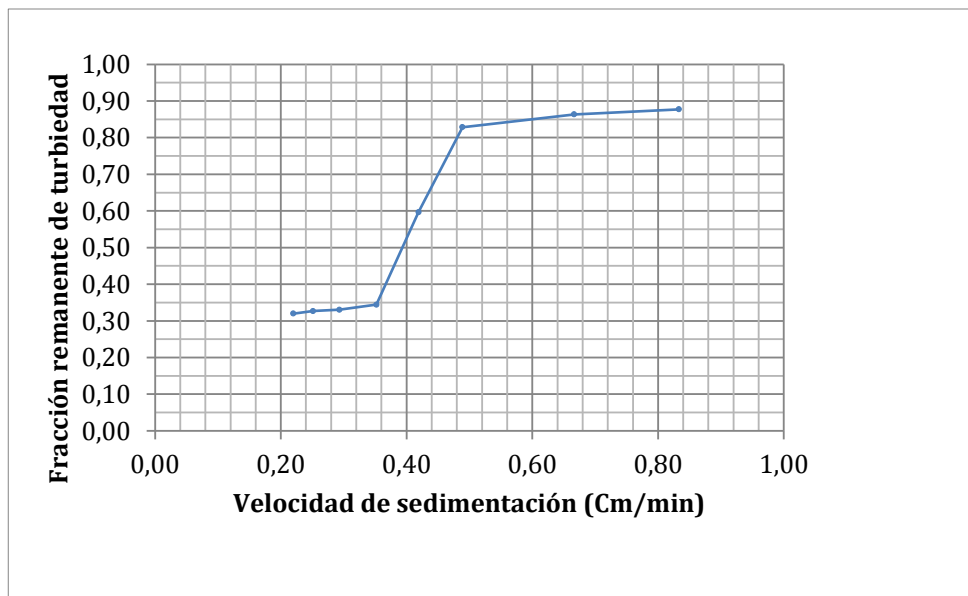


Figura 4. Curva de verificación de la eficiencia de sedimentación.



Para estimar el tiempo de sedimentación requerido en la prueba de jarra, se consideró que la turbiedad mínima al final del proceso de sedimentación fuera de 2 UNT, lo cual se alcanza con una velocidad de sedimentación menor o igual a 0,36 cm/min. Con esta velocidad y considerando que la altura de la toma de muestra en la Jarra es de aproximadamente 9 cm, el tiempo de sedimentación estimado para la prueba de jarra es de 25 min.

6.2. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA.

Una vez establecidos los parámetros de trabajo de tiempo de floculación 20 minutos, gradiente de floculación 22 s^{-1} y tiempo de sedimentación 25 minutos, se realizaron 38 pruebas de jarras para evaluar la mezcla rápida, los datos obtenidos se presentan en el anexo A tabla N° VII.

Los datos se analizaron con base en el paquete estadístico de StatGraphics. Inicialmente se verificó la normalidad de los datos, encontrando que en ningún caso se presentó normalidad. Para analizar el comportamiento, se realizó una comparación de un factor con tres niveles, el factor son las muestras obtenidas en los tres puntos de muestreo (niveles A, B Y C), se tomaron como variables independientes las variables medidas de pH, color y turbiedad.

Dado que los datos obtenidos tanto de pH, color y turbiedad no siguen una distribución normal, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para comparar las medianas. La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de la variable dependiente dentro de cada uno de los 3 niveles de muestra son iguales.

6.2.1. Comportamiento de pH por muestra.

Variable dependiente: pH
Número de observaciones: 114

Factor: Muestra
Número de niveles: 3

En la tabla 2 se presenta un resumen estadístico con los valores de pH en los diferentes niveles de muestra (A, B y C), también se presenta un gráfico de caja y bigotes el cual indica que las medianas y la distribución de los datos son similares en los tres niveles (Figura 5).

El sesgo estandarizado para el nivel A se encuentra fuera del rango de -2 a +2 (Tabla 3). Esto indica no normalidad significativa en los datos, lo cual viola el supuesto de que los datos provienen de distribuciones normales. Por esta razón se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis que compara las medianas.

Tabla 2. Resumen Estadístico para pH.

Muestra	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mín.	Máx.	Rango
A	38	6,38763	0,171108	2,67874%	6,11	6,88	0,77
B	38	6,37132	0,162034	2,54318%	6,04	6,75	0,71
C	38	6,39632	0,173071	2,70579%	6,07	6,8	0,73

Figura 5. Gráfico de caja y bigotes para pH.

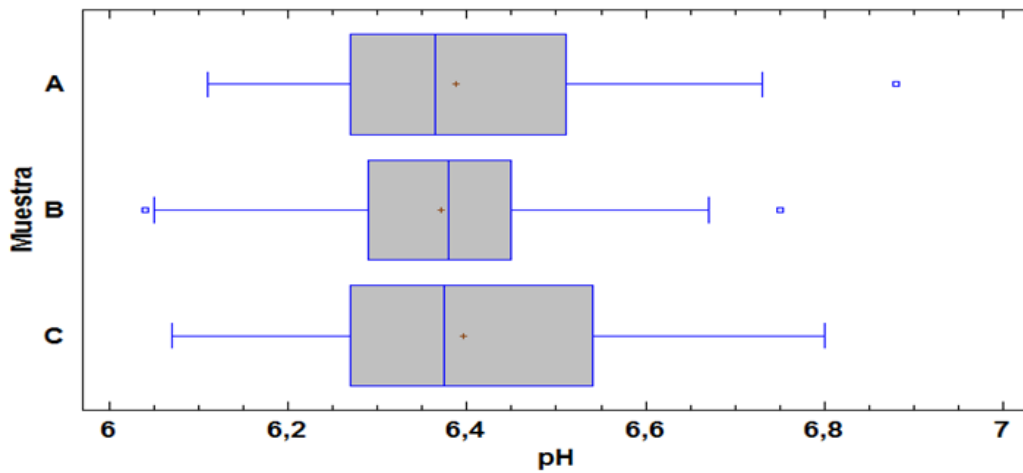


Tabla 3. Sesgo y curtosis estandarizado para pH.

Muestra	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
A	2,05315	0,797989
B	0,03126	0,127113
C	1,41623	0,161173

En la tabla 4, El valor-P obtenido, mediante la prueba de Kruskal-Wallis, es 0,944 al ser mayor que 0,05, por lo tanto no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4 .Prueba de Kruskal-Wallis para pH.

Muestra	Tamaño muestra	Rango promedio	Estadístico	Valor-P
A	38	56,7895	0,113446	0,944856
B	38	56,7368		
C	38	58,9737		

6.2.2. Comportamiento de color por muestra.

Variable dependiente: Color
Número de observaciones: 114

Factor: Muestra
Número de niveles: 3

Al igual que en el desarrollo estadístico de pH, se compararon los datos de color, en la tabla 5 se presenta un resumen estadístico, además se presenta un gráfico de caja y bigotes para los datos obtenidos de color que indica que las medianas en los tres niveles son similares, pero la distribución de los datos difiere en cada nivel (Figura 6).

Por otro lado en la prueba de normalización de datos (Tabla 6), tanto el sesgo estandarizado como la curtosis estandarizada se encuentran fuera del rango de -2 a +2 para los 3 niveles de Muestra, indicando que no hay normalidad significativa en los datos. Por lo tanto se procede a realizar la prueba de Kruskal-Wallis.

Tabla 5. Resumen estadístico para color.

Muestra	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mín.	Máx.	Rango
A	38	15,4368	4,41597	28,6067%	9,7	27,5	17,8
B	38	14,5474	3,95548	27,1903%	10,1	27,0	16,9
C	38	14,9395	5,21865	34,9320%	10,2	29,2	19,0

Figura 6. Gráfico de Caja y bigotes para color.

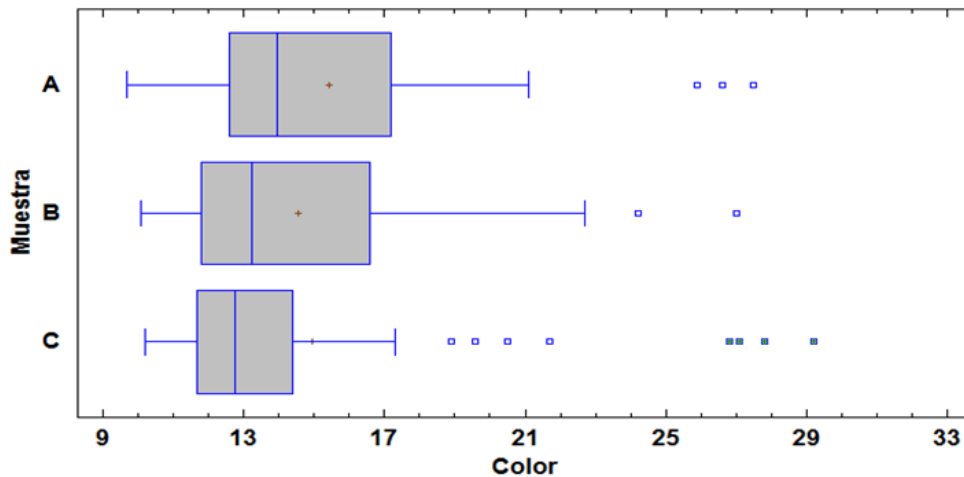


Tabla 6 .Sesgo y curtosis estandarizada para color.

Muestra	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
A	3,50249	1,6994
B	3,97896	2,7403
C	4,22387	2,2099

En la prueba de Kruskal Wallis dado que el valor-P (0,288) es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza (Tabla 7).

Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para color.

Muestra	Rango Promedio	Estadístico	Valor-P
A	64,3421	2,48599	0,288519
B	54,8553		
C	53,3026		

6.2.3. Comportamiento de turbiedad por muestra.

Variable dependiente: Turbiedad
 Número de observaciones: 114

Factor: Muestra
 Número de niveles: 3

En la tabla 8 se presenta un resumen estadístico, además un gráfico de caja y bigotes para los datos obtenidos de turbiedad (Figura 7), el cual indica que tanto la dispersión de los datos y las medianas son semejantes. La tabla 9 muestra diferentes estadísticos de turbiedad para cada uno de los 3 niveles de muestra. Puesto que el sesgo estandarizado y/o la curtosis estandarizada se encuentra fuera del rango de -2 a +2 para los 3 niveles viola el supuesto de normalidad significativa en los datos, se usa la prueba de Kruskal-Wallis.

Tabla 8. Resumen estadístico para turbiedad.

Muestra	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mín.	Máx.	Rango
A	38	3,44132	2,21626	64,4015%	1,34	13,2	11,86
B	38	2,87842	1,54058	53,5216%	1,35	8,35	7,0
C	38	3,23026	2,17863	67,4443%	1,44	9,55	8,11

Figura 7. Gráfico caja y bigotes para turbiedad.

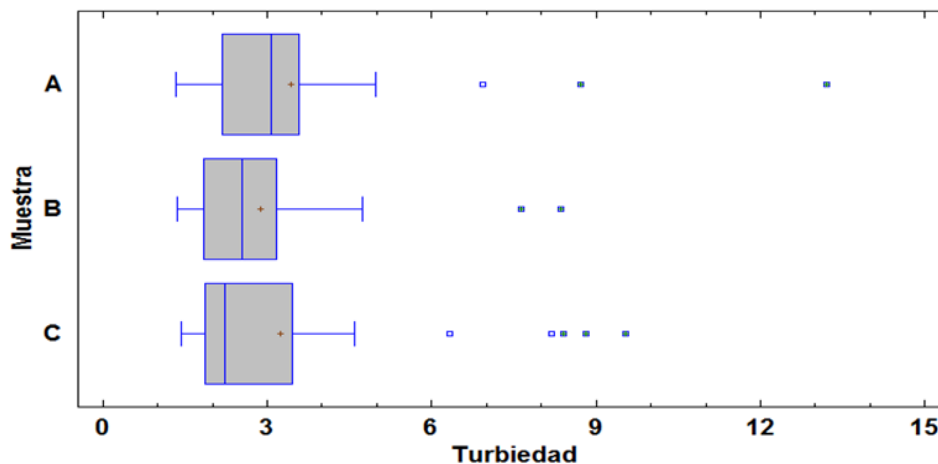


Tabla 9. Sesgo y curtosis estandarizada para turbiedad.

Muestra	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
A	7,07789	12,6819
B	5,27202	6,37615
C	4,62875	3,12931

En la prueba de Kruskal Wallis el valor-P (0,277) es mayor que 0,05, por tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza (tabla 10).

Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para turbiedad.

Muestra	Rango Promedio	Estadístico	Valor-P
A	64,3816	2,56957	0,27671
B	52,8684		
C	55,25		

Con la prueba estadística de Kruskal Wallis, al comparar las medianas no hay una diferencia significativa ($p > 0,05$) esto significa que los valores son iguales en los tres niveles tanto para pH, Color y turbiedad. Se puede deducir que la mezcla rápida en la planta de tratamiento el Tablazo en los tres puntos analizados y en los parámetros medidos es homogénea.

7. AJUSTES METODOLÓGICOS.

Una vez desarrollada la metodología, con base a la experiencia obtenida, se plantearon algunos ajustes que pueden ser aplicados en futuros estudios de evaluación de la mezcla rápida hidráulica:

- Determinar un lugar en el cual se harán los muestreos, teniendo en cuenta las dimensiones del canal. Además, definir el número de puntos de muestreo que dependen del ancho del canal, estos se ubicarán de forma tal que en entre ellos haya una separación uniforme y que tengan una profundidad igual, esta profundidad depende del caudal mínimo en la PTAP

En el caso que la mezcla rápida sea efectuada por vertedor rectangular, con un ancho similar al de la PTAP “El Tablazo” (1,58 m), se debe instalar mínimo 3 puntos de muestreo con una separación entre 0,40-0,60 m. En cuanto a la profundidad de los puntos de muestreo respecto a la cota de fondo del canal, es conveniente usar 0,30 m, ya que según el presente estudio no presentó inconvenientes.

- Diseñar una estructura que permita realizar los muestreos acorde a las dimensiones de la planta. Esta debe ser resistente a las condiciones que será sometida. La estructura debe ser diseñada de tal forma que permita su mantenimiento, por lo cual se debe ubicar un soporte transversal de longitud mayor al ancho del canal con el fin de retirarla (Figura 8). Además esta estructura debe permitir obtener agua coagulada por medio de sifón hidráulico, el montaje de mangueras se presenta en la figura 9.

Figura 8. Vista frontal y en planta de la estructura para muestreo.

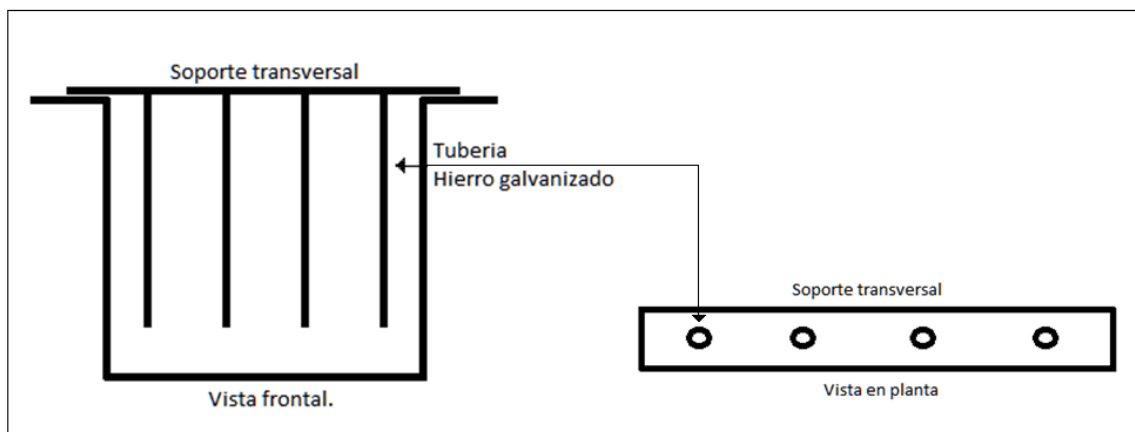
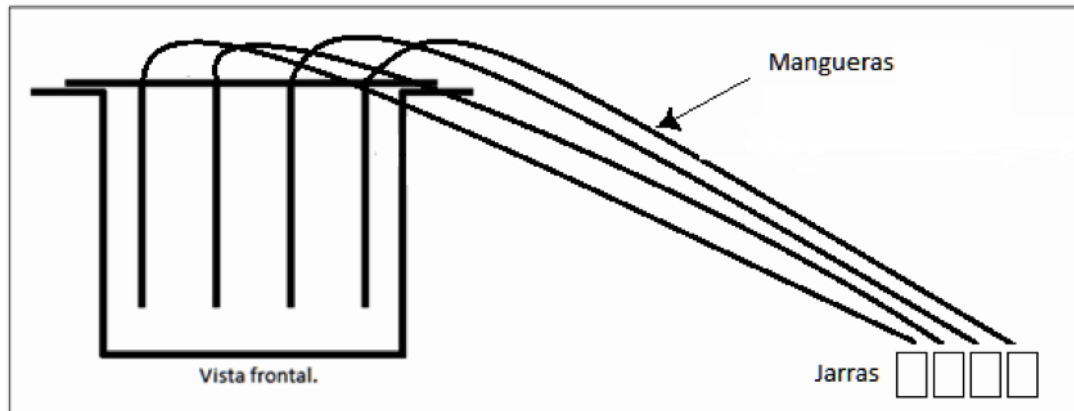


Figura 9. Montaje mangueras.



- A pesar que la metodología funciona adecuadamente con los parámetros de trabajo encontrados, esta debe ser evaluada con base a los parámetros óptimos.
- Los parámetros fisicoquímicos que se han tenido en cuenta en la presente investigación como; pH, turbiedad y color fueron aptos para realizar una comparación entre los puntos de muestreo, sin embargo se deben realizar estudios para establecer si es posible obviar el uso de pruebas de jarras y realizar muestreos puntuales teniendo en cuenta como único parámetro el pH del agua coagulada.

8. CONCLUSIONES.

- La calidad del agua alcanzada al finalizar la modelación de los procesos de floculación y sedimentación en los tres puntos de la mezcla rápida fue la misma en los tres puntos evaluados ($p \geq 0,05$), por consiguiente la mezcla rápida de la planta de tratamiento El Tablazo genera una homogeneidad en la distribución del coagulante.
- La metodología propuesta para la evaluación de la mezcla rápida funciona adecuadamente en la planta de tratamiento “El Tablazo”, sin embargo, se debe realizar el mismo estudio en otra planta para verificar la veracidad de la metodología, con el fin de validarla.

9. RECOMENDACIONES.

- Desarrollar la metodología ajustada en otras PTAP con condiciones de mezcla rápida hidráulica similares y diferentes para validar la teoría planteada.
- Realizar la metodología tomando muestreos puntuales, comparando solamente el pH del agua coagulada.
- Para obtener buenos resultados es importante realizar mantenimiento continuo a los diferentes elementos utilizados durante los muestreos, por ejemplo, las mangueras deben ser lavadas cada 10 periodos de muestreo, para evitar la acumulación de lodo.
- Utilizar mangueras con un diámetro mayor al usado en la presente investigación (3/8), para evitar que estas se tapen e influyan en los muestreos.
- Establecer un número de muestreos mínimo que garantice evaluar la homogeneidad de la mezcla rápida, evitando obtener conclusiones erradas.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. ACOSTA, Yaniris. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XL, núm. 2, 2006, P. 10-17.
2. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de purificación del agua, tratamiento y control de calidad de aguas, 3 Ed. cap. 1, 2000. P. 15.
3. BVSA, Tratamiento de agua para consumo humano. Manual II: Diseño de plantas para tecnología adecuada. 2004. P. 47.
4. CABALLERO, Diego Andrés. Manual para la evaluación y diagnóstico de plantas de tratamiento de filtrado rápido en la zona rural colombiana, Universidad industrial de Santander- 2011.
5. CEPIS, Tratamiento de agua para consumo humano, manual III. Evaluación de plantas de tecnología apropiada, plantas de filtración rápida. 2005 P. 106-117.
6. CEPIS/OPS, Tratamiento de plantas para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual 1: Teoría tomo I. Cap.4, 5,6, 2004.
7. CRUZ, Camilo; PATIÑO, Paola; TORRES Patricia, Índices de la calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano, una revisión crítica, Revista ingenierías universidad de Medellín. 2009.
8. DANE, Encuesta nacional de calidad de vida (en línea). Comunicado de prensa. 2013 P. 2
http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/calidad_vida/cp_ECV_2012.pdf
9. LEVENSPIEL Y OCTAVE. Ingeniería de las Reacciones Químicas. 3ra Edición. Editorial LIMUSA S.A. de C.V. Versión en español Hecho en México. P. 258, 2004.
10. OMS (en línea), agua saneamiento y salud (ASS) 2013.
http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/diseasefact/es/index.html

11. OLAYA, Nadia. Gestión eficiente en la prestación de servicio de agua potable. Barranquilla: Editorial universitaria de la costa, 2009. P. 38, 64-67.
12. OMS, Lucha contra las enfermedades transmitidas por el agua en los hogares. 2007. P. 11.
13. PÉREZ CARRIÓN, José y GALVÍS, Gerardo. Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. P. 1, 1990.
14. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuípurificación. En: Purificación del agua. 2 ed. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. P.15-23.
15. SENA, Caracterización Ocupacional del Sector de agua Potable y Saneamiento Básico en Colombia., Mesa Sectorial de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2007. P. 96.
16. SIVICAP, Estado de la vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano en Colombia. Sistema de información para la vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano. 2012. P. 70.
17. UNICEF, Organización Mundial De La Salud. Progresos en materia de agua potable y saneamiento. Informe de actualización. 2012. P. 2.

ANEXO A.

I.RESULTADOS DE PARÁMETROS DE TRABAJO OBTENIDOS POR PRUEBAS DE JARRAS.

i. Gradiente y tiempo óptimo de floculación.

Se calculó el tiempo óptimo de floculación a partir de 4 pruebas de jarras, los valores resaltados en cada resultado corresponden a la mayor remoción de turbiedad y color.

La eficiencia de remoción (η) de turbiedad calculó con la turbiedad en el agua cruda ($turb\ i$) y la turbiedad en la jarra de interés ($turb\ n$):

$$\eta = \frac{turb\ i - turb\ n}{turb\ i}$$

De la misma forma se calculó la eficiencia de remoción de color, los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla Nº I. Tiempo de floculación con gradiente de 40 s⁻¹ y 18 minutos de sedimentación. Caudal de 620 L/s, Dosis 22 mg/L

Muestra	Tiempo de Floculación	PH	Color (Pt/co)	Turbiedad (NTU)
Agua cruda	-----	7,24	44,3	17,50
1	10,0	5,68	19,2	5,13
2	13,5	5,44	21,9	6,38
3	15,0	5,69	16,6	5,69
4	20,0	5,72	15,7	4,10
5	25,0	5,62	15,3	4,02
6	30,0	5,73	17,2	4,58
η jarra 4 (%)	-----	-----	64,56	76,57

Tabla Nº II Tiempo de floculación con gradiente de 30 s⁻¹ y 18 minutos de sedimentación. Caudal 672 L/s, Dosis 22 mg/L.

Muestra	Tiempo de Floculación	PH	Color (Pt/co)	Turbiedad (NTU)
Agua cruda	-----	7,05	39,1	17,5
1	10,0	6,20	17,4	4,38
2	13,5	6,20	16,3	4,03
3	15,0	6,26	16,5	3,53
4	20,0	6,24	15,1	3,14
5	25,0	6,23	14,8	3,25
6	30,0	6,23	13,9	3,10
η jarra 4 (%)	-----	-----	61,38	76,57

Tabla Nº III. Tiempo de floculación con gradiente de 22 s⁻¹ y 18 minutos de sedimentación, caudal 662 L/s, dosis 22 mg/L.

Muestra	Tiempo de Floculación	PH	Color (Pt/co)	Turbiedad (NTU)
Agua cruda	-----	7,14	36,6	13,4
1	10,0	6,19	18,5	4,09
2	13,5	6,18	15,6	2,95
3	15,0	6,15	14,0	2,72
4	20,0	6,14	13,9	2,54
5	25,0	6,16	13,4	2,64
6	30,0	6,15	14,6	2,74
η jarra 5 (%)	-----	-----	62,02	75,34

Tabla Nº IV. Tiempo de floculación con gradiente de 13 s⁻¹ y 18 minutos de sedimentación, caudal 670 L/s, dosis 20 mg/L.

Muestra	Tiempo de Floculación	PH	Color (Pt/co)	Turbiedad (NTU)
Agua cruda	-----	7,15	33,6	7,91
1	10,0	6,15	24,1	4,77
2	13,5	6,19	21,4	4,27
3	15,0	6,19	21,5	4,18
4	20,0	6,17	18,7	3,26
5	25,0	6,18	15,1	2,59
6	30,0	6,17	14	2,20
η jarra 5 (%)	-----	-----	55,06	67,26

ii. Tiempo óptimo de sedimentación.

Con los parámetros óptimos de floculación con 22 s^{-1} de gradiente en 20 minutos, se realizó otra prueba de jarras para obtener el tiempo óptimo de sedimentación, se desarrollaron muestreos de las jarras al minuto 1, 3, 5, 8, 12, 15, 18, 21, 25, 30, 35 y 40 de sedimentación, el caudal y dosis al momento de realizar dicho ensayo fue de 725,8 L/s y 30 mg/L respectivamente, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° V. Tiempo de sedimentación.

Muestra	Tiempo de sedimentación	PH	Color (Pt/co)	Turbiedad (NTU)
Agua cruda	-----	7,14	22,2	5,78
1	1	6,37	28,6	11,4
2	3	6,37	28,0	11,1
3	5	6,38	25,0	9,06
4	8	6,38	21,6	5,99
5	12	6,38	18,7	5,07
6	15	6,37	18,3	4,99
7	18	6,38	17,4	4,79
8	21	6,38	15,6	3,45
9	25	6,38	11,9	1,99
10	30	6,38	11,9	1,91
11	35	6,38	11,8	1,89
12	40	6,38	11,7	1,85

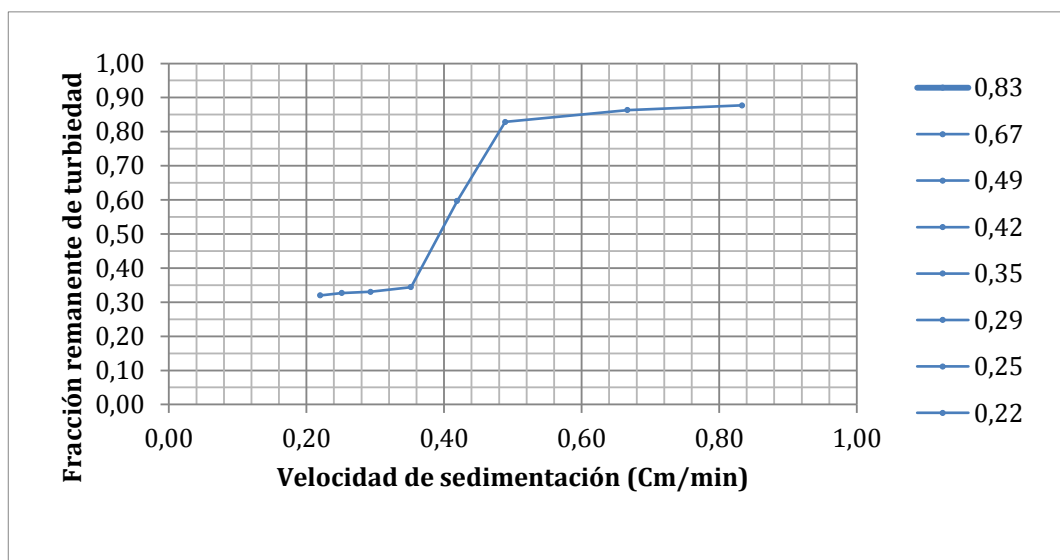
Nota: Los primeros cuatro datos, no se tuvieron en cuenta al parecer fueron tiempos muy cortos y por tanto, aun se estaba formado el flóculo ocasionando de esta manera turbiedades mayores que la inicial.

Para obtener una curva de variación de eficiencia en remoción de la turbiedad respecto a la velocidad de sedimentación se calculó la fracción remanente de turbiedad (Fr) y la velocidad de sedimentación (Vs) cm/min, los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla N° VI. Fracción remanente de turbiedad y velocidad de sedimentación.

Muestra	Tiempo de sedimentación	Color (Pt/co)	Turbiedad (NTU)	Fracción remanente (Fr)	Velocidad de sedimentación (Vs)
5	12	21,6	5,99	0,88	0,83
6	15	18,7	5,07	0,86	0,67
7	18	18,3	4,99	0,83	0,49
8	21	17,4	4,79	0,60	0,42
9	25	15,6	3,45	0,34	0,35
10	30	11,9	1,99	0,33	0,29
11	35	11,9	1,91	0,33	0,25
12	40	11,8	1,89	0,32	0,22

Gráfica N° I. Curva de variación de eficiencia.



Con el fin de obtener un valor de turbiedad aproximadamente de 2 NTU después de la sedimentación, se asumió una velocidad de sedimentación de 0,36 cm/min e intervalos de 0,01 de fracción remanente de turbiedad, con estos valores y la ecuación de eficiencia se calculó la eficiencia de remoción requerida:

$$RT = 1 - 0,36 + \frac{0,01}{0,36} \left[\left(\frac{0,36 + 0,352}{2} \right) + \left(\frac{0,352 + 0,33}{2} \right) + \left(\frac{0,33 + 0,27}{2} \right) + \left(\frac{0,27 + 0,22}{2} \right) \right]$$

$$RT = 0,6743 = 67,443\%$$

Para comprobar si con la eficiencia de remoción de 67,44% se obtiene un valor cercano a 2 NTU después del proceso de sedimentación, se calculó la remoción de turbiedad realizando el producto entre la eficiencia obtenida y la turbiedad inicial (5,78 NTU):

$$\text{Turbiedad removida} = 0,6743 * 5,78 = 3,88 \text{ NTU}$$

Al restar la turbiedad inicial la turbiedad removida, se obtiene el valor de la turbiedad remanente; al calcular este valor se obtiene un valor de 1,99 NTU. Por consiguiente se verifica que el valor de 0,36 cm/min es una buena velocidad de sedimentación.

La ecuación para determinar el tiempo óptimo de sedimentación está dada por:

$$t = \frac{h}{V_{sc}} = \frac{8,8 \text{ cm}}{0,36 \text{ cm}/\text{min}} = 24,4 \text{ min} \approx 25 \text{ min}$$

Donde,

h = altura de la lamina de agua en las jarras en cm

V_{sc} = Velocidad de sedimentación en cm/min

El tiempo óptimo de sedimentación obtenido es 25 minutos.

II. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA.

Con los parámetros obtenidos de tiempo de floculación de 20 minutos, gradiente de floculación de 22 s^{-1} y tiempo de sedimentación 25 minutos se realizaron 38 pruebas de jarras, cuyos datos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N° VII. Prueba de jarras.

Muestra	Dosis	caudal	T°	Agua cruda			Jarra 1			Jarra 2			Jarra 3			Observaciones
				pH	color	turb	pH	color	turb	pH	Color	turb	pH	color	turb	
1	27,7	602	16,3	7,46	23,8	7,07	6,27	11,4	1,36	6,18	10,9	1,35	6,22	11,1	1,64	No uso de la flauta en la Salida del dosificador Tubo PVC Ubicado en el Centro del vertedero
2	27,7	602	16,3	7,34	24,9	9,39	6,52	17,2	3,07	6,33	11,8	1,73	6,27	11,3	1,47	
3	27,7	602	16,6	7,39	23,0	6,47	6,11	12,6	1,64	6,10	10,1	1,48	6,21	11,3	1,71	
4	27,7	602	16,6	7,36	22,4	5,77	6,36	17,8	3,11	6,42	22,7	4,73	6,23	11,3	1,75	
5	34,4	753	16,6	7,64	21,3	8,03	6,26	15,6	2,70	6,29	12,9	2,07	6,24	11,7	2,06	
6	34,4	753	16,6	7,47	20,2	7,00	6,22	9,70	1,44	6,26	11,3	1,57	6,32	10,2	1,51	
7	36,5	482	15,9	7,10	31,7	10,9	6,88	15,5	2,85	6,04	11,5	1,58	6,80	19,6	4,43	
8	36,5	482	15,9	7,05	31,3	10,3	6,29	20,5	3,24	6,16	10,9	1,77	6,13	12,9	1,89	
9	24,8	771	16,3	7,02	31,6	14,7	6,51	26,6	6,93	6,53	21,6	4,62	6,55	18,9	3,45	
10	24,8	771	16,3	7,18	32,3	14,9	6,16	12,4	2,17	6,34	13,4	1,85	6,41	14,0	2,02	
11	25,3	730	16,6	7,18	26,5	10,8	6,40	21,1	4,64	6,39	12,9	1,99	6,44	12,6	1,68	
12	25,3	730	16,6	7,15	25,9	11,3	6,69	25,9	4,44	6,67	17,3	1,84	6,68	12,1	2,88	
13	25,7	756	16,6	7,24	23,3	8,19	6,36	11,5	1,34	6,44	16,6	2,91	6,44	12,3	2,13	
14	25,7	756	16,6	7,34	22,4	7,93	6,42	14,0	1,95	6,31	12,3	1,94	6,41	14,4	2,73	
15	35,5	620	15,7	7,37	32,4	13,2	6,73	20,7	13,2	6,75	15,4	3,50	6,80	20,5	4,60	
16	35,5	620	15,7	7,32	32,8	13,1	6,30	13,1	2,13	6,14	17,9	3,78	6,38	13,6	2,15	
17	31,1	638	15,8	7,14	29,9	12,6	6,26	11,6	1,70	6,23	10,9	1,50	6,22	10,7	1,44	
18	31,1	638	15,8	7,15	27,2	10,0	6,54	11,7	1,77	6,57	11,5	1,93	6,47	11,7	2,04	

				Agua cruda			Jarra 1			Jarra 2			Jarra 3			
Muestra	Dosis	caudal	T°	pH	Color	turb	pH	color	turb	pH	Color	turb	pH	color	turb	Observaciones
19	31,4	602	16,2	7,32	25,5	11,3	6,16	11,3	2,62	6,26	11,5	2,62	6,38	11,5	1,77	
20	31,4	602	16,2	7,29	25,1	10,9	6,45	11,6	1,89	6,38	11,2	1,73	6,39	11,6	2,32	
21	26,3	586	16,3	7,25	23,8	9,04	6,20	14,0	4,91	6,49	13,1	2,43	6,30	10,6	2,14	
22	26,3	586	16,3	7,25	23,8	9,04	6,20	19,3	4,98	6,49	18,5	4,02	6,37	12,2	2,04	
23	33,6	640	16,2	7,33	55,4	29,80	6,19	13,7	4,02	6,31	12,2	2,69	6,27	13,3	3,29	
24	33,6	640	16,2	7,33	55,4	29,80	6,27	13,3	3,42	6,05	24,2	7,64	6,07	29,2	8,40	
25	34,8	600	16,2	7,15	18,1	19,60	6,34	13,0	3,19	6,31	13,7	3,00	6,33	13,9	3,61	
26	34,8	600	16,2	7,15	18,1	19,60	6,33	13,5	3,58	6,33	13,5	3,17	6,15	27,1	9,55	
27	28,8	718	16,2	7,11	28,8	12,00	6,38	14,0	3,22	6,42	12,6	2,47	6,34	12,4	2,74	
28	28,8	718	16,2	7,11	28,8	12,00	6,45	11,6	2,41	6,43	12,9	2,79	6,54	14,2	3,44	
29	28,4	763	16,3	7,35	26,0	9,56	6,29	27,5	8,73	6,39	27,0	8,35	6,54	27,8	8,82	No uso flauta
30	28,4	763	16,3	7,35	26,0	9,56	6,59	16,7	3,56	6,61	17,8	4,45	6,68	26,8	8,19	Dosis izq.
31	33,9	651	15,2	7,37	30,6	10,0	6,40	13,9	2,58	6,38	13,4	2,06	6,32	12,2	1,8	Uso de la flauta
32	33,9	651	15,2	7,37	30,6	10,0	6,41	12,9	2,31	6,38	12,2	1,87	6,33	14,0	3,08	
33	35,6	644	14,9	7,27	26,4	9,03	6,37	14,1	3,06	6,39	13,7	2,80	6,36	12,0	1,99	
34	35,6	644	14,9	7,27	26,4	9,03	6,37	13,9	2,95	6,36	17,5	4,40	6,36	17,3	4,08	
35	30,5	709	15,3	7,11	24,6	7,89	6,32	13,2	2,26	6,39	14,9	2,91	6,40	13,5	2,64	
36	30,5	709	15,3	7,11	24,6	7,89	6,55	20,5	4,96	6,45	14,3	2,60	6,58	21,7	6,34	
37	31,7	742	15,1	7,33	24,8	8,09	6,59	15,5	3,2	6,59	12,8	2,34	6,55	12,3	1,86	
38	31,7	742	15,1	7,33	24,8	8,09	6,59	14,2	3,24	6,55	13,9	2,9	6,58	13,9	3,07	